

Proyecto Final Integrador *Ingeniería Ambiental*

Diseño de sistemas de tratamiento de aguas de producción para una central de procesamiento de hidrocarburos provenientes de la formación Vaca Muerta - Neuquén; y diseño del tratamiento de efluentes provenientes del campamento.

Nicolás Pablo Holoveski
Legajo CYT-9101

Tutor:

Stephen Wharton

Abril 2025

Resumen Ejecutivo

El presente documento contiene el desarrollo de dos proyectos centrados en la gestión de las corrientes de efluentes vinculadas a un proyecto hidrocarburífero de Exploración y Producción (conocida también como *E&P* o *Upstream*) que planea desarrollar la empresa **FracEnergy**, el cual consiste en la ampliación de su proyecto exploratorio mediante la construcción y operación de una planta central de procesamiento preparada para una producción diaria de aproximadamente 5.000 Mm³ de gas natural y 300 m³ de hidrocarburos líquidos. Esta central, ubicada en el bloque Loma Gruesa en Vaca Muerta, presenta un desafío ambiental debido a la generación de más 900 m³ de agua de producción la cual debe ser debidamente gestionada. Además, la ejecución y operación del mismo implica la construcción de múltiples facilidades, y un campamento capaz de alojar hasta 240 personas en planta permanente producto de la lejanía a otros centros urbanos. En respuesta a estos desafíos, el presente informe incluirá el desarrollo de implementación de un proyecto centrado en el tratamiento y disposición del agua de producción generada por el proyecto Loma Gruesa, así como también sus aguas residuales del campamento.

El documento comienza con un marco teórico que permite adquirir los conocimientos mínimos de la industria hidrocarburífera, necesarios para comprender los desarrollos posteriores, y continúa con el análisis de caso particular que planea implementar Frac Energy, el cual parte de un desarrollo exploratorio de 3 pozos de los cuales se extrae la caracterización fisicoquímica del agua de producción.

Una vez introducidos los lineamientos generales, el desarrollo de ambos proyectos siguen la misma estructura lógica; se comienza con un relevamiento del estado del arte referido a ambos tratamientos, con una descripción conceptual de los procesos físicos, químicos y biológicos, así como también las operaciones unitarias que los engloban. En base a esta información, se detalla una descripción de diferentes alternativas de implementación, y posteriormente se realiza una evaluación de cada una de ellas usando como punto de análisis diferentes criterios que hacen al interés de FracEnergy, las eficiencias esperadas, y otras consideraciones. Una vez elegido el tratamiento a diseñar, se plantea una memoria descriptiva de cada instalación con su respectiva memoria de cálculo, fundamentada tanto en información bibliográfica, como en recomendaciones de expertos en la industria. Finalmente, se detalla un apartado de cómputo y presupuesto de cada proyecto.

Como se mencionó anteriormente, el primer proyecto consiste en el diseño de una planta de tratamiento de agua de producción, proveniente de los pozos hidrocarburíferos, la cual será instalada en la planta central de procesamiento. Este fluido, proveniente de un proyecto del tipo No Convencional, se origina producto de la propia agua de formación o agua fósil, del tipo subterránea, y del agua de retorno o *flowback*, la cual proviene de las actividades de fractura hidráulica.

La autoridad de aplicación requiere que ambos fluidos, tanto agua de formación como *flowback*, sean tratados para obtener características de calidad de agua compatibles con los requerimientos de disposición en pozos sumideros, los cuales inyectan el líquido tratado a la Formación Centenario. Dichos requerimientos, definidos como parámetros fisicoquímicos, son establecidos por la autoridad local caso por caso.

Por otro lado, realizar un tratamiento centrado únicamente en la obtención de una calidad de agua compatible con su inyección del agua a pozos sumideros supone tratar a este recurso como un residuo, sin valor económico. Por otra parte, existen diversos peligros cuya probabilidad de materialización están en aumento, generando un riesgo para las actividades económicas de FracEnergy. Entre ellos, se destacan:

- Los escenarios climáticos futuros provistos por el informe bienal de la República Argentina, dentro de los cuales destaca como proyección una potencial crisis del agua en la cuenca del Comahue.
- Las posibles regulaciones futuras que restrinjan la utilización de recursos hídricos para actividades hidrocarburíferas; Si bien no existe jurisprudencia en la Argentina, muchos países del mundo poseen regulaciones enfocadas en el uso del agua para fractura hidráulica.
- La presión de accionistas y posibles inversores, quienes desean que FracEnergy se abra a mercados europeos, los cuales poseen un estándar de cuidado ambiental elevado.

Por otra parte, el agua en sí es un recurso requerido por la industria, especialmente producto de las actividades de fractura hidráulica. Es por todos estos motivos que el presente proyecto buscará ejecutar un tratamiento que permita considerar el reuso de este recurso hídrico para *fracking*.

El diagnóstico resultante de los análisis fisicoquímicos del agua de producción entregados por FracEnergy para este presente proyecto, concluye que las fracciones de componentes a remover para llegar a cumplir el requisito legal de inyección a sumidero son el contenido de hidrocarburos y la presencia de ciertos metales pesados, como el Cromo y el Arsénico. Por otra parte, y como se detalla en el marco conceptual de este informe, el contenido de hierro debería ser bajo para la conformación de fluidos de fractura hidráulica.

Luego de una descripción de tecnologías que podrían lograr un tratamiento, se plantea una descripción y evaluación de alternativas para este proyecto, en dos pasos; el primero, una descripción de distintas técnicas de separación de hidrocarburos como las Piletas API, los separadores de placa y los sistemas de flotación de aire disuelto, en donde se seleccionó a un separador de placas corrugadas como sistema unitario encargado de obtener un efluente bajo en contenido de hidrocarburos. El segundo, un análisis centrado en la remoción de metales pesados mediante su precipitación, que consideró una comparativa entre técnicas de coagulación y floculación convencional, y técnicas más novedosas como la

electrocoagulación. De estas opciones, se seleccionó la coagulación y floculación convencional por motivos de madurez tecnológica.

Ya seleccionadas la alternativa a ejecutar, el documento continúa con una memoria descriptiva de la planta y acompañada de una memoria de cálculo del tratamiento de esta corriente; el mismo comienza con una separación de hidrocarburos inicial en base a un arreglo inicial de tanques bajo estándar API 650, continúa con un posterior afino en cantidad de hidrocarburos con un separador de placas corrugadas en base a la API 421, y finaliza con un tratamiento de remoción de metales mediante la coprecipitación con hidróxido férrico con coagulación y floculación mediante, y posterior filtración. Este tratamiento permite remover metales pesados que podrían encontrarse en el agua de producción y que deben extraerse antes de su inyección al pozo sumidero, además de reducir el contenido de hierro, que es uno de los componentes de calidad de agua que más interfiere con la conformación de fluidos de fractura. De esta forma, se permitiría no solo llegar a parámetros de vuelco apropiados, sino también reutilizar parte del agua de producción para continuar con las actividades de Upstream No Convencional, reduciendo así la huella hídrica de la operación con respecto a lo que puede considerarse como el *status quo* de la industria, en donde esta práctica aún no es del todo realizada.

El segundo proyecto consiste en la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales generadas por el campamento de planta permanente que se instala en las inmediaciones de la planta central de procesamiento. Centrada en prevenir malos olores que puedan generar malestar en los trabajadores, la misma permitiría obtener una calidad de agua apta para vuelco superficial; en este caso, el destino principal sería el riego de caminos de entrada a la planta, para evitar el polvo en suspensión que se genera durante la movilización de vehículos.

Para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales, se presentaron tres configuraciones de tratamiento posibles, las cuales se diferencian especialmente en la unidad de tratamiento biológico. Realizando una evaluación comparativa entre una laguna de maduración, un filtro percolador o reactor de lodos activos, se decide este último por presentar una mejor eficiencia de remoción ante climas adversos, así como también un mejor control de olores.

Ambos proyectos de gestión de efluentes resultan ser estrictamente necesarios para la ejecución del proyecto de una planta central de procesamiento de hidrocarburos, debido a que la ausencia de éstos requeriría el retiro continuo de líquidos por camiones cisterna en una magnitud tal que afectaría fuertemente la rentabilidad del negocio. Por otra parte, han sido pensados y conceptualizados, de forma tal que se busque obtener un diseño centrado en el aprovechamiento de estos efluentes con el objetivo de reducir el impacto ambiental de la operación.

Tabla de contenidos

1. Introducción.....	7
1.1. Justificación del proyecto	7
1.2. Objetivo del proyecto	8
2. Marco teórico	9
2.1. Escenario Energético en Argentina y en el mundo	9
2.1.1. El caso Vaca Muerta	11
2.2. Producción Convencional y No Convencional.....	12
2.3. Los hidrocarburos y el agua de formación.....	14
2.4. Un vistazo al proceso del Upstream: Exploración y Producción (E&P).....	16
2.5. El proceso de fractura hidráulica y el agua de <i>flowback</i>	22
2.5.1. El fluido de fractura	24
2.6. El agua de producción	26
2.6.1. Características del agua de producción.....	28
2.6.2. Posibilidades para el reuso de agua de producción.....	29
2.7. La gestión del recurso hídrico en Vaca Muerta	29
3. Caso de Estudio - Frac Energy.....	31
3.1. Caracterización del agua de producción de Loma Gruesa	34
3.2. Caracterización del agua residual de campamento	35
4. Marco Legal	38
4.1. República Argentina.....	38
4.2. Provincia de Neuquén.....	38
4.3. Otras jurisdicciones	39
5. Proyecto: Planta de Agua de Producción	40
5.1. Alcance del proyecto.....	40
5.2. Estado del arte.....	40
5.2.1. Tratamientos Convencionales	41
5.2.2. Tratamientos Complementarios.....	47
5.3. Descripción de alternativas (agua de producción).....	54
5.4. Evaluación y selección de Alternativas (agua de producción)	59
5.5. Memoria descriptiva del tratamiento de agua de producción	62
5.5.1. Consideraciones para el reuso	69
5.6. Memoria de cálculo del tratamiento de agua de producción	75
5.6.1. Tanque Pulmón (API 650).....	75
5.6.2. Tanque Skimmer (API 650).....	81
5.6.3. Separador de Placa Corrugada	83

5.6.4.	Coagulación - Floculación	86
5.6.5.	Sedimentación	94
5.6.6.	Filtración	101
5.6.7.	Tanque Inyector (TKI) y Tanque de Trasvase (TKT)	106
5.6.8.	Sistema de gas de blanketing.....	106
5.6.9.	Sistema de conducción	107
6.	Proyecto: Planta de tratamiento de aguas residuales	110
6.1.	Alcance del proyecto.....	110
6.2.	Estado del arte.....	110
6.2.1.	Pretratamiento.....	111
6.2.2.	Tratamiento Primario	111
6.2.3.	Tratamiento Secundario	111
6.2.4.	Tratamiento Terciario	114
6.3.	Descripción de alternativas (campamento)	114
6.4.	Evaluación y selección de alternativas (campamento)	116
6.5.	Memoria descriptiva de la Planta de tratamientos de aguas residuales.....	119
6.6.	Memoria de cálculo del tratamiento de efluentes del campamento	122
6.6.1.	Pretratamiento.....	122
6.6.2.	Tratamiento Primario	126
6.6.3.	Tratamiento Secundario	131
6.6.4.	Tratamiento Terciario	146
6.6.5.	Sistemas de conducción e impulsión.....	150
7.	Cómputo y presupuesto	151
7.1.	Planta de tratamiento de agua de producción	152
7.2.	Planta de tratamiento de aguas residuales	155
8.	Planos	156
9.	Conclusiones generales	157
9.1.	Conclusiones personales	159
9.2.	Agradecimientos	159
10.	Bibliografía	160
11.	Anexos	163
11.1.	Análisis fisicoquímico Flowback	163
11.2.	Metodología de Identificación y Evaluación de Alternativas	164
11.3.	Volúmenes del Tanque Pulmón (TKP)	165
11.4.	Memoria de cálculo para sistemas conducción e impulsión	167
11.5.	Misceláneos.....	171

1. Introducción

1.1. Justificación del proyecto

En los últimos años, la actividad hidrocarburífera no convencional de recursos shale en la cuenca Neuquina y Vaca Muerta (RCN y VM) está en un vertiginoso crecimiento, con múltiples compañías realizando grandes inversiones para aumentar la producción. Sin embargo, este incremento en las actividades acarrea una serie de desafíos ambientales.

Una de ellas, derivada de la puesta a producción de los pozos hidrocarburíferos, es la generación de un subproducto que es considerado como residuo, conocido como **agua de producción**. La misma tiene dos orígenes: el agua de formación o *fósil*, proveniente de los reservorios de crudo y presente en yacimientos convencionales y no convencionales, y el agua de retorno o *flowback*, propia del no convencional y con origen en el proceso de fractura hidráulica, el cual en la actualidad consume agua dulce.

De los efluentes líquidos generados en las actividades de Exploración y Producción (E&P), la mayor parte corresponde al agua de producción. El restante se compone casi en su totalidad de las aguas negras y grises generadas en los campamentos, producidos de la necesidad de contar con permanencia operativa en los yacimientos, que comúnmente están alejados de los centros urbanos.

El manejo inadecuado del agua de producción, con su alto contenido de sólidos sedimentables y disueltos, trazas de hidrocarburos, y en ocasiones metales, así como de las aguas negras y grises, ricas en materia orgánica y microorganismos, pueden generar una contaminación significativa en el suelo, en cuerpos de agua, a los ecosistemas e inclusive a la salud pública si no son correctamente gestionados. Producto de estos posibles impactos, las autoridades pertinentes regulan a las actividades con el objetivo de asegurar un manejo adecuado, motivo por el cual se torna imprescindible poseer procesos de tratamiento adecuados para llegar a los requerimientos mínimos de calidad de agua aceptables para su disposición en el sitio seleccionado; esto como alternativa superadora, tanto en materia económica y como ambiental, al retiro de estos efluentes mediante camiones cisterna y a un tratador habilitado para tal fin.

Además de estas problemáticas locales y actuales que deben afrontarse para ejecutar proyectos de E&P, también existen otros factores externos que justifican la ejecución de proyectos de gestión hídrica que, además de buscar mitigar impactos ambientales, se centren en alternativas que reduzcan el consumo de fuentes de agua dulce.

Existen proyecciones avaladas por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) que pronostican que la cuenca del Comahue, la cual incluye la región de la Cuenca Neuquina (**Ver apartado 2.1.1**) tenderá a incrementar sus períodos de sequía, producto del cambio climático de origen antropogénico. El sector industrial de Neuquén, que además recientemente [busca proyectarse como un polo productivo en materia de energía e Inteligencia Artificial](#), podría demandar un aumento en el consumo de agua, tanto para actividades de fractura hidráulica como para refrigeración de equipos, lo cual se traduce en una mayor presión ecosistémica y mayor riesgo en materia regulatoria.

Por otra parte, producto del continuo interés de la opinión pública y la creciente responsabilidad corporativa referida a temas ambientales, sociales y de gobernanza (*ESG por sus siglas en inglés*), se ha generado un contexto en el cual los esfuerzos destinados a mejorar los indicadores ambientales, tales como aumentar el reuso de las corrientes de efluentes, pueden traducirse en una ganancia no sólo desde un punto de vista ecosistémico, sino también desde un punto de vista económico y de salud financiera. Esto se evidencia particularmente en iniciativas regulatorias recientes, como las directivas europeas sobre reporte corporativo y debida diligencia en materia de sostenibilidad (*CSRD y CS3D*, respectivamente, por sus siglas en inglés). Estas directivas buscan garantizar que las empresas cumplan estándares mínimos de sostenibilidad como condición indispensable para acceder a mercados clave como la Unión Europea.

1.2. Objetivo del proyecto

El objetivo central del proyecto radica en el diseño de ingeniería y facilidades para realizar la gestión integral de todo el recurso hídrico de la operación en el yacimiento, contemplando el diseño de una Planta de Tratamiento de Agua de la Planta Central de Hidrocarburos, destinada a tratar físico-químicamente toda el agua de producción en función del tratamiento y destino final que desee darse (inyección o alternativas de reuso), así como también la planta de tratamiento de aguas residuales del campamento.

Ambos tratamientos tienen como objetivo proteger la salud y el ambiente, asegurando que la calidad obtenida para cada destino satisfaga los límites establecidos por la normativa vigente. Además, existen dentro de los objetivos ambientales de la compañía en concordancia con los escenarios climáticos futuros de la zona, metas de reuso de agua, por lo que ambos proyectos deben centrarse en obtener alguna alternativa de uso diferente a la disposición final.

2. Marco teórico

2.1. Escenario Energético en Argentina y en el mundo

En el último siglo, el desarrollo ha tenido un ritmo sin precedentes. La globalización ha conectado economías, aumentando el comercio y las inversiones, en donde cada vez se utilizan más recursos para tareas cotidianas. Por otra parte, se aproximan escenarios en donde la informática y la industria 4.0 impone un nuevo paradigma de mayor consumo de energía, en donde los recursos y la eficiencia energética juegan un rol fundamental debido a la creciente puesta en conocimiento de los impactos ambientales derivados de este desarrollo. Para suplir esta demanda, los países y economías del mundo han desarrollado diversas matrices energéticas, que van mutando a lo largo del tiempo en función del contexto y los recursos disponibles.

Existe un consenso por parte de la comunidad científica en la necesidad diversificar la matriz energética global mediante el aumento de las energías más limpias y con menores emisiones, como lo son las llamadas renovables, por sus claras ventajas en materia de cambio climático y calentamiento global. Sin ir más lejos, esto ha sido ratificado por las principales naciones del mundo en varios hitos históricos de las Convenciones Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, como el Protocolo de Kyoto o el Acuerdo de París. Sin embargo, ¿es posible cambiar una matriz energética global, predominante en la utilización de combustibles fósiles, sin generar impactos en la calidad de vida en el corto plazo?

Si bien hay muchas respuestas para esta interrogante, numerosas fuentes coinciden de que es necesario un período de transición energética, la cual describe un escenario en donde la matriz energética no tendrá un cambio abrupto, sino que los recursos no renovables y renovables co-existirán por un período de tiempo medible en décadas. Bajo este concepto, la transición total sería lograda de forma gradual, acompañada por un desarrollo tecnológico que permita reducir los costos de implementación de nuevas formas de producir energía, y por procesos suplementarios que secuestran carbono de la atmósfera mediante soluciones basadas en la naturaleza, o procesos industriales como la Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS)¹. Como principales protagonistas de este proceso de transición energética se encuentran los hidrocarburos livianos como condensados y el gas natural.

¹International Energy Agency (IEA). [“Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach - Progress in the Clean Energy Transition.”](#)

En la Argentina, la matriz energética se compone principalmente de gas natural y petróleo, con un aporte minoritario pero apreciable de energías renovables para su consumo de energía interna² (Figura 2.1). Esta distribución es una de las mejores a nivel mundial, y la mejor a nivel mundial gracias a la baja proporción de uso de carbón, y su gran aporte de gas natural como combustible para la generación de energía eléctrica. Por otro lado, si bien exporta energía, en la actualidad se mantiene como un importador neto.

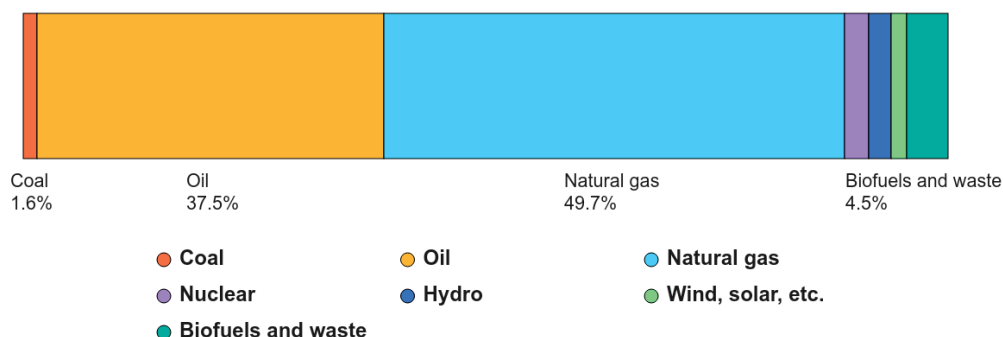


Figura 2.1: Matriz energética de Argentina en 2022. Fuente: International Energy Agency

La transición energética en la Argentina es un tema vigente, al ser uno de los países que firmó el Acuerdo de París³, en donde se ratificó el compromiso de lograr la neutralidad de carbono para el año 2050. Para lograr este objetivo, la Comisión Nacional de Energía Atómica identifica 9 claves para la transición en donde se enlistan elementos fundamentales como la producción de litio, la generación de energía mediante renovables, la inversión en ciencia y tecnología, entre otras. Entre ellas, se incluye la Explotación del recurso de Gas Natural de Vaca Muerta⁴; si bien éste es un recurso fósil, la relación entre su poder calorífico y emisiones de gases de efecto invernadero es, en promedio, un 30% menor frente al resto de los combustibles líquidos. Sin ir más lejos, la utilización del Gas Natural como combustible es contemplado en el Escenario de Compromisos Anunciados o APS (Announced Pledges Scenario) diseñado por la International Energy Agency (IEA) en sus reportes⁵, en donde se parte con la premisa de que el futuro del gas natural es aún promisorio, y ocupará un lugar más preponderante que los otros recursos fósiles en la medida que las energías renovables ganan terreno.

En cuanto a la producción de hidrocarburos en Argentina, existen múltiples Cuencas Sedimentarias con recurso fósil identificadas, pero solo algunas de ellas se encuentran en producción (Figura 2.2). Si bien las primeras explotaciones ocurrieron en la provincia de Mendoza, Salta y Jujuy, la primera cuenca en explotarse masivamente en el país es la del Golfo San Jorge, ubicada en el centro de la Patagonia, la cual

² International Energy Agency (IEA). "Countries: Argentina."

³ Gobierno de Argentina (2015) - Acuerdo de París. Recuperado de:

<https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/acuerdo-de-paris>

⁴ Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). "Transición Energética y Tecnología Nuclear: Las 9 Claves para la Transición."

⁵ International Energy Agency (IEA). "World Energy Outlook 2023."

se encuentra en declive productivo por agotamiento de recursos⁶. La más reciente es la cuenca Austral, en el sur de la Argentina, la cual está comenzando su proceso exploratorio en la formación Palermo Aike. Sin embargo, entre todas ellas, se destaca como la principal productora históricamente y en la actualidad a la Cuenca Neuquina, en donde se explotan recursos Convencionales y No Convencionales (ver apartado 1.3 [“Convencional y No Convencional”](#)).

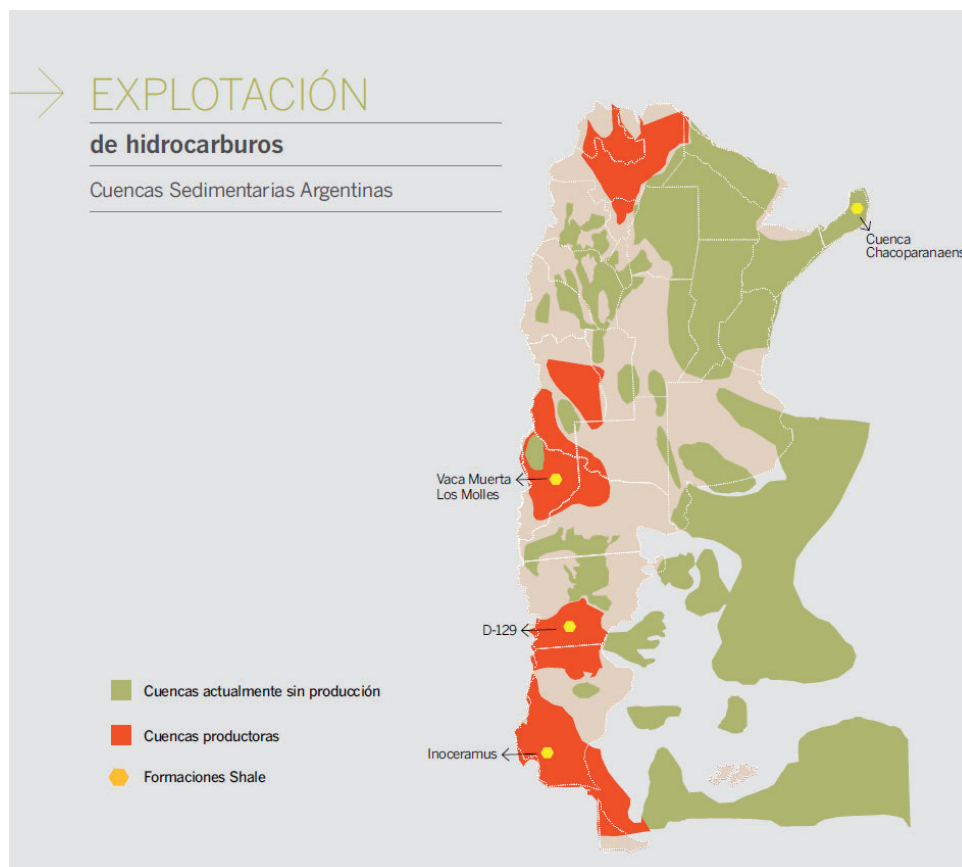


Figura 2.2: Explotación de hidrocarburos en Argentina

2.1.1. El caso Vaca Muerta

La provincia de Neuquén tiene una tradición en la industria hidrocarburífera que nace hace más de 100 años; el primer pozo petrolero en Plaza Huincul se inauguró en 1918, y continuó durante casi todo el siglo XX con sectores icónicos como Rincón de los Sauces y Loma la Lata. Durante todo este período, se explotaron reservorios **Convencionales**. Como todo recurso no renovable, si bien la producción de la región no fue declinando debido a que se mantuvo una producción controlada en el tiempo, si es de público conocimiento que las reservas de hidrocarburos estaban en declive y, en algún punto, serían explotadas hasta su agotamiento⁷. No fue hasta el desarrollo de la formación Vaca Muerta, un recurso **Shale No**

⁶ [EL DESARROLLO HISTÓRICO DE LAS EXPLORACIONES PETROLERAS EN LA ARGENTINA](#)

⁷ [El Petróleo en Neuquén: Cien Años de Historia.](#)

Convencional, comenzado por el primer pozo No Convencional de latinoamérica realizado por la compañía Apache⁸, y luego de la mano YPF-Repsol en el año 2010, en donde se ratificó la importancia estratégica de lo que es el cuarto reservorio de shale más grande del mundo, con un total de 22.500 millones⁹ de barriles equivalentes de petróleo¹⁰ recuperables a una profundidad de entre 2.400 y 3.000 metros. Considerando la transición energética, Vaca Muerta además es la segunda reserva de shale gas más grande.

Actualmente, los proyectos No Convencionales en Vaca Muerta dependen fuertemente del consumo de agua dulce de fuentes de agua superficiales. Si bien el consumo de agua para estas actividades no se ha relacionado directamente con la falta del recurso hídrico aguas abajo, lo cierto es que, a medida que la industria hidrocarburífera aumente su presencia en esta clase de proyectos, la demanda del recurso hídrico se incrementaría a la par.

Por otra parte, proyecciones realizadas por la Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable en [cuarto informe bi-enal de la República Argentina](#) estiman que, durante los próximos años y producto del cambio climático, el recurso hídrico comenzará a escasear en la zona (figura 2.3).



Figura 2.3: Escenarios climáticos futuros en la Argentina. Fuente: <https://www.argentina.gob.ar/>

2.2. Producción Convencional y No Convencional

El hidrocarburo tiene un origen orgánico, producto de la descomposición de la materia orgánica de principalmente los mares de la era mesozoica, la cual fue aprisionada junto a los restos de sedimentos

⁸ <https://mase.lmneuquen.com/pozo/la-historia-del-primer-pozo-multifracturado-del-pais-n829075>

⁹ Wikipedia: [Yacimiento petrolífero Vaca Muerta](#).

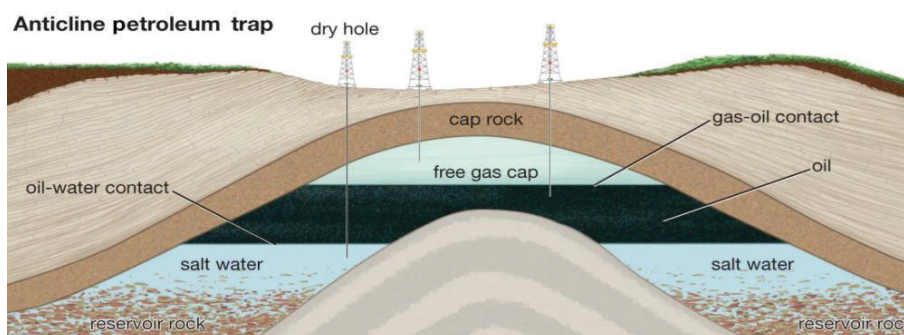
¹⁰ Unidad de energía equivalente a la energía liberada durante la quema de un barril de petróleo crudo, utilizada normalmente para estandarizar reservas de crudo y gas natural.

inorgánicos y que dieron origen a las formaciones de tipo sedimentarias formando los denominados **reservorios**. Luego, y a medida que estos sedimentos empiezan a alcanzar capas más profundas y se someten a mayor presión, permitieron la descomposición de la materia orgánica en sus componentes más elementales, en un proceso de *cocción*, permitiendo así la formación de los hidrocarburos en sus distintos estados (figura 2.4): sólido (carbón y brea), líquidos (petróleos pesados y livianos) y gaseoso (Propano, butano, etano y metano; es decir, gas natural). Los reservorios de hidrocarburos pueden caracterizarse en dos grupos principales en función del **almacenamiento** del hidrocarburo en el suelo; convencionales y no convencionales¹¹.



Figura 2.4: Proceso de formación del petróleo y gas natural¹². Fuente: IAPG

El recurso **convencional** tiene este nombre por ser el primero en explotarse, debido a que su extracción requiere menor inversión, y principalmente una tecnología más simple para desarrollar en su momento. Estas reservas se caracterizan por su fácil accesibilidad al hidrocarburo, que se encuentra en una matriz sedimentaria permeable. Si bien su origen se da en una matriz poco porosa (conocida como **roca madre**), los tiempos geológicos y muchas veces por la propia estructura de la roca, permitió que el recurso pudiese moverse hacia estratos superiores, de mayor permeabilidad, en un proceso conocido como **migración** (figura 2.4). Luego, lo que impide que el mineral aflore hacia la superficie es la existencia de sellos rocosos, que hacen que el petróleo quede confinado en lo que se conocen como **trampas geológicas** (figura 2.5).



¹¹ [El Petróleo en Neuquén: Cien Años de Historia.](#)

¹² El ABECE de los hidrocarburos en Reservorios No Convencionales, IAPG

Figura 2.5: Yacimiento Convencional. Fuente: <https://www.britannica.com/science/gas-reservoir>

Sin embargo, existen muchas reservas de hidrocarburos que no tuvieron la capacidad de migración a rocas de alta permeabilidad. Este recurso, que se encuentra confinado en rocas impermeables, recibe la denominación de **No Convencional**. Si bien hay muchos tipos de reservorios No Convencionales, en la Patagonia se identifican dos grupos principales; el *Tight*, en donde el hidrocarburo se encuentra capturado y confinado en una roca reservorio de muy poca porosidad, pero que no es la roca madre en la cual fue generado, y el recurso *Shale* (figura 2.6), en donde el mismo está entrampado en la misma roca que lo generó.

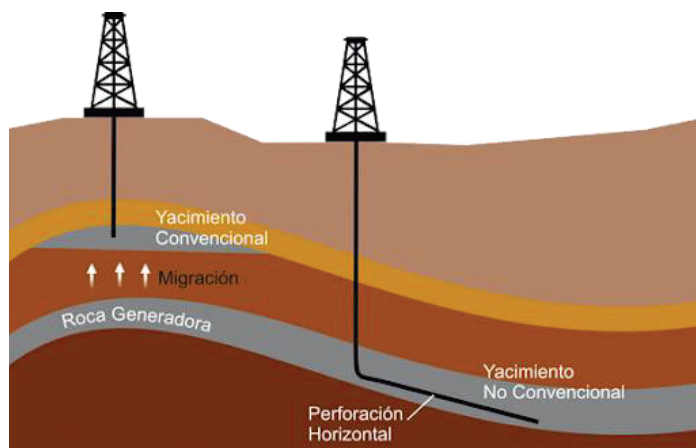


Figura 2.6: Yacimiento convencional y No Convencional (Shale). Fuente: IAPG

La condición de No Convencional hace mucho más costosa la producción de los hidrocarburos si se antepone con el caso Convencional, principalmente porque para acceder a este recurso es necesario mayor tecnología, la cual no fue desarrollada hasta finales del siglo XX. Como se explica en posteriores capítulos, la técnica consiste en fracturar la roca para lograr la surgencia de los hidrocarburos mediante la utilización de un fluido especialmente diseñado para dicha tarea (**ver apartado 2.5 [El Proceso de fractura hidráulica](#)**).

2.3. Los hidrocarburos y el agua de formación

Un error recurrente es considerar que los hidrocarburos que se encuentran en los reservorios convencionales son diferentes a los no convencionales; esto no es así, sino que su diferenciación se da únicamente por el tipo de reservorio en el cual están alojados (Roca Madre o Roca Reservorio). Sin embargo, no todos los yacimientos albergan la misma composición de hidrocarburos. El término hidrocarburo hace referencia a compuestos orgánicos conformados por carbono e hidrógeno, y generalmente se categorizan en función de dos variables; su estructura y su cantidad de carbonos.

En los reservorios generalmente se encuentra una mezcla de múltiples hidrocarburos; es por eso que la industria realiza una categorización en función de su composición media, la cual está relacionada directamente con la densidad de la mezcla (y, por consiguiente, el contenido de carbono y su estructura). A raíz de esto, el Instituto Americano del Petróleo (API por sus siglas en inglés), construyó el índice de grados API para los hidrocarburos líquidos (tabla 2.1). El mismo se calcula con la siguiente fórmula:

$$API = \frac{141,5}{GE} - 131,5 \quad \text{en donde } GE = \frac{\rho_{crudo}}{\rho_{agua}}$$

Tabla 2.1: Grados API

Tipo de Crudo	Grado API
Condensados	> 40
Livianos	30 a 39,9
Medianos	22 a 29,9
Pesados	10 a 21,9
Extra Pesados	< 9,9

Además de esta caracterización para hidrocarburos en fase líquida, los reservorios también pueden tener asociado hidrocarburos en fase gaseosa; estos son metano, etano, propano, butano, y otros de mayor cantidad de carbonos. En la práctica, la gran mayoría de reservorios tienen una porción de hidrocarburos líquidos de cierto grado API, y un contenido de gas natural asociado. Y, en todos los casos, a mayor grado API se encuentra también una mayor cantidad de gas natural.

A su vez, los hidrocarburos no son el único recurso que se extrae de los reservorios; asociado tanto a las rocas sedimentarias que alojan al recurso convencional, como a la propia roca madre en no convencional, se encuentra el **agua de formación**, o también llamada agua fósil. Como su nombre lo indica, es agua entrampada en las formaciones geológicas, que ha estado en contacto con el reservorio de hidrocarburo por un largo tiempo, entrampada en los poros de una roca durante su formación, o bien perteneciente a otra formación y migrado hacia el reservorio, que termina alcanzando un equilibrio fisicoquímico de minerales y gases disueltos, otorgándole además en la mayoría de casos una elevada salinidad¹³.

El agua de formación es un recurso muy abundante en las mayorías de yacimientos; sin embargo, su cantidad varía en función de la geología de la roca madre y la roca reservorio. En yacimientos convencionales, de alta porosidad y permeabilidad, el agua de formación suele ser abundante y tiene cierta libertad de transporte. Por otra parte, en los yacimientos no convencionales, en donde la roca madre puede tener una alta porosidad, pero no permeabilidad, el agua de formación se encuentra confinada en

¹³ IAPG (2013). Gestión del Agua en La Exploración y Explotación de Reservorios No Convencionales en el área de influencia de la Cuenca Neuquina: [PR IAPG-SC-11-2013-01](#)

pequeños poros; inclusive, existen recursos no convencionales en donde la presencia del agua de formación es muy baja (caso del *Shale Gas* del tipo “Dry”, existente en Vaca Muerta).

2.4. Un vistazo al proceso del Upstream: Exploración y Producción (E&P)

En esta sección se detallan los procesos necesarios para producir hidrocarburos (*upstream*). Cada paso contenido en E&P constituye un largo y complejo proceso, que involucra tecnología de vanguardia, enorme variedad de maquinarias, servicios y herramientas, así como el trabajo de múltiples profesionales y técnicos¹⁴. Las etapas de un yacimiento son: Prospección, Exploración, Desarrollo y Explotación, y abandono. De todas ellas, no se desarrollarán ni la prospección ni el abandono, dado que no forman parte de la problemática a abordar. Dicho esto, es posible resumir todo el proceso en una serie de puntos claves:

Proceso Exploratorio: Comenzando por un relevamiento superficial, se determina una zona candidata a contener hidrocarburos. Luego, se utilizan equipos sísmicos especializados que producen vibraciones en el suelo, las cuales se propagan en forma de ondas sonoras que recorren las capas del subsuelo. Posteriormente son recibidas por un instrumento llamado geófono, el cual interpreta las señales y realiza un “mapeo” de las formaciones subterráneas mediante algoritmos matemáticos parametrizados (figura 2.7).

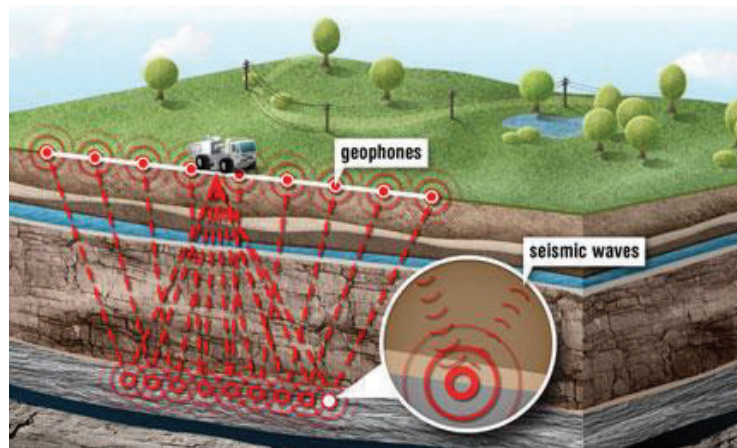


figura 2.7: representación gráfica del proceso de sísmica¹⁵

Con estos mapas, que pueden ser de dos o tres dimensiones, es donde se definen las estructuras rocosas en las que podrían encontrarse hidrocarburos, donde luego se constatan estos datos mediante pozos exploratorios.

¹⁴ El ABECE de los hidrocarburos en Reservorios No Convencionales, IAPG

¹⁵ <https://earthsky.org/earth/bob-hardage-using-seismic-technologies-in-oil-and-gas-exploration/>

Preparación de Pozos: Como primer paso se prepara una plataforma conocida en la industria como *locación* o *pad*. Para ello, debe despejarse y nivelar la zona y construir caminos por donde transitan los equipos necesarios para construir los pozos.

El componente principal de este proceso es el equipo de perforación (figura 2.8). Esta herramienta funciona mediante el giro continuo de una tubería de acero sin costura con un trépano en el extremo, que tritura la roca. A medida que gana profundidad, se agregan tramos de cañería desde la superficie.

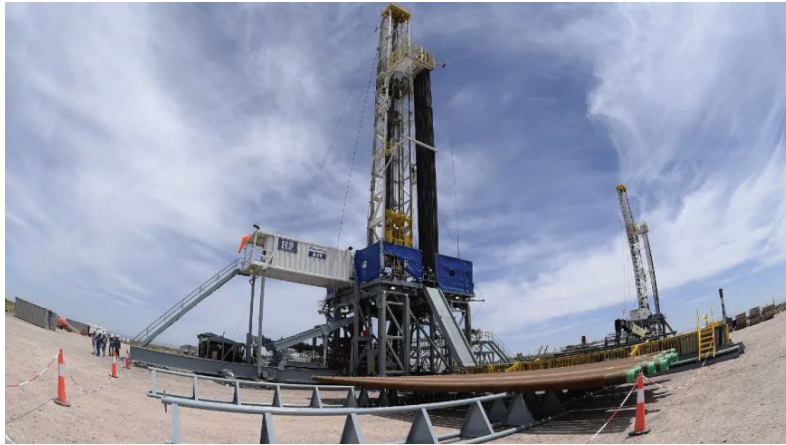


Figura 2.8: Equipo de perforación de Helmerich & Payne en Vaca Muerta¹⁶

Por el interior de la guía del trépano, circula lo que se conoce como lodo de perforación, que sale por orificios de la unidad y ablanda la roca, permitiendo su perforación. A medida que avanza el trépano, una práctica segura y requerida es el *encamisado* o *casing* con cañerías de acero, las cuales son cementadas a las paredes del pozo para asegurar tanto la integridad del pozo como su hermeticidad y, de esta forma, aislarlo de las capas atravesadas de forma tal que las aguas subterráneas quedan protegidas (figura 2.9).

Se continúa con esta operatoria hasta llegar al reservorio; en los convencionales, las perforaciones terminan una vez se pasa la trampa, dejando pozos verticales. En los no convencionales, y especialmente en shale, es común realizar una *perfilación* en profundidad a pozos horizontales, siguiendo la traza del estrato que contiene a la roca madre.

Una vez completada esta operación, por el interior del pozo se baja una herramienta que perfora la parte inferior de la tubería de acero en dirección a la formación en lo que se conoce como *punzado*. Para los tramos verticales del pozo, se utiliza la energía gravitatoria; para los horizontales, se deben utilizar bombas y agua para su desplazamiento. Gracias a esto, se conecta el pozo con el reservorio, permitiendo su fluencia a superficie.

¹⁶<https://mase.lmneuquen.com/equipos/con-15-equipos-perforacion-ypf-lidera-la-actividad-vaca-muerta-n944419>

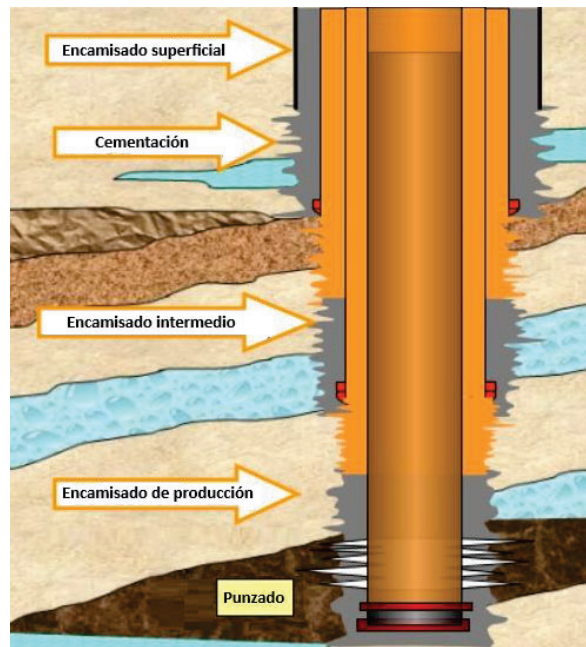


Figura 2.9: Representación gráfica del proceso de perforación, encamisado y punzado¹⁷.

Finalizado el proceso de perforación, se pasa a la etapa de terminación, la cual varía según el tipo de yacimiento. Particularmente en yacimientos no convencionales, **es necesario fracturar la roca para lograr la surgencia de los hidrocarburos (ver 2.5 [El Proceso de fractura hidráulica y el agua de flowback](#))**. Una vez se termina con este proceso, se instalan válvulas en el extremo superior de la cañería o *boca de pozo*, que permiten la operación (apertura/cierre/regulación) del pozo productor, así como su intervención de ser necesario. Por su forma y disposición, este conjunto de válvulas se conoce como *árbol de Navidad* (figura 2.10).

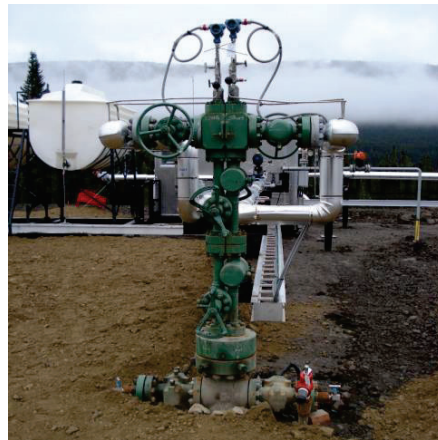


Figura 2.10: Árbol de Navidad en boca de pozo. Fuente: Wikipedia

¹⁷ <https://production-technology.org/casing-specifications/>

Posteriormente, el pozo es entregado a la operación. En esta etapa, los pasos subsiguientes son el servicio a pozo o *well-testing*, el cual consiste en realizar una apertura de línea y purga de sólidos y líquidos, para luego conectar el pozo a la planta. En esta etapa una pequeña fracción del líquido es recolectado y tratado principalmente en locación, con desarenadores y otros equipos que permiten separar los sólidos que conforman el agente sostén que puede volver en las etapas de Post-Frac, para luego ser llevado a tratamiento a una planta de aguas de producción, o bien tratadores de efluentes tercerizados. (ver apartado 2.5 [El Proceso de fractura hidráulica y el agua de flowback](#))

Plantas de tratamiento: Una vez el pozo está en producción, toda la surgencia del mismo debe ser tratada. Como se menciona en el apartado 2.2 [Convencional y No Convencional](#), el contenido del reservorio no es hidrocarburo en especificación; más bien, suele ser una mezcla heterogénea comúnmente referida como la *bruta*, conformada de hidrocarburos en estado líquido y/o sólido, y agua de producción. A su vez, los hidrocarburos pueden ser más pesados o livianos según el reservorio, pudiendo encontrarse en estado líquido o gaseoso.

Las instalaciones subsiguientes varían ampliamente según el tipo de reservorio y las cantidades a tratar de cada una de ellas. Desde el pozo hasta el gasoducto u oleoducto donde se entrega el producto al *midstream*, se pueden resumir en dos grandes grupos:

- a. Red de conducción: Lleva la *bruta* hacia los colectores de campo (*manifolds*), que pueden diferenciar la producción o bien distribuir a las siguientes unidades.
- b. Separación: La *bruta* ingresa a una unidad de separación de las fases en tres líneas de flujo diferentes; gas, crudo y agua. Este proceso es conocido como separación trifásica.

Si bien existen múltiples diseños de unidades especializadas para cada condición particular del reservorio, así como también la inversión y la tecnología disponible, todas estas utilizan como fundamento de diseño la segregación gravitacional y la polaridad de las sustancias. Los hidrocarburos son sustancias orgánicas con muy baja polaridad, por lo que rápidamente ocurre una separación con respecto del **agua de producción**, término referido para referirse a la fase acuosa de la *bruta*, que sí posee polaridad y además posee una mayor densidad (ver apartado 2.6 [El agua de producción](#)). Por otro lado, la fase líquida se separa fácilmente del gas natural por ser mucho menos densa. En la siguiente figura 2.11 se ejemplifica una unidad comúnmente utilizada en la industria llamada *Free Water Knock Out* (FWKO) o separador de agua libre, que suele operar presurizada. Su diseño permite la separación de las corrientes en diferentes líneas. Estos equipos también pueden contener un pequeño desarenador para remover restos de sólidos que puedan venir en la *bruta*.

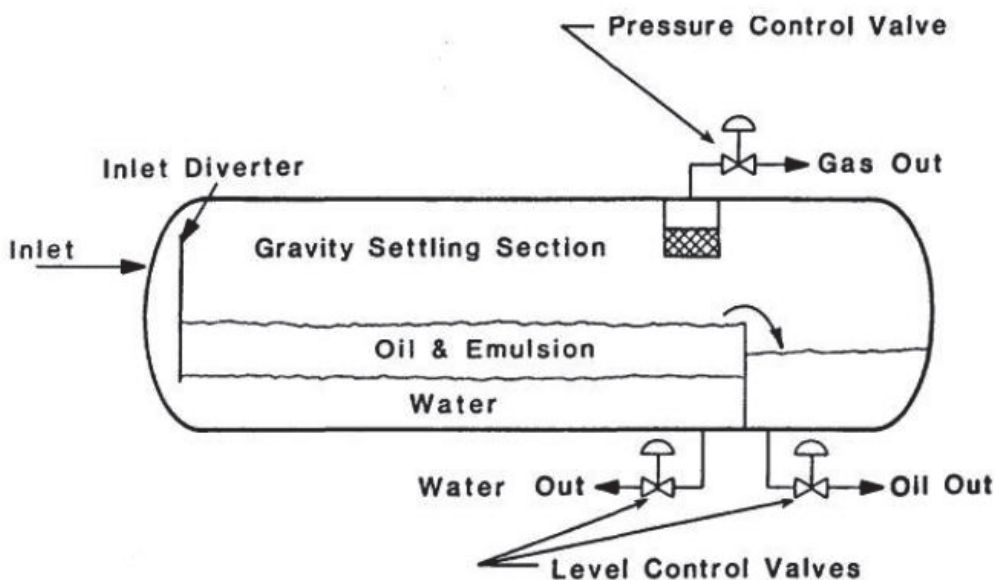


figura 2.11: Esquema de un Free Water Knock Out¹⁸

La unidad de separación primaria es considerada el ingreso a las plantas de tratamiento para las fases posteriores; sin embargo, y dependiendo de las características del reservorio, existen etapas de separación posteriores, una vez se discrimina cada corriente, para eliminar remanentes de las corrientes previas. Estos rechazos normalmente vuelven a otras unidades propias de cada tren de tratamiento.

- c. Trenes de tratamiento: Discriminadas las corrientes en gas natural, hidrocarburos líquidos y agua de producción, la central de procesamiento (**Central Process Facility o CPF**) empieza a diferenciarse en sus respectivas corrientes.

Para el tratamiento de crudo, la corriente separada normalmente presenta contenido de agua de producción, en forma de pequeñas gotas con alto contenido de sales, por lo que sigue fuera de especificación para la entrega. Por este motivo, el crudo pasa a dos unidades de tratamiento que tienen como objetivo reducir el contenido de agua y sales, utilizando técnicas de calentamiento, electrostática, y dilución con agua dulce. Las unidades utilizadas en este proceso son los deshidratadores y los desaladores. De este tratamiento, se desprende una corriente de agua residual que normalmente se mezcla con el agua de producción previo a ser tratada, por ser de características similares. Luego esta corriente pasa a un proceso de estabilización de la corriente de crudo, el cual utiliza aceite térmico como intercambiador de calor y que tiene como objetivo aumentar la temperatura del hidrocarburo, evitando la formación de hidratos que pueden obstruir

¹⁸ Extraído del [Proyecto Final de Grado: Planta de Tratamiento de Crudo \(Ciro, 2021\)](#)

tuberías y permitiendo la liberación de volátiles poco estables, los cuales se recuperan con unidades recuperadoras de vapor. Este sistema es conocido como Hot Oil, y tiene asociado un ciclo de enfriamiento mediante unidades de regeneración con Glicol Etilénico (MEG).

Por otra parte, el tratamiento de la corriente de gas natural se compone de una mezcla de metano, etano, propano y otros gases de mayor cantidad de carbonos, además de cierto contenido de vapor de agua y dióxido de carbono. Es por eso que el proceso se centra en tratar esta mezcla para ajustar el punto de rocío con el objetivo de disminuir su punto de ebullición y evitar su condensación durante el almacenamiento o transporte. Para ello, se utilizan torres deshidratadoras de intercambio gas-líquido con MEG que eliminan el contenido de agua, así como también gases refrigerantes como el propano para condensar los componentes no estabilizados en fase gaseosa. En algunos yacimientos, también es necesario la eliminación de componentes traza que suelen existir pero que no son deseados en la corriente, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), principalmente por su propiedad corrosiva y por su riesgo a la salud y al ambiente; para eliminar dicho gas, es necesaria una planta de aminas. Este componente es de vital importancia dado que, aunque también puede surgir naturalmente del pozo, también es indicador de presencia de bacterias reductoras del azufre (SRB), y es el motivo por el cual suelen instalarse dosificadores de biocidas en las líneas.

Finalmente, el **agua de producción**, y a diferencia de los otros componentes de la bruta, no tiene un valor económico (en la medida que no se utilice para recuperación secundaria), por lo que es considerado un tratamiento residual necesario para cumplir la normativa vigente de forma tal de reducir el impacto ambiental de la operación. El desarrollo y detalles de este tratamiento es contenido del presente proyecto, motivo por el cual se obvia su explicación en este apartado.

El proceso, el cual puede variar en cantidad y tamaño de unidades según las características de los hidrocarburos provenientes del pozo, y que ocurre desde la entrada hasta la venta, puede resumirse en la siguiente figura 2.12.

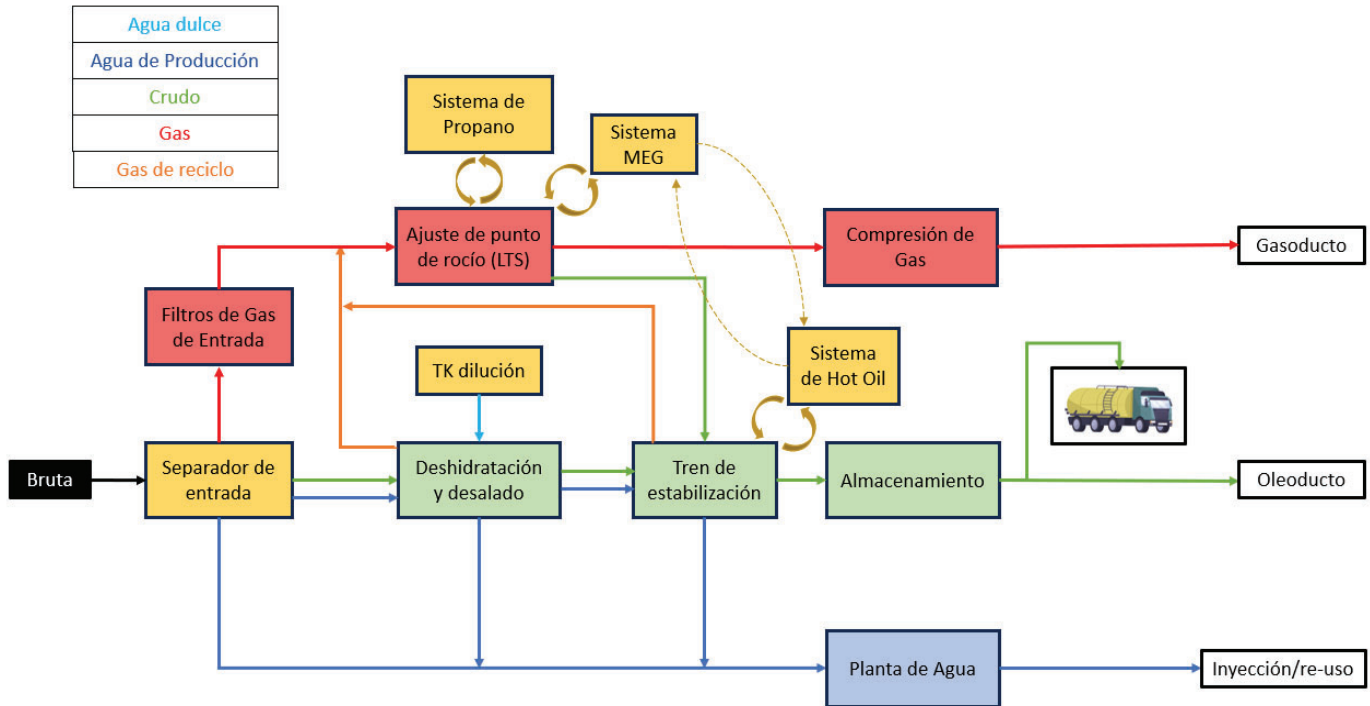


figura 2.12: Diagrama de bloques de los procesos de una CPF de producción de gas y petróleo (Central Process Facility)

Entrega: Una vez llevados a especificación, los hidrocarburos son transportados mediante ductos a los puntos de venta, compartidos con las demás operadoras del *upstream*. Para lograr esto, se poseen estaciones bombeadoras o compresoras de alta potencia, que inyectan el producto a los gasoductos u oleoductos del llamado *midstream*.

2.5. El proceso de fractura hidráulica y el agua de *flowback*

Durante los comienzos de la industria, los exploradores dirigían sus esfuerzos a localizar yacimientos de hidrocarburos en los reservorios convencionales. La existencia de los reservorios no convencionales no era desconocida por los geólogos de la época; simplemente era ignorada porque no estaba desarrollada la tecnología que permite su accesibilidad de forma económica y sustentable. La solución que halló la industria, investigada en Estados Unidos en los años 70, fue la de abrir fisuras en la formación; es decir, generar caminos preferenciales de flujo para el gas y el hidrocarburo aumentando artificialmente la permeabilidad de la roca. No fue hasta el 1995 que esta técnica se hizo económicamente viable¹⁹.

¹⁹ El ABECE de los hidrocarburos en Reservorios No Convencionales, IAPG

Para construir estas fisuras, se partió de un método ya usado en reservorios convencionales desde los años 40; las múltiples inyecciones de un fluido a gran presión que rompe la roca, primero con contenido nulo de sólidos, y luego incorporando arena como material soporte para apuntalar estas fisuras, ya abiertas. Esta metodología es llamada **estimulación hidráulica** o simplemente fractura o *fracking* (figura 2.13).

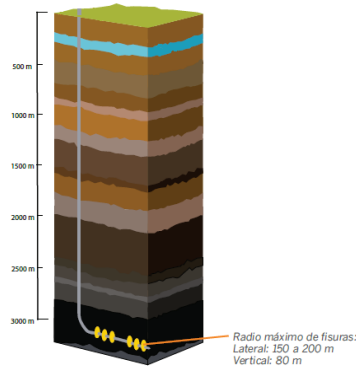


Figura 2.13: Representación gráfica del proceso de fractura hidráulica en Vaca Muerta (IAPG)

Para bombear el fluido a alta presión por más de 3.000 metros de ducto, es necesario contar con una serie de equipos especializados, que en la industria reciben el nombre de set de fractura (figura 2.14).



Figura 2.14: Set de fractura de Tenaris, trabajando en locación.

Una vez el fluido es inyectado al pozo y logra la estimulación, este puede o bien quedarse en la formación, o bien retornar. Esta **agua de retorno** es el llamado *flowback*. Según la Práctica Recomendada del IAPG²⁰, el flowback “Es el fluido que retorna, inmediatamente luego de fracturar, cuando el pozo es puesto a fluir. Está constituido por el agua inyectada más los retornos de tapones rotados, cemento, agente sostén y fluido de fractura degradado. A medida que progresa en el tiempo entra también en su constitución agua de producción, petróleo y/o gas y minerales de formación disueltos por la misma. Su volumen total siempre

²⁰ Gestión del Agua en la Exploración y Explotación de Reservorios No Convencionales en el Área de Influencia de la Cuenca Neuquina. [PR IAPG – SC – 11 – 2013 – 00](#)

será igual o menor al volumen de agua inyectado. Las características fisicoquímicas del agua de retorno se diferencian de las del agua de formación.”

Según referencias otorgadas por ingenieros de completaciones de pozos consultados en la elaboración del presente informe, estima que entre el 20 y el 60% del agua inyectada vuelve como flowback. La cantidad de agua a inyectar varía en función del pozo a ejecutar; se calculan entre 1.000 y 1.200 m³ por *etapa* de fractura, siendo un número común de etapas entre 20 y 40, pero pudiendo extenderse a más de 100 etapas en algunos pozos horizontales. Esto implica un consumo de agua que puede rondar entre los 20.000 m³ y hasta los 60.000 m³, con casos excepcionales que pueden llegar a duplicar este volumen.

2.5.1. El fluido de fractura

Además de la arena y el agua, los cuales representan el 99,5% de los constituyentes, el fluido utilizado para generar las fracturas hidráulicas contiene otros compuestos adicionales con diferentes funciones que permiten aumentar el rendimiento de las mismas.

Los fluidos de fractura utilizados actualmente son de base agua y funcionan mediante un proceso de gelificación; obtenido mediante la incorporación de polímeros y agentes de reticulación con el objetivo de formar una red tridimensional, que a su vez aumenta la viscosidad del fluido. Entre los polímeros más utilizados encontramos la goma guar, o poliacrilamidas hidrolizadas, mientras que los agentes de reticulación pueden ser en base a Boro, Titanio o Zirconio.

La viscosidad del fluido de fractura es fundamental para poder mantener al agente sostén suspendido en el líquido; de esta manera, se deposita de forma uniforme en la fractura generada, lo cual permite luego extraer el hidrocarburo. Sin embargo, un aumento de la viscosidad durante el proceso de bombeo encarecería el costo del transporte del agua. En otras palabras, para que un fluido de fractura sea eficiente, el objetivo es mantener una baja viscosidad durante la etapa de bombeo y traslado, pero que ésta aumente una vez alcanza la fractura. Esto se logra mediante la conformación de un fluido no-newtoniano, que son aquellos cuya viscosidad varía con la temperatura y/o la tensión cortante que se le aplica. Particularmente, la rama de la física que explica el comportamiento de los fluidos no newtonianos frente a tensiones cortantes es conocida como reología.

La reología de los fluidos de fractura muestra que los perfiles de viscosidad estacionaria presentan un *plateau* de alta viscosidad cuando existen bajos valores de *tasa de cizallamiento*, término referido a la magnitud de los esfuerzos de corte aplicados. Por otro lado, cuando la tasa aumenta, la viscosidad baja abruptamente, comportándose como un fluido de baja viscosidad²¹. Dicho en otras palabras, cuando el

²¹ IAPG: fluidos de fractura HVFR en Vaca Muerta: Desde el laboratorio hacia la optimización de los diseños de estimulación. Link:
<https://www.iapg.org.ar/conexplo/PENDRIVE/pdf/simposios/vaca/vacamuerta10.pdf>

fluido se expone a grandes tensiones de corte, su viscosidad es baja; cuando el esfuerzo cortante es aplicado y se produce la fractura hidráulica, los intersticios generados son ocupados en ausencia de esfuerzo cortantes, logrando una dispersión uniforme del agente sostén. Normalmente se incluyen tensioactivos que favorecen esta deposición.

Comercialmente, existen diferentes formulados para preparar dichos fluidos, siendo los tipos HVFR (High Viscosity Friction Reducers) los más probados en muchas partes del mundo y los utilizados en Vaca Muerta. Estos formulados, además del agente gelificante, incorporan biocidas y buffers para mantener el pH, y también algunos compuestos retardantes de la gelificación, dado que si el polímero se entrecruza demasiado rápido aumenta la pérdida de carga por aumento de la viscosidad. Entre ellos encontramos tres tipos: aniónicos, catiónicos y anfóteros. Cada uno de ellos tiene diferentes particularidades referidas a su dosificación y especialmente, **a la calidad del agua utilizada**.

Como generalidad, si bien existen excepciones a la regla, los reductores de fricción del tipo aniónicos son los más económicos y probados, pero requieren una mejor calidad de agua en materia de sólidos disueltos totales (SDT) y también iones polivalentes. Están basados en acrilamida, con grupos carboxilato y sulfonato. Por otro lado, los fluidos del tipo anfóteros suelen tener una mayor tolerancia a cantidades de SDT mayores. Finalmente, los reductores de fricción del tipo catiónicos son los que mejor rendimiento presentan a muy altas concentraciones de SDT; sin embargo, son los de mayor costo y complejidad de formulación^{22 23}. (Figura 2.15 - Cortesía de Halliburton).

Friction Reducing Portfolio				
	Name	Value Creation	TDS Performance	Benefits
High TDS	Excelsate LX-1	★★★★★		Highly effective FR at low concentrations offering improved cleanup and some viscosification at higher concentrations
	Excelsate LX-2	★★★★★		Mid-range TDS tolerant FR with wide compatibility range
Exceptional Performance	Excelsate LX-3	★★★★★		Reliable FR performance in mid to high-TDS produced waters
	Excelsate LX-4	★★★★★		Tunable FR for performance in extreme high TDS produced waters
	Excelsate LX-5	★★★★★		Highly effective friction reduction at a greatly reduced loading
Superior Performance	Excelsate PS-1	★★★★★		Low TDS FR offering viscosity at increased concentrations
	Excelsate PS-2	★★★★★		Low TDS FR offering improved cleanup
FR SW	Excelsate PS-3	★★★★★		Reliable FR performance in mid to high-TDS produced waters
	FightR EC-1	★★		Freshwater FR offering viscosity at increased concentrations
Performance Value	FightR EC-2	★★		Freshwater FR offering viscosity at increased concentrations
	FightR EC-3	★★		Freshwater FR offering viscosity at increased concentrations

PermVis VFR-10 FDP-S1176-15

FR-78, 88, 98

FR-76

Anf

An

Cat

An

An

Cat

An

Figura 2.15: Diferentes fluidos de fractura en el portfolio de Halliburton. Fuente: <https://www.yumpu.com/en/document/read/22149724/presentation-halliburton>

²² [Water Management for Tight and Shale Reservoir: A Review of What Has Been Learned and What Should Be Considered for Development in Argentina \(Bonapace, 2015\).](#)

²³ Entrevista con Juan Carlos Bonapace.

De esto se desprende que, para la constitución del fluido de fractura, no es válida cualquier calidad de agua; si bien hay alternativas para manejar ciertos rangos elevados de SDT, otros parámetros también afectan directamente sobre el rendimiento de los aditivos. Es por ese motivo que la gran mayoría de operadoras decide utilizar el agua dulce proveniente de cauces superficiales cercanos, en donde dichos parámetros son bajos.

Para que un fluido de fractura sea eficaz, es necesario asegurar que estos compuestos no se vean interferidos por interacciones fisicoquímicas con otros elementos que disminuyan o alteren el proceso deseado. Si bien depende del polímero y los agentes a utilizar, entre los grupos o compuestos más relevantes que pueden interaccionar con la calidad del fluido de fractura se encuentran^{24 25}.

- Bicarbonatos y carbonatos: Dificulta regular el pH de la solución y provoca retrasos en el entrecruzamiento del polímero, lo cual provoca una ralentización del proceso de fractura.
- Boratos: Si se encuentran en mayores concentraciones a las recomendadas por el fabricante, también aumenta el tiempo de formación del polímero.
- Iones monovalentes y bivalentes: las sales disueltas como cloruro de sodio causan Inhibición de la hidratación del gel por efecto de ósmosis. El Calcio y Magnesio pueden afectar la reducción de fricción que provee el formulado a concentraciones muy elevadas por sobre-entrecruzamiento. Como se mencionó anteriormente, los HVFR catiónicos y anfóteros suelen tener mayor resistencia a estos parámetros.
- Hierro (III): Relacionado con el punto anterior, los fluidos de fractura en contacto con iones de mucha carga positiva como el hierro (III), **se genera un efecto de sobre entrecruzamiento inclusive a muy bajas concentraciones**, pudiendo degradar polímeros a partir de ciertas temperaturas que suelen alcanzarse a nivel de formación. **Este efecto afecta incluso a los HVFR más tolerantes a altas salinidades.**
- Contenido Orgánico y sólidos suspendidos totales: Interfieren con el entrecruzamiento.

2.6. El agua de producción

El agua de producción es el término que se utiliza para referirse a toda el agua que proviene del pozo petrolero. En yacimientos de explotación convencional, su origen es netamente geológico y fósil (**ver 2.2 [Los hidrocarburos y el agua de formación](#)**). Sin embargo, cuando comenzaron a utilizarse los procesos de fractura hidráulica se generó un nuevo fluido, el agua de retorno o *flowback*.

²⁴ Entrevista con Juan Carlos Bonapace

²⁵ Tesis de Grado: Reutilización de Agua de Flowback en Fracturas No Convencionales (Candellero, Delgado) - Universidad del Comahue.

Una forma de diferenciar el momento en el cual el agua que surge de un pozo pasa a ser no sólo el agua de retorno, sino también agua de formación, es seguir el parámetro de concentración de iones cloruro en función del tiempo (figura 2.16). Sin embargo, y desde un punto de vista de la operación, esta diferenciación no es fácilmente identificable por análisis fisicoquímicos, **ni tampoco existe un criterio legal que identifique claramente en qué etapa del proceso de perforación se genera esta corriente.**

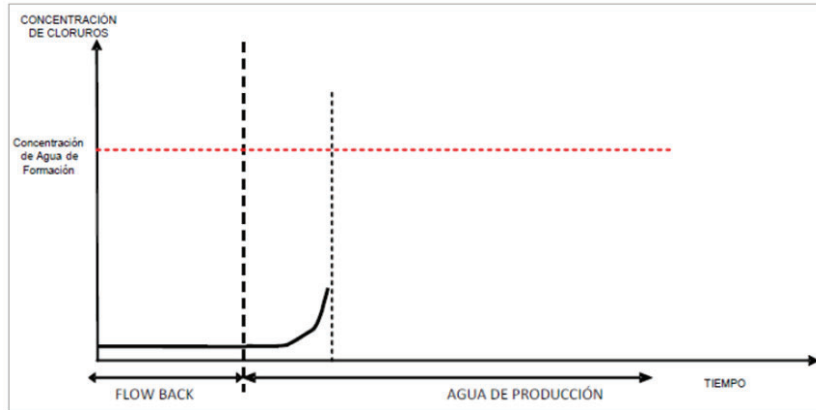


Figura 2.16: Concentración del agua proveniente de un pozo en función del tiempo. La línea punteada de corte hace referencia a la conexión del pozo al ducto de producción. Fuente IAPG.²⁶

En base a la experiencia profesional recabada para este informe, existen retornos de corrientes de agua durante todo el ciclo de vida de la preparación del pozo, el cual puede resumirse en el siguiente esquema (figura 2.17).



Figura 2.17: Ciclo de vida de la preparación de un pozo

Durante las etapas de perforación y pre-fractura, se generan retornos de base acuosa. El primero de ellos proviene del lavado de la línea una vez se termina con el proceso de cementación, así como también en el retorno del agua utilizada para trasladar el equipo de punzado sobre los tramos horizontales de un pozo. Estas dos corrientes no son flowback ni agua de producción, sino que son lodos base agua, los cuales vienen acompañados de recortes. En este caso, se debe gestionar su tratamiento mediante un tratador habilitado.

Una vez comenzada la fractura, se produce el mayor volumen de inyección de agua a pozo. Este proceso actualmente está muy estudiado y normalmente no existen retornos de agua.

²⁶ Gestión del Agua en la Exploración y Explotación de Reservorios No Convencionales en el Área de Influencia de la Cuenca Neuquina. [PR IAPG – SC – 11 – 2013 – 00](#)

El proceso de testeo de pozo o well-testing involucra la apertura inicial de la línea y su conexión con la planta central. Producto de esta maniobra de conexión (*tie-in*), pueden existir maniobras de purgado por presencia de agente sostén (sólidos) en equipos diseñados específicamente para retenerlo, conocidos como Desanders; en ellas una parte del líquido se recupera y se envía a tratamiento. Históricamente, la industria ha considerado que una parte del agua que surge del pozo en este proceso es el flowback y es una porción de esta purga, lo que se envía a tratamiento según normativa vigente. Sin embargo, los análisis fisicoquímicos de esta corriente demuestran que, muchas veces, ya posee alto contenido de sólidos disueltos totales y cloruros, por lo que no cumple con el criterio del IAPG para su diferenciación y se asociaría más al agua de formación (**ver anexo 11.1 [Análisis fisicoquímico Flowback](#)**).

Una vez que el pozo se conecta a línea, toda el agua que surge del pozo se considera agua de producción e, independientemente del origen real de esta agua (formación o fluido de fractura).

2.6.1. Características del agua de producción

Las propiedades fisicoquímicas del agua de producción varían significativamente según la ubicación geográfica, la formación geológica y el tipo de hidrocarburo que se produce²⁷. Sin embargo, siempre se encuentran las mismas familias de sustancias (figura 2.18).

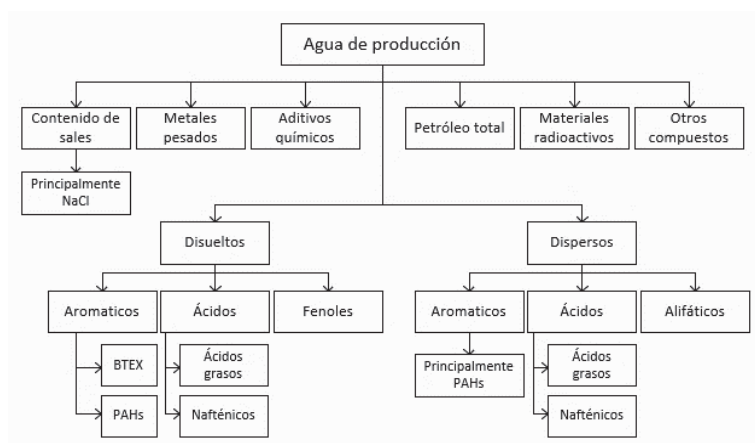


Figura 2.18: Sustancias encontradas en el agua producida

Una de las características principales es su alta salinidad medida como sólidos disueltos totales (SDT), pudiendo variar ampliamente. En regiones como la Cuenca Neuquina se encuentran aguas producidas de altos niveles de salinidad, superando los 100.000 mg/l de SDT.

²⁷ Camps, Y. (2019). *Adecuación de la Planta de Tratamiento de Agua – Yacimiento Piedra Atravesada de la Empresa Petrolia*. Proyecto Integrador Profesional. Universidad del Comahue.

Otro de los parámetros relevantes es su contenido de hidrocarburos y sólidos que vienen del pozo; si bien estos no son solubles en agua, su producción a altos niveles de presión hace que se requiera una correcta separación de ambas fases.

2.6.2. Posibilidades para el reuso de agua de producción.

Reuso para fracturas hidráulicas: Como se mencionó anteriormente en este trabajo, el enfoque más atractivo es la reutilización del agua de producción para formular fluidos de fractura, dado que es el proceso que más agua consume dentro del “*upstream*” (término referido para las actividades de exploración y producción o E&P) no convencional. Como se mencionó anteriormente (**Ver apartado [El Fluido de Fractura](#)**), existen dos alternativas posibles para utilizar agua de producción en este proceso, las cuales son:

- Diluciones parciales del agua de producción con agua dulce y utilización de HVFR del tipo aniónicos con baja o media tolerancia a sales (Gama FightR-Halliburton o similares).
- Mantener una calidad de agua con bajo contenido de hierro y turbidez, pero alta salinidad, y utilizar HVFR del tipo catiónicos u anfóteros (Gama Excelsate-Halliburton o similares).

Reuso para otras partes del proceso: Para la reutilización de aguas de bajo contenido de sales existen alternativas secundarias que están incluidas dentro del proceso y que pueden ser atractivas, aunque su uso es mucho menos intensivo:

- Generación de vapor para intercambiadores de calor de circuito cerrado para el proceso de regeneración de MEG y calentamiento del Hot Oil: Para este uso, se requiere un nivel de salinidad bajo.
- Hidratación de lodos base agua para la etapa de perforación en nuevos pozos: esta alternativa es viable inclusive con agua de alta salinidad, pero debe realizarse bajo estrictas condiciones dado que se corre riesgo de contaminar acuíferos subterráneos, y además debe considerarse el uso de ciertos aditivos como inhibidores de corrosión.

2.7. La gestión del recurso hídrico en Vaca Muerta

Desde un punto de vista global, el agua producida durante las operaciones de recuperación de petróleo y gas constituye el producto más prolífico de la industria. Cuando se comparan estas cantidades con la producción anual de petróleo y gas, se podría argumentar que el petróleo y el gas producidos se

identifican más adecuadamente como un subproducto a la producción de agua²⁸. Sin ir más lejos, el sector del gas y petróleo (O&G) es una de las 8 industrias más agua-intensivas²⁹.

La creciente explotación de hidrocarburos no convencionales ha provocado un interés sustancial en sus aspectos ambientales y una de las problemáticas mayores es la generación de grandes volúmenes de agua con propiedades fisicoquímicas que no permiten su disposición a cualquier cuerpo receptor.

Se podría resumir el ciclo del agua de uso para fracturar típico en la industria de explotación de hidrocarburos No Convencionales con cinco fases, ilustradas en la Figura 2.19:

- Adquisición del agua: el agua debe ser recogida desde una fuente importante, sea subterránea o superficial; luego se transporta hasta el sitio del pozo, en donde se instalan una serie de tanques desmontables para retener el líquido. En Vaca Muerta, el origen se da en los 3 ríos principales de la zona; El Río Neuquén, el Río Limay, y/o el Río Colorado. El transporte de esta agua de origen superficial es un elemento que hace al costo de la operación y no es menor, pudiendo ser en el mejor de los casos un bombeo de fuente cercana, o en el peor de los casos, transportado por camiones. Además, los orígenes de napas freáticas están prohibidos por normativa (**ver apartado 4. [Marco Legal](#)**), salvo aquellos con gran contenido salino.
- Preparación del fluido de fractura: Se produce la mezcla del agua con los aditivos necesarios para generar el fluido que se utiliza en la fractura hidráulica.
- Inyección a pozo productor: Se inyecta el fluido de fractura en el pozo para fracturar y generar canales de flujo preferenciales que permitan la producción del gas.
- Gestión del agua producida: Como se explicó anteriormente, se recupera agua de producción con la extracción de gas y que retorna con la línea de producción. Debido a que la gestión del recurso hídrico proveniente del pozo es una actividad económicamente deficitaria desde el punto de vista propio del ciclo del agua (no así para el conjunto de la actividad petrolera, que involucra la producción y venta de hidrocarburos) es común orientar las prácticas en función del siguiente nivel jerárquico³⁰:
 - Minimización: en no convencional, se busca reducir la cantidad de agua de fractura a utilizar.

²⁸ Argonne National Laboratory, John A. Veil, Markus G. Puder. (Ene-2004) A White paper describing produced water from production of crude oil, natural gas and coal bed methane.

²⁹ Jiménez, S., et al. (2017). *State of the art of produced water treatment*. Journal of Environmental Management, Elsevier. Disponible en ScienceDirect.

³⁰ Fakhru'l et al. (2009) Review of technologies for oil and gas produced water treatment. Revista Elsevier. Disponible en ScienceDirect

- Reciclaje/Reutilización en alguna parte del proceso productivo: Entre destinos documentados, se encuentran el uso para ciertas formulaciones de lodos de perforación y la conformación de fluidos de fractura.
- Tratamiento y disposición de agua: El agua se transporta a una instalación de tratamiento de aguas. En Vaca Muerta, el destino ampliamente mayoritario, siendo inclusive el 100% en varias plantas de producción, es **inyectarse en pozos sumideros**. Si bien en otras partes del mundo existen múltiples destinos para el agua producida, Neuquén prohíbe el vuelco en aguas superficiales, dejando como únicas alternativas de disposición el sumidero en subsuelo o riego bajo estrictas regulaciones.

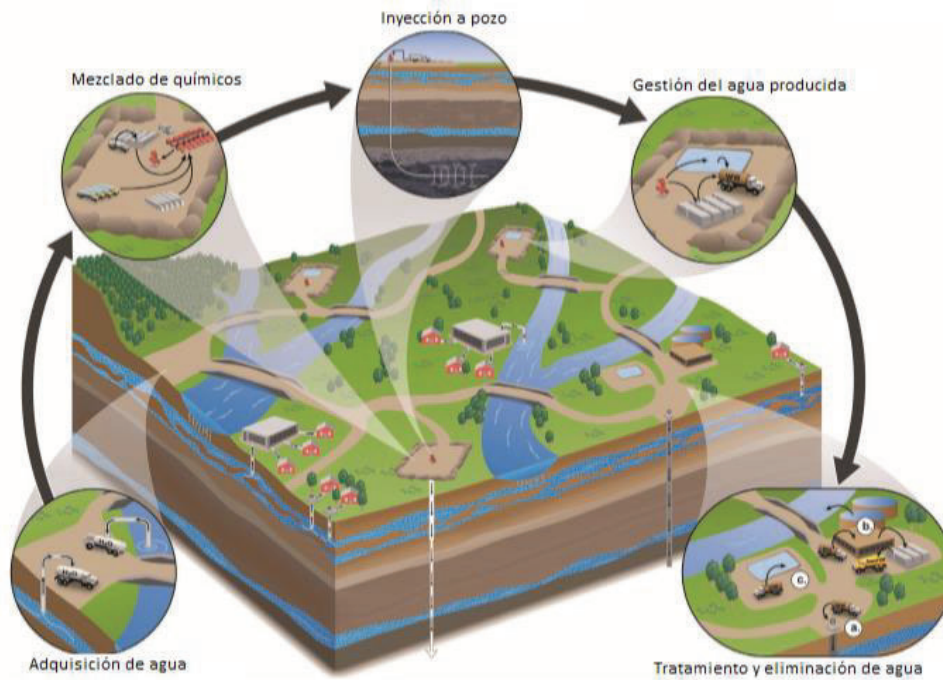


Figura 2.19 - Fases del ciclo del agua en E&P. Fuente: EPA

3. Caso de Estudio - Frac Energy

La empresa energética de nombre “Frac Energy”, centrada en proyectos de producción de hidrocarburos No Convencionales de Vaca Muerta, culminó su proceso exploratorio con resultados satisfactorios en el bloque Loma Gruesa (**37° 54’ 50” S; 69° 28’ 32” W; Figura 3.1**), de recurso “Dry gas”, habiendo realizado unos 3 pozos exploratorios (LG-XX1; LG-XX2; LG-XX3) con resultados satisfactorios.

Si bien Frac Energy tiene experiencia en actividades de exploración y producción de hidrocarburos No Convencionales, La construcción de los pozos de Loma Gruesa presentó desafíos a los que Frac Energy no estaba acostumbrada, principalmente debido a la gran distancia que existe entre la fuente de agua dulce habilitada para su operatoria, -el río Neuquén - la cual es mayor a 50 kilómetros lineales. Este es el

primer activo de la compañía que se encuentra a tales distancias, por lo que han notado que los costos de cada pozo, en su ítem relacionado con la fractura hidráulica, son sustancialmente más elevados cuando se los compara a otros yacimientos linderos a fuentes de agua. Por este motivo, buscan que sus proyectos hídricos, especialmente en el marco de la gestión del agua producida, consideren alternativas de reuso de dicha corriente.

Al pertenecer a un yacimiento principalmente gasífero, la producción de hidrocarburos líquidos es muy baja en cantidad y además presenta un grado API muy alto (50°) tratándose de un crudo liviano asimilable a una *gasolina*. La densidad ronda los 0,78 g/cm3 (Ver [Los hidrocarburos y el agua de formación](#)) motivo por el cual flota rápidamente en agua y sus emulsiones, si bien no son tan estables, son de pequeño diámetro.

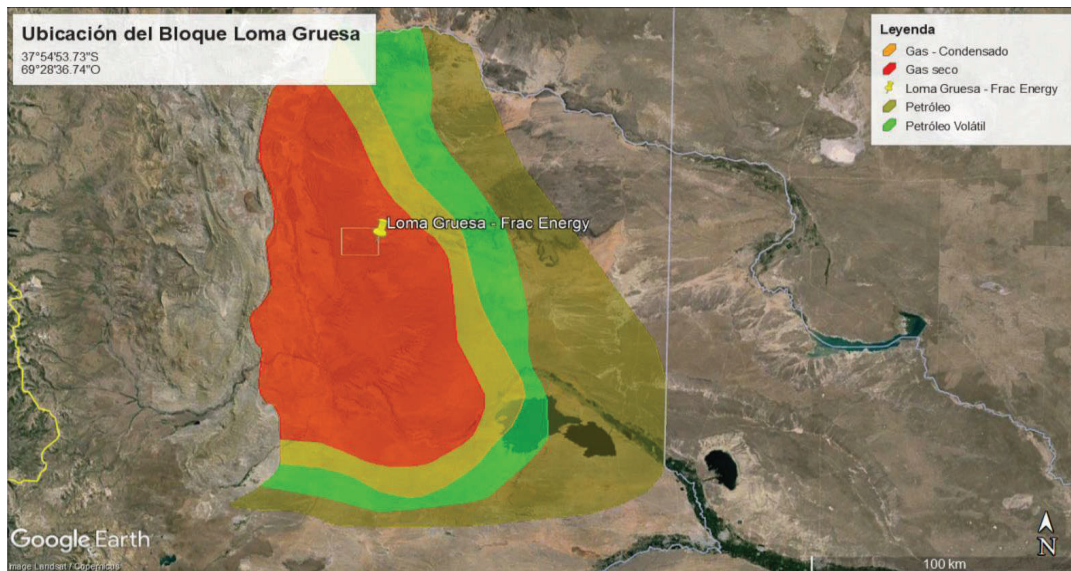


Figura 3.1: localización geográfica del bloque Loma Gruesa – Frac Energy

Actualmente opera una planta provisoria (*Early Process Facility o EPF*) para toda su producción, con una capacidad de procesamiento total de 0,5 Millones de metros cúbicos (Mm3) de gas natural diarios, pero prevé escalar su producción a un total de 5 Mm3 mediante la incorporación de un plan de desarrollo del bloque que considera más de 100 pozos a lo largo de todo su ciclo de vida, de 30 años, y la construcción de una Planta Central de Procesamiento (*Central Process Facility o CPF en inglés*) y ampliación de su campamento. Cabe destacar que la empresa declaró que continuará perforando pozos en la medida que los más viejos comiencen a declinar en producción, con el objetivo de mantenerse al máximo de la capacidad de procesamiento de la planta durante todo el ciclo de vida del proyecto.

Se realizó un monitoreo continuo de los pozos durante un mes para determinar el dato de generación del efluente (agua de producción) en función de la producción de gas (figura 3.2). Actualmente, dado que solo

se encuentran 3 pozos en producción, todos los líquidos son evacuados mediante camiones cisterna de forma diaria.

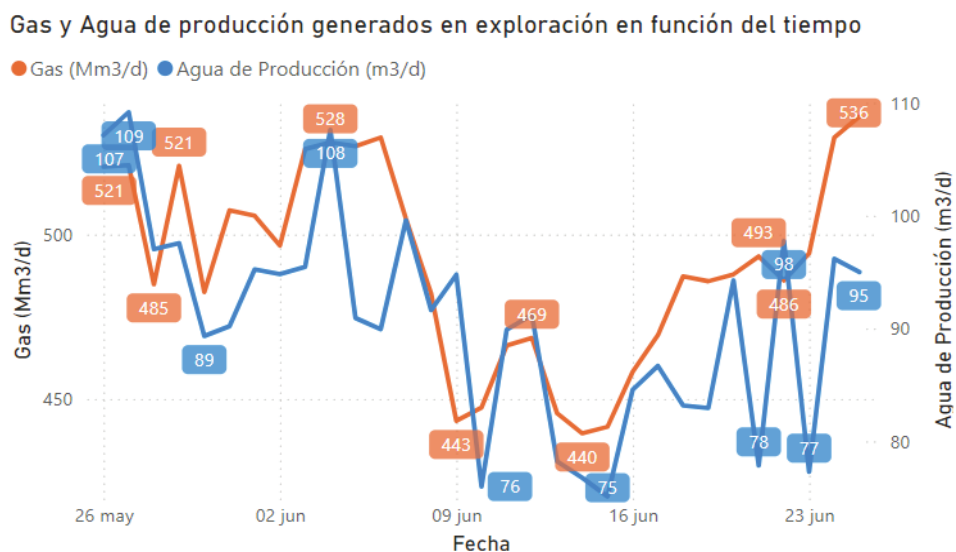


Figura 3.2: Gas y Agua de producción generados por los pozos exploratorios LG-XX1, LG-XX2 y LG-XX3

En base a esta caracterización, se estima la producción de gas, crudo, agua de producción que proviene de la línea productiva y dato de generación con sus respectivos errores una vez ejecutado proyecto (tabla 3.1).

Tabla 3.1: datos estimados de producción del yacimiento Loma Gruesa - FracEnergy

Gas (Mm ³ /d)	4909	± 198,4
Oil (m ³ /d)	298	± 6,2
Agua Prod. (m ³ /d)	920	± 28,8
Actividad A/G (m ³ /Mm ³)	188	± 5,6

Para suplir la demanda de trabajo que insume el proyecto de ampliación, el mismo prevé la incorporación de nuevo personal de planta permanente, así como también personal que estaría trabajando únicamente durante las horas del día (tabla 3.2). Esto implica la construcción de un campamento y redes de agua potable y colectoras de aguas residuales, las cuales están a cargo de la constructora designada para las obras civiles.

Tabla 3.2: Dotación de personal estimada para el mantenimiento de la operación.

Período	Personal diurno	Personal nocturno
Lunes - Viernes	240	120
Sábado - Domingo	120	60

3.1. Caracterización del agua de producción de Loma Gruesa

Para el presente proyecto, se realizó una caracterización fisicoquímica del agua de producción (tabla 3.3), con tres mediciones (02/12/2022; 28/03/2023; 26/02/2024) por triplicado y por pozo, dando un total de 27 muestras. Estas son caracterizaciones que se obtienen posterior al tratamiento provisto por al menos un separador trifásico previo, y el uso de desarenadores.

Tabla 3.3: Parámetros de calidad de agua de producción en base a los resultados de las mediciones de los pozos LG-XX1, XX2 y XX3. Se enlistan los parámetros de calidad de agua recomendados por el IAPG para los HVFR aniónicos, predominantes en el mercado (en gris), y los parámetros de inyección requeridos (en celeste). Se identifica en código de colores como Verde: Óptimo, Amarillo: Desvío, Naranja: Desvío (más del doble).

Parámetro (mg/l)	Inyección	Guía Fractura	Min	Promedio	Max	Error (99%)
pH	-	6-8	5,6	6	6,8	0,2
SDT	-	<50.000	51.100	120.000	143.200	23.000
SST	-	<50	50	160	290	60
Cloruro	-	<30.000	25.900	79.400	104.000	17.000
Sulfato	-	<500	1	30	270	20
Carbonato	-	<600	0,1	0,3	1	0,2
Bicarbonato	-	<600	80	150	330	70
Alcalinidad	-	-	85	90	400	57
Dureza Total	-	<15000	24.100	63.400	228.000	38.200
Calcio	-	50-250	6.900	21.300	36.100	7.200
Magnesio	-	10-100	360	1.200	2.400	550
Hierro Total	-	1-20	2	83	140	50
Hierro ferroso	-	-	1	62	90	25
Hierro férrico	-	-	1	21	50	15
Potasio	-	100-500	500	1200	2200	430
Sodio	-	2000-5000	8.600	20.700	30.000	4.700
Boro	-	1-20	1,0	30	60	10
DBO	-	-	5	40	110	50
DQO	-	-	20	550	2775	1000
Hidrocarburos Totales	320	-	10	660	3330	250
Amonio	-	-	1	270	670	170
Densidad	1,15	-	1,06	1,10	1,12	0,02
Cromo Total	-	-	5,00E-02	1,47E-01	2,80E-01	6,25E-02
Cromo hexavalente	2,00E-03	-	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	4,42E-19
Fenoles	4,50E-01	-	1,00E-02	9,27E-02	2,16E-01	5,55E-02
Arsénico	1,00E-02	-	5,00E-03	1,30E-01	3,00E-01	8,86E-02
Plomo	1,00E-02	-	5,00E-02	1,92E-01	4,00E-01	1,03E-01
Mercurio	1,00E-03	-	1,00E-03	1,84E-03	5,00E-03	1,28E-03
Cadmio	3,00E-03	-	1,00E-02	2,26E-02	5,00E-02	1,12E-02
Cianuro	1,00E-02	-	1,00E-03	2,42E-03	1,00E-02	2,95E-03

Adicionalmente, FracEnergy facilitó estudios fisicoquímicos del agua de *flowback*. Los resultados de los análisis están disponibles en el [Anexo 11.1](#); como puede observarse, las características fisicoquímicas son similares a las del agua de producción. Independientemente de esto, dado que es requisito pedido por la autoridad el tratamiento del agua de flowback mediante servicio habilitado, el objetivo de la empresa es inscribirse como tratador y proporcionar un tratamiento para evitar la contratación de un servicio tercerizado que retirase el efluente por camiones.

Por otro lado, el requerimiento de la provincia para parámetros de vuelco es definido directamente por la autoridad de aplicación, siendo este caso la Secretaría de Ambiente de la provincia de Neuquén y dependiente del Ministerio de Energía y Recursos Naturales.

Cabe destacar que, actualmente, no existen parámetros guía para la inyección en pozos sumideros (**ver apartado 2.7 [La gestión del recurso hídrico en Vaca Muerta](#) y apartado 4 [Marco Legal](#)**). Para todos los casos, los parámetros a cumplir son informados por autoridad de aplicación a la operadora, la cual debe declarar el pozo inyector a utilizar y la formación destino. En el caso de la región cuenca neuquina, el estrato el cual está autorizado como sumidero para el agua de flowback y producción es llamada Centenario³¹. Para este caso particular, se toman los informados en la tabla 3.3.

3.2. Caracterización del agua residual de campamento

El agua residual del campamento se trata de un efluente cloacal que proviene de la propia actividad humana, así como también de los baños comunes y el comedor diario y nocturno. Debido a que el proponente del proyecto no posee datos propios de ningún tipo, se modelará la condición de operación en base a bibliografía; si bien esto no es lo ideal, esta clase de efluentes han sido ampliamente estudiados y son bien conocidos. En este presente trabajo, se utilizará como fuente primaria de información el libro Metcalf y Eddy, en su 4ta edición de 2004.

Como primera caracterización, se toman como punto de referencia los parámetros fisicoquímicos de un efluente cloacal tipo, considerando una DBO mayor a la bibliográfica por recomendación de FracEnergy, dado que se ha observado esta situación en otras operaciones (tabla 3.4).

³¹ La última escala de los residuos: los 57 pozos sumideros en Vaca Muerta <https://gapp-oil.com.ar/2020/01/28/la-ultima-escala-de-los-residuos-los-57-pozos-sumideros-en-vaca-muerta/>

Tabla 3.4: Parámetros fisicoquímicos del efluente cloacal. Fuente: Metcalf y Eddy / elaboración propia (2005)

Contaminante	Unidad	Promedio
Sólidos Totales (ST)	mg/L	720
Sólidos Disueltos (SDT)	mg/L	500
Sólidos Suspendidos (SST)	mg/L	210
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	450
Carbono orgánico Total	mg/L	140
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	900
Nitrógeno total (Nt)	mg/L	40
Nitrógeno Orgánico	mg/L	15
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	25
Fósforo total (Pt)	mg/L	7
Coliformes Totales	NMP/100ml	1,00E+08
Coliformes Fecales	NMP/100ml	1,00E+06

Continuando con la modelación, se requiere cuantificar la cantidad de efluente a tratar. En base a la tabla 3.2, y asumiendo una dotación de agua de 230 Litros por persona y día (Metcalf y Eddy 1995, dotación típica de campamento con cocina) y el personal de permanencia esperado por el proyecto, se realiza una primera estimación del caudal del efluente de campamento asumiendo una tasa de retorno del 80% (Ec. 3.1) Los resultados se presentan en formato ecuación y en la tabla 3.5.

$$Q = 230 \frac{l}{op.d} \cdot N^{\circ}op \cdot 80\% \quad (Ec. 3.1)$$

$$Q_{l-v \text{ diurno}} = 230 \frac{l}{op.d} \cdot 240 \cdot 80\% = 1,84 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_{l-v \text{ nocturno}} = 230 \frac{l}{op.d} \cdot 120 \cdot 80\% = 0,92 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_{s-d \text{ diurno}} = 230 \frac{l}{op.d} \cdot 120 \cdot 80\% = 0,92 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_{s-d \text{ nocturno}} = 230 \frac{l}{op.d} \cdot 60 \cdot 80\% = 0,46 \frac{m^3}{d}$$

Tabla 3.5: Caudal de generación medio estimado en base a la dotación estimada del campamento. Los datos están provistos en metros cúbicos por hora (m^3/h).

	Personal diurno	Personal nocturno
Lunes - Viernes	1,84	0,92
Sábado - Domingo	0,92	0,46

Ya estimados los caudales de generación medios en las respectivas franjas horarias delimitadas del proyecto, el siguiente paso consiste en modelar el flujo horario, el cual depende de las actividades diarias

que se realizan en el yacimiento. Para esta condición, se toma una aproximación horaria por bibliografía, la cual modula la generación del efluente (*figura 3.4*).

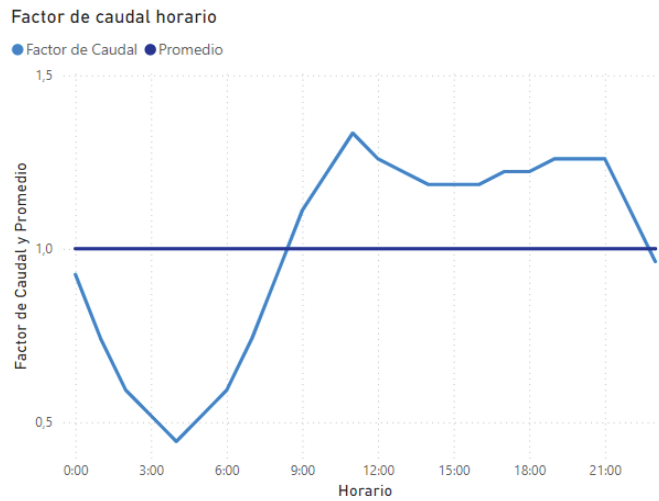


Figura 3.4: Factor de caudal horario. Gráfico construido en base a Metcalf y Eddy

Finalmente, aplicando la modulación por el factor de generación típico y considerando las dotaciones en las distintas franjas horarias, se estiman los caudales de generación durante los días de semana y durante los fines de semana (*figura 3.5*).

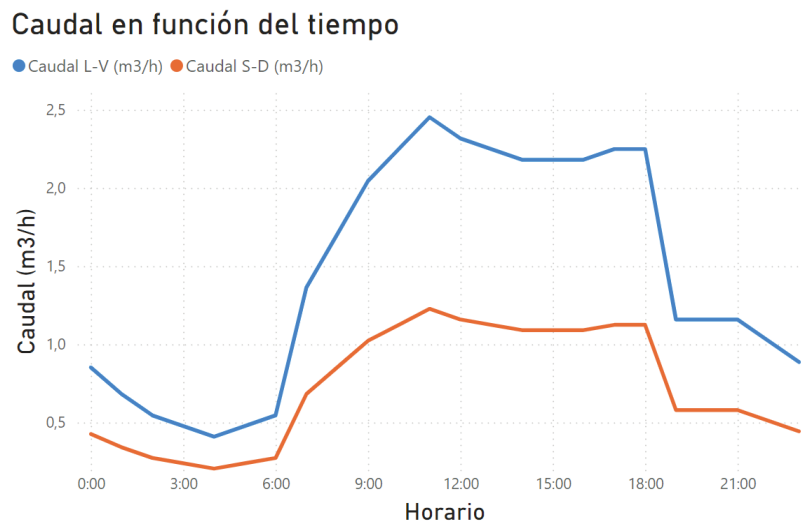


Figura 3.5: Caudales horarios aproximados. L-V corresponde lunes a viernes (Celeste) y S-D corresponde sábado a domingo (naranja).

4. Marco Legal

En el presente apartado se incluirán únicamente las principales normativas que condicionan a la implementación del proyecto.

4.1. República Argentina

- Resolución SEN 105/92: Establece las normas y procedimientos para la protección del medio ambiente durante la exploración y explotación de hidrocarburos.
- Ley Nacional N.º 24.051: reglamentada mediante Decreto N.º 831/1993: Ley de residuos peligrosos. Regula la generación, manipulación, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos.
- Resolución 252/93: Guías y recomendaciones para la ejecución de los estudios Ambientales y Monitoreo de Obras y tareas exigidas por la Res. SE 105/92.
- Ley N.º 25.675/2002: Denominada “Ley General del Ambiente” que establece los presupuestos mínimos para una gestión sustentable y adecuada del ambiente.
- Ley N.º 25.688/2002: Establece el “Régimen de Gestión Ambiental de Aguas” que consagra los presupuestos mínimos ambientales para la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional. **Se crean los comités de cuencas hídricas para cuencas interjurisdiccionales.**
- Resolución SEN 25/04: Normas de presentación de estudios ambientales.
- Resolución SEN 785/05: **Control de pérdidas en tanques aéreos de almacenamiento de hidrocarburos y sus derivados.**

4.2. Provincia de Neuquén

- Ley N°899/75 Código de Aguas: Establece el régimen de aguas superficiales y subterráneas para la Provincia de Neuquén, regulando usos y aprovechamientos del recurso, comunes y privativos o especiales, obras hidráulicas, etc.
- Decreto N.º 2756/83: Reglamenta el uso de aguas públicas.
- Disposición N.º 312/05: Disposición final de los efluentes cloacales en los campamentos instalados con motivo del desarrollo de las actividades hidrocarburíferas. **Indica que todas las empresas operadoras y de servicios deberán contar, para el tratamiento de las aguas grises y negras generadas en los campamentos organizados como consecuencia de la exploración y explotación de la actividad que desarrollan, con**

sistemas sépticos adecuados, tales como plantas móviles compactas de tratamiento de efluentes o sistemas de mayor eficiencia.

- Decreto 1483/12: Fija las condiciones que deberán cumplimentar las empresas en relación con el origen y uso de agua en las operaciones de “*shale*”, estableciendo la prohibición de utilizar aguas de napas freáticas, excepto aquellas que presenten altos grados de salinidad, que las conviertan en inutilizables para cualquier uso humano o de riego. **Prohíbe el vertido de agua de producción a cuerpos de agua superficiales, su almacenamiento a cielo abierto en etapas previas y durante su tratamiento, y establece que debe ser tratada para su disposición en pozos sumideros, reutilización en el ciclo productivo o para riego de un área previa autorización. La calidad del agua a alcanzar para inyección a pozo sumidero dependerá de la habilitación de la subsecretaría de ambiente de la provincia de Neuquén. También exige la presentación de un análisis fisicoquímico del agua de flowback en un período de 72 hs posterior a su generación en pozo.**
- Disposición N° 29/2012: adopción y ampliación de la Práctica Recomendada (PR) de “Aseguramiento y control de barreras de aislación en pozos inyectores” del IAPG. **La misma establece pautas de verificación de la integridad de las cañerías, monitoreo en el tiempo y plan de intervenciones en caso de anomalías, con el objetivo de proteger acuíferos de agua dulce.**

4.3. Otras jurisdicciones

- **Resolución N°336/2003 - Provincia de Buenos Aires:** Provee parámetros guía de calidad de agua para su vuelco en suelos; si bien es de otro estado provincial, Neuquén adopta dicha resolución para el riego de caminos.

5. Proyecto: Planta de Agua de Producción

En este apartado, se comienza con una breve descripción del estado del arte en lo que respecta a las opciones posibles de tratamiento del agua de producción proveniente de los pozos teniendo en cuenta múltiples recomendaciones bibliográficas existentes y también en base a la experiencia profesional de otros yacimientos que opera la empresa FracEnergy. Luego continuará con una descripción de las alternativas planteadas para cada etapa del tratamiento y su respectiva evaluación y elección en base a diferentes criterios. Finalmente, se plantea la memoria descriptiva y memoria de cálculo de la alternativa más atractiva.

5.1. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto está acotado a todos los líquidos que ingresan por la línea de producción; particularmente desde los diferentes separadores trifásico de entrada ([ver figura 2.9](#)) y unidades posteriores en la planta central (CPF). Esto quiere decir que todos los equipos que son propios de las locaciones, como los desarenadores, no son contemplados en el diseño ya que son etapas previas del proceso. Por otra parte, tampoco se contempla el sistema de drenaje de la planta, el cual recolecta las purgas de los equipos principales en múltiples tipos de cámaras y luego son enviados a la primera unidad del presente diseño por la línea principal.

En base al diagnóstico inicial de la calidad fisicoquímica del agua de producción, así como también los requerimientos necesarios para poder inyectarla a la formación, se propone un diseño que permita por un lado remover los hidrocarburos y sólidos remanentes y, por el otro, remover metales pesados que pueden estar presentes en el efluente.

5.2. Estado del arte

La mayoría del agua de producción generada a lo largo del mundo en facilidades del *on-shore* es reinyectada al suelo, ya sea para disposición en una formación sumidero, o para el proceso de recuperación secundaria, el cual se utiliza en campos convencionales y permeables con el objetivo de barrer el hidrocarburo remanente en formación que no ha surgido naturalmente. Como el destino final determina la extensión y el tipo de tratamiento, la mayoría de las plantas de tratamiento de agua de producción son diseñadas principalmente para remover gas e hidrocarburos dispersos y los sólidos suspendidos para evitar taponamientos y daño en los equipos de bombeo³² siendo estos los dos

³² Jiménez, S., et al. (2017). *State of the art of produced water treatment*. Journal of Environmental Management, Elsevier. Disponible en ScienceDirect.

requisitos mínimos (pero no siempre suficientes) a cumplir para el destino más utilizado, que es la inyección. En el *off-shore*, por otra parte, como el destino final suele ser el mar, el objetivo principal del tratamiento es reducir el contenido de hidrocarburos para mitigar los impactos tóxicos en flora y fauna acuática.

Más allá de qué existen muchas operaciones unitarias que pueden incluirse en diferentes etapas del proceso y que su incorporación varía en función de la calidad de agua buscada, en general el tratamiento de aguas de producción se dividen en dos grandes grupos: los tratamientos convencionales, los cuales son mínimamente requeridos para inyección a sumidero, y los tratamientos complementarios, que requieren un tratamiento convencional inicial y permiten lograr reducir otras fracciones y que en algunas situaciones particulares podrían ser necesarias. Cada uno de ellos tiene su universo de tecnologías disponibles, muchas de las cuales aplicadas en el orden correcto pueden tratar más de un parámetro del agua de producción. En la siguiente Figura 5.1 se muestra el universo de soluciones existentes según la bibliografía³³.

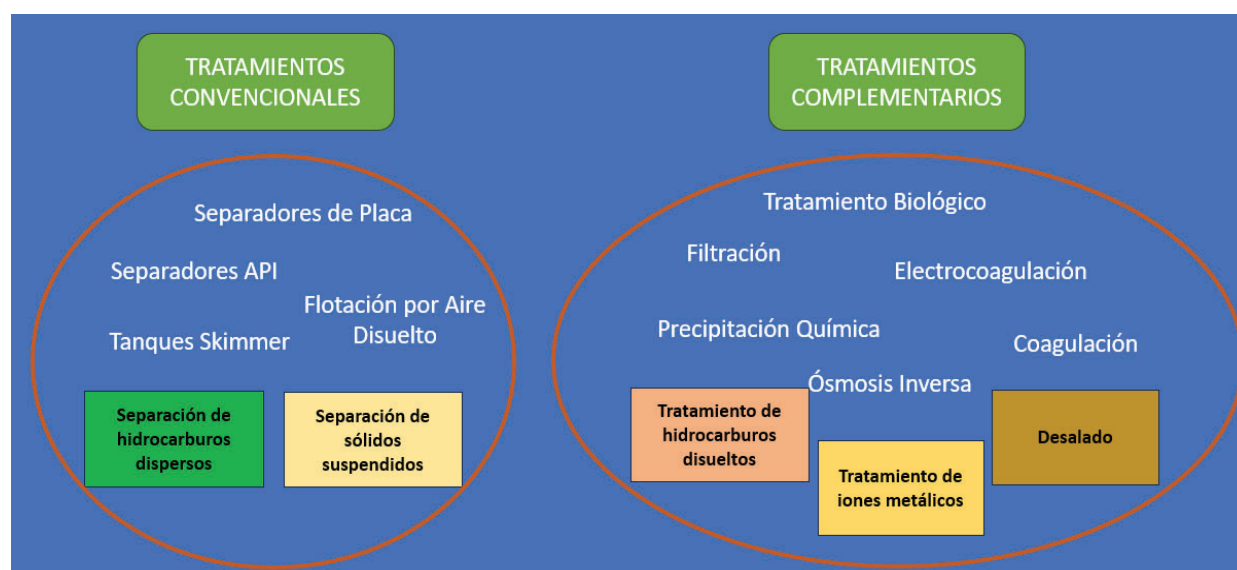


Figura 5.1: Alternativas de tratamientos convencionales y complementarios (palabras en blanco) para los procesos unitarios (en cuadrados). Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. Tratamientos Convencionales

Un tratamiento convencional tiene el objetivo de remover grandes gotas de crudo, partículas de gran velocidad de decantación, y la eliminación del gas natural disuelto mediante un fenómeno conocido en la jerga como *flasheo*, el cual consiste en la insolubilización del gas producto de una baja de presión

³³ Fakhru'l et al. (2009) Review of technologies for oil and gas produced water treatment. Revista Elsevier. Disponible en ScienceDirect

(equivalente abrir una gaseosa). Además, dado que es requerido para aumentar la eficiencia de los tratamientos posteriores, también tiene el objetivo de normalizar el caudal.

En la primera etapa del tratamiento se utilizan separadores del tipo agua-aceite, que funcionan bajo el fundamento de la Ley de Stokes. El agua se mueve de forma gradual y los hidrocarburos se separan por flotación, mientras que los sólidos sedimentan al fondo y son luego barridos. En la industria hidrocarburífera, este proceso generalmente se logra por medio de tanques *pulmón* o ecualizadores los cuales son efectivos en el proceso de *flasheo* por estar prácticamente a presión atmosférica, y también para remover todos los hidrocarburos que flotan fácilmente; en el caso de requerir la remoción de partículas más finas, lo cual se da naturalmente, se pueden utilizar tanques con equipamientos de *skimmeo* o separadores de placa tipo API o de placa corrugada³⁴.

El flujo continúa normalmente a dos posibles destinos: si el sistema de separación de hidrocarburos en los tanques fue eficiente, y la calidad del agua es suficientemente buena, el flujo puede derivarse directamente a un tanque de inyección, el cual funciona únicamente para retener el líquido remanente a ser devuelto a formación, y en donde también suelen instalarse dosificadores de anti-incrustantes e inhibidores de bacterias. Sin embargo, si el mismo presenta un contenido de hidrocarburos remanente más elevado de lo permitido, o requiere tratamientos de mayor complejidad por contenido de metales elevados, son enviados a procesos de tratamientos complementarios que permitan corregir el desvío y de esta forma derivar nuevamente al tanque de inyección.

En general, la combinación de estas tecnologías de tratamiento convencional no permite la producción de un efluente que sea compatible con estándares de irrigación o procesos industriales³⁵.

5.2.1.1. Tanques API 650 (Ecualizador y Skimmer)

La metodología estándar de diseño de los tanques de la industria petrolera y petroquímica es provista por la Norma N°650 de la American Petroleum Institute (API 650). Bajo esta filosofía de diseño se construyen tanques de almacenamiento, de trasvase y separación, y de ecualización.

Independientemente de sus aspectos constructivos, el volumen de estas unidades está determinado por la operatoria que se le va a dar. Si es de homogeneización, deberá considerar las variaciones de caudal en el ingreso; si es de separación de hidrocarburos, generalmente se adopta un tiempo de residencia definido, asumiendo que los caudales de ingreso y egreso son constantes.

³⁴ Mohammad at. Al. (2019) Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. Revista Elsevier, Disponible en ScienceDirect.

³⁵ Jiménez, S., et al. (2017). *State of the art of produced water treatment*. Journal of Environmental Management, Elsevier. Disponible en ScienceDirect

La ecualización que se ve en tratamientos de efluentes de otras industrias, inclusive en refinerías, suelen incorporar en sus diseños difusores de burbuja gruesa en el fondo del tanque con el objetivo de evitar la sedimentación de sólidos, lograr homogeneidad, prevenir olores por condiciones anaeróbicas, y oxigenar levemente el efluente para etapas posteriores del tratamiento. En el caso de las plantas de agua de producción, aunque si bien esto depende de las particularidades de la disposición final que esté definida por la autoridad legal, el burbujeo no es una práctica utilizada en la ecualización; normalmente estos no presentan mezcla interna porque de esta forma incrementa la eficiencia de separación de hidrocarburos por inmiscibilidad y diferencia de densidades. Es por este motivo que, pese a que la ecualización no es considerada un tratamiento en sí mismo, para el caso del upstream del petróleo y gas sí contribuye a la separación de hidrocarburos. Con este concepto, estos tanques incorporan unidades de remoción de hidrocarburos por flotantes, actividad conocida como desnatado o *skimmeo*; es decir, **funcionan como unidades de flotación** (figura 5.2).



Figura 5.2: Unidad flotadora skimmer. Fuente: Vikoma International Ltd

En general, estos tanques cuentan con la cualidad de funcionar con un alto grado de hermeticidad y una leve presión positiva (-2,5 a 7,5 mbar)³⁶ dentro del tanque, que se logra mediante la inyección de un gas inerte como nitrógeno o incluso gas natural. Este proceso es conocido como *blanketing* y tiene varias razones:

- Manejo seguro: Los tanques de recepción de agua producida contienen hidrocarburos inflamables, que al encontrarse con oxígeno y en presencia de chispas por fricción, incrementa el riesgo de explosión. Mediante la incorporación de un gas inerte, permite operar en condiciones más seguras debido a que desplaza el oxígeno.
- Evitar contaminación por aire atmosférico: el gas desplaza el aire del ambiente, que puede contener polvo y microorganismos.
- Reducir la corrosión del tanque: el ingreso de oxígeno acelera la corrosión interna.
- Prevenir formación de microorganismos.

³⁶ Improve selection and sizing of storage tanks - Guideline (Heydari Gorgi A, Octubre 2006)

En la siguiente figura 5.3, se puede observar un ejemplo gráfico de un tanque ecualizador con sistema de inertizado o blanketing.

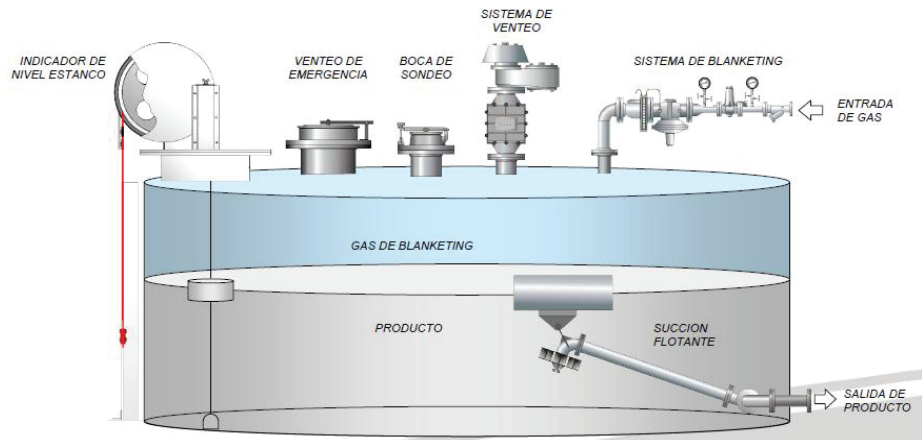


Figura 5.3: Tanque ecualizador con sistema de blanketing. Fuente: Pefow Equipamientos S.A.

Si bien esto depende de los tratamientos posteriores, para la mayoría de implementaciones en la Región Cuenca Neuquina y Vaca Muerta o bien la Base Premian en Texas se realizan diseños como los descritos anteriormente.

Para el diseño de estos ecualizadores, la industria hidrocarburífera utiliza el mismo estándar de diseño que el de los tanques de almacenamiento de combustible, siendo este el de la American Petroleum Institute 650³⁷. Este estándar define cuestiones como el grosor necesario de las paredes del tanque, las soldaduras utilizadas, el tipo de material, entre otros.

Estas unidades se encuentran en la gran mayoría de las plantas de tratamiento de aguas con grandes caudales, como los que se encuentran en un yacimiento. Según Wesley-Eckenfelder, su eficiencia de remoción es ampliamente variable según las características del crudo encontrado, pudiendo encontrarse entre el 54 y el 82% ³⁸.

5.2.1.2. Separadores API 421

Los separadores API diseñados bajo el estándar 421, al igual que los tanques API, cumplen la función de separar los hidrocarburos por flotación. Estos son proyectados para un diseño con flujo laminar y se basa en establecer un tiempo de retención necesario para remover las gotas de hidrocarburos por flotación y los sólidos pesados, si los hubiese, por decantación. En general, han sido diseñados para separar todas las gotas de hidrocarburos mayores a 15 μm .

³⁷ <https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/standard650>

³⁸ Wesley-Eckenfelder (1997) – *Industrial Water Pollution Control* - Table 3.10 (p. 106) Typical Efficiencies of oil separation units.

Para la separación de hidrocarburos livianos se utilizan skimmers, que recolectan y devuelven lo separado al tanque de ingreso de la planta de tratamiento de crudo. Por otro lado, para prevenir que el hidrocarburo continúe en etapas posteriores, se emplean placas deflectoras. Según bibliografía³⁹, la eficiencia de remoción de hidrocarburos se encuentra entre un 55 y un 87%, mientras que a su vez logra separar entre el 10 y el 50% de los sólidos suspendidos que puedan tenerse en esta etapa del proceso.

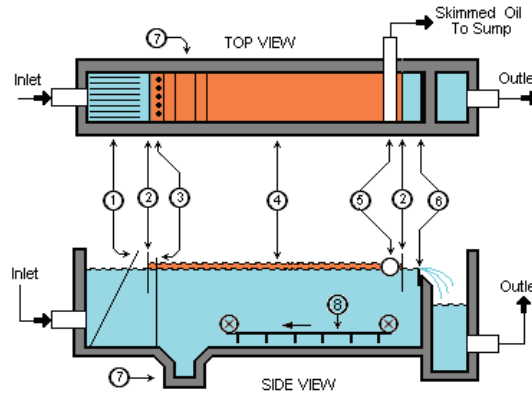


Figura 5.4: Separador API. (1) Rejas (2) Bafles de retención (3) Distribuidores de flujo (4) Capa de hidrocarburos (5) tubería cortada de skimmo (6) Pelo de agua ajustable (7) poceta de lodos (8) barredor de fondo. Fuente: American Water Chemicals, Inc. <https://www.membranechemicals.com/water-treatment/api-separators/>

Como parámetros de referencia para el diseño, se recomienda no exceder un caudal volumétrico (es decir, velocidad transversal del fluido) mayor a 2 ft/min, es decir, unos 35 m/h. Además, su relación largo:ancho se recomienda en 5:1 y además, no tener una profundidad menor a 4 ft. o 1,2 metros.

5.2.1.3. Separadores de Placas

Los separadores de placas son, básicamente, separadores con estándares API pero que incorporan un arreglo de placas paralelas, que tienen el objetivo de aumentar la superficie de contacto agua-aceite y permitir la generación de gotas de hidrocarburos con mayor eficiencia. Teóricamente, este arreglo de placas aumenta la eficiencia de remoción y permite separar gotas de 6 μm . En general, el agregado de placas permite aumentar la relación eficiencia-volumen en comparación a los separadores convencionales y llegando a niveles similares de eficiencia.

³⁹ Wesley-Eckenfelder (1997) – *Industrial Water Pollution Control* - Table 3.10 (p. 106) Typical Efficiencies of oil separation units.

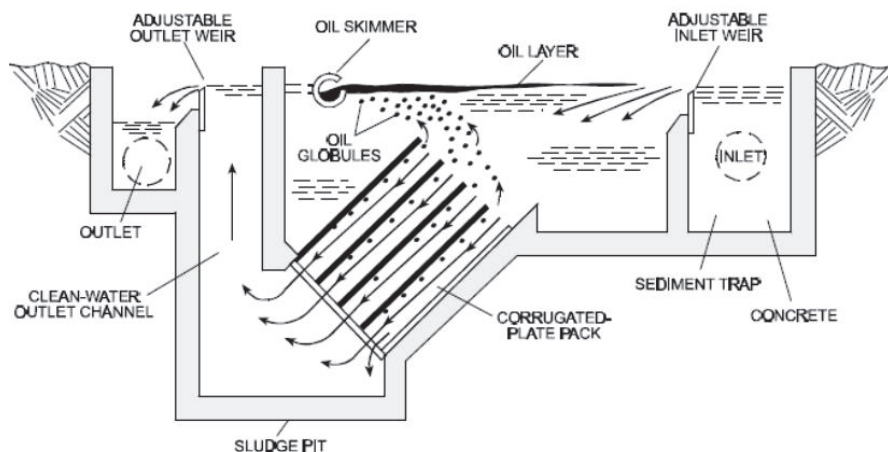


Figura 5.5: Separador de placas paralelas. Fuente: AED Design Requirements - Oil-Water Separator

Uno de los problemas con los separadores de placa es que su eficiencia se reduce drásticamente si el ingreso de hidrocarburos es muy elevado. Esto suele solucionarse si se instalan las placas corrugadas en sentido de dirección de flujo, con un ángulo de 45° y espaciado de 1 cm.

5.2.1.4. Flotación por aire

La flotación por aire es utilizada para remover sólidos suspendidos, grasas y aceites. El mecanismo de acción es mediante el arrastre de las grasas mediante burbujas de aire que provienen desde el fondo de la unidad. Estas burbujas, pueden tener dos orígenes: Insuflado mediante una inyección de gas (IAF or induced air flotation), o bien mediante la presurización de líquido hasta su punto de saturación con el gas, y posterior mezclado en la cámara (DAF o Dissolved Air Flotation). La experiencia en el diseño y operación de estas unidades da con la conclusión de que las unidades DAF son más eficientes que las IAF.

En la industria, es común el adición de coagulantes que permitan aumentar la eficiencia de remoción, siendo el más utilizado Sulfato de Aluminio o Sulfato Ferroso. Por otro lado, los gases utilizados para lograr la saturación dependen de las condiciones particulares de la industria, pudiendo ser aire común, o inclusive gas natural (siendo esto una ventaja dado que ya se poseen corrientes de gas a alta presión en un yacimiento no convencional como el del presente proyecto). Entre las variables de diseño para las unidades de flotación se encuentran la presión de mezclado, la tasa de reciclo, la concentración de sólidos de entrada, y el tiempo de retención.

5.2.2. Tratamientos Complementarios

Existen casos en los que un tratamiento complementario es necesario para diferentes usos y/o destinos. Si las condiciones mínimas requeridas de inyección se cumplen con un tratamiento convencional, los tratamientos complementarios funcionan para el re-uso en alguna parte del proceso productivo, como la elaboración de fluidos de fractura. Sin embargo, es posible que el agua de producción contenga ciertos componentes, como metales pesados, que generan la necesidad de mayor tratamiento.

En 1995, el Instituto Americano del Petróleo, o API (American Petroleum Institute), realizó recomendaciones sobre las mejores tecnologías disponibles para el tratamiento de agua de producción complementarios para el vuelco enfocado en actividades de off-shore, en donde los permisos de vuelco en materia de iones mayoritarios, contenidos de hidrocarburos, y otros compuestos traza, son aún más estrictos.

Por otro parte, existe un caso de estudio reciente, como se comentó anteriormente, el cual consiste en la posibilidad de reutilizar el agua de producción para el proceso de fractura hidráulica. Esta práctica es muy novedosa y solo se ha utilizado en escasas ocasiones⁴⁰. Independientemente del uso del agua de producción al 100% o una mezcla para la preparación del fluido de fractura, se deben remover hidrocarburos, **sólidos suspendidos totales** (tratados principalmente en los métodos convencionales) y **hierro** (requiere tratamientos complementarios) (parámetros guía del IAPG).

5.2.2.1. Tratamientos químicos

Los tratamientos fisicoquímicos se basan en las propiedades de los elementos, tales como su estado de oxidación, su solubilidad y las fuerzas electrostáticas. En general, todos ellos pueden ser complementarios entre sí, y todo dependerá de la correcta utilización de los mismos. En general, lograr un tratamiento adecuado requiere múltiples etapas de investigación que requiere la formulación de hipótesis previas, ensayos de laboratorio e implementación de plantas a escala piloto.

5.2.2.1.1. Precipitación Química

Una de las tecnologías más utilizadas y disponibles para la remoción de metales pesados es la precipitación química por oxidación. Entre los precipitantes más utilizados se encuentran los hidróxidos (OH^-), sulfitos (S^{2-}), sulfatos (SO_4^{2-}) y carbonatos (CO_3^{2-}). En la mayoría de los tratamientos de aguas

⁴⁰ Entrevista con Juan Carlos Bonapace.

industriales, los metales son precipitados con el agregado de cal, llevándolos a un punto de mínima solubilidad.

En general, el tratamiento de metales, dependerá de la solubilidad de las diferentes especies presentes en la mezcla, las cuales a su vez dependen de la concentración de los aniones en solución, y también del pH. Sin embargo, existe bibliografía que indica que la remoción de múltiples metales puede lograrse mediante la coprecipitación con hidróxido férrico (Figura 5.6).

TABLE 4.19
Effluent levels achievable in heavy metals removal¹⁴

Metal	Achievable effluent concentration, mg/l	Technology
Arsenic	0.05	Sulfide ppt with filtration [†]
	0.06	Carbon adsorption
	0.005	Ferric hydroxide co-ppt
Barium	0.5	Sulfate ppt
Cadmium	0.05	Hydroxide ppt at pH 10–11
	0.05	Co-ppt with ferric hydroxide
	0.008	Sulfide precipitation
Copper	0.02–0.07	Hydroxide ppt
	0.01–0.02	Sulfide ppt
Mercury	0.01–0.02	Sulfide ppt
	0.001–0.01	Alum co-ppt
	0.0005–0.005	Ferric hydroxide co-ppt
	0.001–0.005	Ion exchange
Nickel	0.12	Hydroxide ppt at pH 10
Selenium	0.05	Sulfide ppt
Zinc	0.1	Hydroxide ppt at pH 11

[†]Note: ppt = precipitation

Figura 5.6: Eficiencias de remoción de diferentes metales pesados. Extracto de Wesley-Eckenfelder

Para la precipitación de hierro, el principal aspecto a considerar es la solubilidad. El hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ posee una constante de solubilidad K_s de $4,9 \times 10^{-15}$, lo que lo hace un compuesto medianamente soluble, pudiendo precipitar a pH cercanos a 7,5. El hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ posee una constante de solubilidad mucho menor, de aproximadamente $6,3 \times 10^{-38}$, lo que lo hace muy insoluble a pH a partir de 3. Al precipitar se observa un color rojizo, y es uno de los principales incrustantes de tuberías que tengan muchos años de operación. El diagrama de especiación del hierro puede observarse en la siguiente figura 5.7.

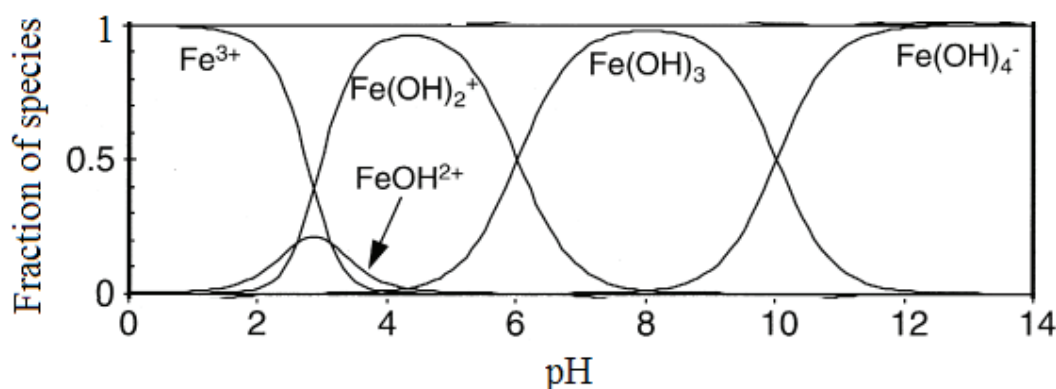


Figura 5.7: Fraccionamiento de especies de hierro en su estado férrico. Fuente: Welham et al., 2000

Según bibliografía⁴¹, el Arsénico puede ser removido mediante precipitación química mediante el agregado de sulfito de sodio; sin embargo, es importante considerar que se han identificado remociones de arsénico mediante la coprecipitación con flocs de hidróxido de hierro (**ver capítulo [Coagulación](#)**), proceso en el cual los metales se absorben en la matriz y luego precipitan, reportándose efluentes con concentraciones menores a 0,005 mg/l en estos casos.

El cromo (VI), por su parte, reacciona con sulfito o sulfato hierro (II) para formar hierro (III) y cromo (III), el cual termina precipitando principalmente como hidróxido de cromo (Cr(OH)_3). Al igual que el arsénico, también es secuestrado por flocs de hidróxido férrico, por lo que el agregado de cal es muy efectivo.

5.2.2.1.2. Oxidación Química

La oxidación química en tratamientos de aguas involucra un agente oxidante, como el Ozono (O_3), Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2), Permanganato (MnO_4), hipoclorito de sodio (NaClO) e inclusive oxígeno (O_2). Estos elementos químicos pueden oxidar metales para su posterior precipitación en forma de hidróxidos u otros compuestos insolubles en agua. Un caso particular es la remoción de hierro; como se mencionó en el apartado anterior (**5.2.2.2.1 [Precipitación Química](#)**) el hidróxido férrico Fe(OH)_3 es mucho más insoluble que el hidróxido ferroso Fe(OH)_2 , por lo que si se busca eliminar hierro total la oxidación del mismo es un proceso efectivo.

Según el Ente Nacional de Obras Hídricas y Saneamiento (ENOHSA), siempre es recomendable oxigenar el efluente previamente antes de un tratamiento con químicos, los cuales no siempre son

⁴¹ Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* - Chapter 4 - Coagulation, precipitation and metals removal.

necesarios, pudiendo ser complementarios⁴²; sin embargo, considerando que pueden existir presencia de hidrocarburos livianos los cuales son inflamables a temperatura ambiente, la oxigenación no es una práctica recomendada en la industria. Por otro lado, aquellos tratamientos que requieran oxidantes químicos deben prever un tiempo de retención mínimo de 20 minutos para asegurar que las reacciones se produzcan de forma completa.

5.2.2.1.3. Coagulación y floculación

La coagulación es un proceso que consiste en aplicar productos químicos para lograr la desestabilización de suspensiones coloidales de partículas sólidas y asimismo la adsorción y precipitación de compuestos en solución, a fin de su remoción por sedimentación, flotación y/o filtración, pasando previamente, o no, por un proceso de floculación.⁴³

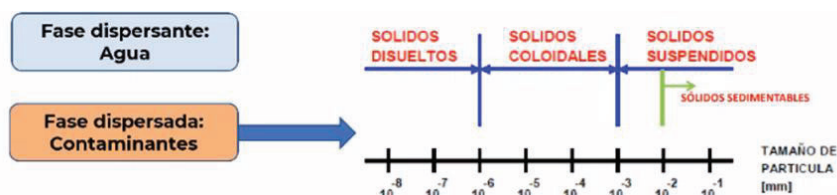


Figura 5.8: Fases de sólidos contenidos en un efluente tipo. Fuente: Cátedra de Procesos Fisicoquímicos en Ingeniería Ambiental - UNSAM

Los coloides poseen propiedades eléctricas que crean fuerzas de repulsión, motivo por el cual su aglomeración y decantación no se produce con facilidad. Por este motivo, dado que la estabilización de los coloides es definida principalmente por fuerzas electrostáticas, es necesario realizar una neutralización de cargas (coagulación), para inducir el proceso de aglomeración de las partículas (floculación) y su posterior separación física por flotación o sedimentación, según la naturaleza de los sólidos formados.

Los coagulantes son sustancias que suelen tener carga positiva, dado que la mayoría de coloides tienen carga negativa⁴⁴. Este químico se incorpora en el efluente con el objetivo de desestabilizar las partículas coloidales de forma tal que los flóculos, agregaciones de partículas, puedan formarse. Muchas veces la naturaleza propia de los coloides, aún estabilizados eléctricamente, impide su

⁴² ENOHSA (Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento). (2000). *Manual de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Buenos Aires, Argentina - Criterio 5

⁴³ ENOHSA (Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento). (2000). *Manual de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Buenos Aires, Argentina - Criterio 5

⁴⁴ Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* y Wesley-Eckenfelder (1997) – *Industrial Water Pollution Control*

floculación; por ese motivo, también suelen agregarse floculantes que consisten normalmente en cadenas orgánicas poliméricas que permiten la unión de las partículas.

Entre los coagulantes utilizados se encuentran el sulfato de aluminio, el sulfato ferroso, el policloruro de aluminio y cloruro férrico. Para que su acción desestabilizante sea óptima y rentable, se requieren mezclas rápidas y tiempos de residencia cortos. Entre los floculantes, se encuentran poliacrilamidas, poliaminas o metilaminas. Para la floculación, es necesaria cierta agitación para permitir la homogeneización del efluente con el floculante, pero no puede ser una mezcla rápida porque rompería los *flocs* formados.

El agua de producción no posee un alto contenido de sólidos coloidales; sin embargo, cuando se desea tratar químicamente la misma con el objetivo de remover iones o en procesos de ablandamiento, estas partículas inorgánicas de poco tamaño se generan en el efluente, y si se busca obtener un clarificado libre de ellos, es necesaria su separación. Un estudio reporta una reducción del 50% de la dureza, así como también remoción de iones metálicos utilizando cal precalentada⁴⁵.

Para llevar este proceso de coagulación y floculación a una planta industrial, se deben diseñar unidades con determinados tiempos de residencia y agitaciones. En el caso de los reactores de coagulación, se buscan tiempos de residencia cortos (entre 30 segundos a 3 minutos) y agitaciones rápidas (100 a 350 rpm), inclusive pudiendo ser dosificados en línea en el caso de ingresos turbulentos. Para los reactores de floculación, se buscan tiempos de residencia mayores (15 a 30 minutos) y agitaciones más lentas (10 a 40 rpm), para evitar la rotura de los *flocs*.

Un estudio realizado por una empresa contratada por FracEnergy, analiza la eficiencia de remoción de hierro y otros componentes utilizando hipoclorito de sodio como oxidante, sulfato de aluminio como coagulante y Policloruro de aluminio (PAC) como floculante en el agua de retorno de otro bloque del yacimiento Vaca Muerta, demostró que es posible alcanzar eficiencias de remoción de hierro entre el 70% y hasta un 99%⁴⁶.

Otros estudios realizados con agua de producción proveniente de la Cuenca Pérmica ubicada en Texas⁴⁷, la cual tiene mucha similitud con las encontradas en Vaca Muerta, lograron eficiencias de remoción de hierro mayores al 97% y turbidez mayor al 86% mediante la utilización de cloro como

⁴⁵ Jiménez, S., et al. (2017). *State of the art of produced water treatment*. Journal of Environmental Management, Elsevier. Disponible en ScienceDirect

⁴⁶ Camps, Y. (2019). *Adecuación de la Planta de Tratamiento de Agua – Yacimiento Piedra Atravesada de la Empresa Petrolia*. Proyecto Integrador Profesional. Universidad del Comahue.

⁴⁷ Nadella et. Al (2020) - Fit-for-purpose treatment of produced water with iron and polymeric flocculant for reuse in hydraulic fracturing. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31786393/>

oxidante, cloruro férrico como coagulante y un polímero aniónico (FLOPAM EM235) como floculante. En este ensayo, se consideró inicialmente que la concentración de hierro inherente en el agua producida podría ser suficiente para actuar como coagulante, pero debido a que la turbidez no era efectivamente removida porque los coloides no eran lo suficientemente densos, se agregó externamente Cloruro Férrico (FeCl_3) como ayudante en la coagulación, y manteniendo un pH entre 7,0 y 8,5.

5.2.2.1.4. Electrocoagulación y floculación

La electrocoagulación es una variante del proceso de coagulación convencional. Este proceso tiene el potencial de reemplazar tratamientos químicos convencionales; se han obtenido casos de éxito para papeleras, mineras, metalúrgicas, restos de procesos con hidrocarburos, textiles, entre otros. Sin embargo, son casos aislados en donde típicamente se realizaron estudios empíricos para determinar los parámetros operativos⁴⁸.

Como se explicó anteriormente (**Ver apartado 5.3.2.2.1 [Coagulación](#)**), el agregado de coagulantes permite reducir la carga superficial neta, permitiendo así reducir la repulsión electrostática entre los componentes dispersos con diferentes cargas iónicas mayoritarias. En la Electrocoagulación, el coagulante es generado in situ mediante la oxidación electrolítica de un ánodo de sacrificio, normalmente de hierro o de aluminio, alimentado por una fuente de poder externa (figura 5.9). En este proceso, las especies iónicas cargadas positivamente son removidas mediante su reacción con iones de carga negativa o flocúlos de hidróxidos metálicos formados en el efluente. Este movimiento de cargas, además, permite la remoción de parte de los sólidos disueltos totales.

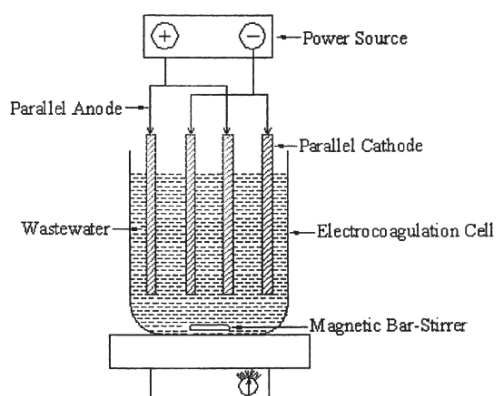
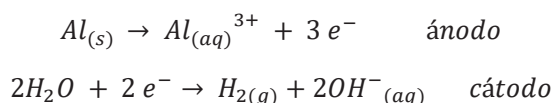


Figura 5.9: Modelo piloto de un reactor de electrocoagulación con electrodos monopolares en conexión paralela.

⁴⁸ Jiménez, S., et al. (2017). *State of the art of produced water treatment*. Journal of Environmental Management, Elsevier. Disponible en ScienceDirect

La electrocoagulación es una alternativa viable no solo para remover ciertos iones metálicos, sino también para la remoción de sal. Según un estudio realizado en Iraq⁴⁹, se lograron eficiencias de remoción de entre 30% y hasta 91% en las condiciones de ensayo experimental más óptimas a partir de un agua subterránea con 26.263 mg/l de SDT, utilizando un ánodo de aluminio y un cátodo de titanio contenidos en un pequeño reactor de unos 5 litros, los cuales realizaban una reacción de electrólisis dominada por las siguientes hemi-reacciones:



La principal ventaja de esta metodología es que no requiere el agregado de químicos y además permite la remoción de una fracción de los sólidos disueltos. Entre sus desventajas, se encuentra el empleo de electrodos de sacrificio que deben ser reemplazados regularmente ya sea por su degradación como también la deposición de partículas en los mismos, que reducen su eficiencia.

Existen estudios que reporta eficiencias de remoción de Cobre, Níquel, Zinc, Cromo, Plomo y otros metales pesados^{50 51}. Un caso de aplicación conocido en la industria del petróleo y gas es el producto CleanWave, de Halliburton⁵², el cual consiste en un sistema móvil de electrocoagulación el cual permite remover Sólidos Suspendidos totales y algunos metales, como el Hierro. Sin embargo, no existen a día de hoy (o no son accesibles) estudios de eficiencia de remoción para agua de producción.

5.2.2.2. Tratamientos físicos

En tratamientos de aguas industriales, los clarificadores son las unidades más utilizadas para realizar el proceso de sedimentación. Para las aguas de producción petrolera, el contenido de sólidos puede ser elevado, pero el tratamiento de los mismos se da en diferentes partes del proceso y de diferentes maneras; a efectos del diseño de una planta central de agua de producción, dentro de un yacimientos, las unidades más comunes son los separadores API y los tanques de equalización los que retienen la fracción de sólidos, que suele ser baja si la retención de sólidos en *boca de pozo* es adecuada, llegando a un valor óptimo para su inyección a sumidero. Sin embargo, para el diseño de tratamientos de remoción de metales las unidades clarificadoras son necesarias, especialmente luego de procesos de coagulación y floculación, en donde se forman hidróxidos metálicos que suelen decantar por gravedad.

⁴⁹ Treatment of Saline Water Using Electrocoagulation with Combined Electrical Connection of Electrodes (Abbas A. Al-Raad et. al, 2019)

⁵⁰ Ayub S. et. Al. (2020) Removal of heavy metals (Cr, Cu, and Zn) from electroplating wastewater by electrocoagulation and adsorption processes.

⁵¹ Khan et. Al. (2023) Efficacy of Electrocoagulation Treatment for the Abatement of Heavy Metals: An Overview of Critical Processing Factors, Kinetic Models and Cost Analysis

⁵² <https://ir.halliburton.com/news-releases/news-release-details/halliburtons-cleanwavetm-water-treatment-technology-takes> - Halliburton Clean Wave Water Treatment

En ciertos casos, especialmente en donde la concentración de sólidos coloidales es elevada y desea removerse, es necesario utilizar medios filtrantes. En el tratamiento de aguas de producción petroleras, estas unidades son utilizadas en tratamientos complementarios para remover precipitados iónicos e hidrocarburos remanentes, así como también restos de particulado fino que no suele decantar, proveniente del pozo o las fracturas hidráulicas.

Finalmente, la máxima calidad de agua puede lograrse únicamente mediante tratamientos de filtración avanzada, incluyendo la Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO), son la metodología más utilizada para la eliminación del contenido de sales en múltiples industrias.

5.2.2.3. Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos son considerados unos de los más baratos para la remoción de contaminantes, inclusive hidrocarburos⁵³. La oxidación biológica logra reducir contenido carbonáceo llevándolo a dióxido de carbono mediante la actividad de bacterias, algas, hongos y protozoos. Si bien la bibliografía es extensa y hay varios casos de éxito, especialmente en refinerías, la principal limitante para lograr un tratamiento efectivo en aguas de producción proveniente de pozos petroleros es el alto contenido de sales. Es por esta razón que, a los efectos del presente proyecto, los tratamientos biológicos no son considerados y no se ahondará en mayor información.

5.3. Descripción de alternativas (agua de producción)

En este apartado se discutirán las alternativas planteadas para el diseño de la planta de tratamiento de agua de producción. **Todas las alternativas contemplan con mismo arreglo de recepción y pretratamiento inicial**, el cual consiste en dos tanques de estándar API 650 con sistema de blanketing (figura 5.10). El primero de ellos, llamado TK01 o TK Pulmón, funcionará como un ecualizador que recepcionará todos los flujos que vienen de la planta, directamente de la producción de hidrocarburos o una purga de alguna línea o equipo de proceso, práctica que ocurre durante la vida de la instalación. El segundo tanque, llamado TK02 o TK Skimmer, funcionará como un primer removedor de hidrocarburos por flotación y por *flasheo*.

⁵³ Jiménez, S., et al. (2017). *State of the art of produced water treatment*. Journal of Environmental Management, Elsevier. Disponible en ScienceDirect.

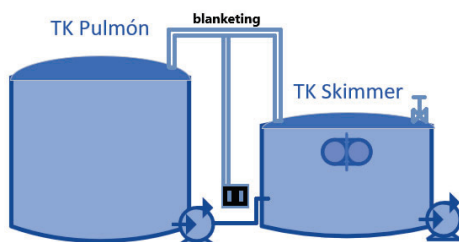


figura 5.10: Representación gráfica de los tanques API de ingreso

Este arreglo de tanques es un pedido especial del cliente, dado que ha reportado que en diseños anteriores de otras plantas que opera a lo largo del país, contemplaban un único tanque de recepción y skimmer. Su experiencia ha demostrado que es necesario incorporar un segundo tanque que trabaje con un ingreso y egreso constante, el cual permite remover y reciclar correctamente los hidrocarburos al proceso. Independientemente de ello, se decide adoptar una eficiencia de remoción conservadora atribuible únicamente al TK2, tomado de bibliografía⁵⁴ en su cota inferior, de 54%.

Por otra parte, si bien fue enunciada en el apartado anterior (Ver [Estado del Arte](#)), el **tratamiento biológico queda descartado del proceso de descripción y evaluación** por la alta salinidad del efluente. Bajo esas condiciones, la biodiversidad microbiana se restringe a la familia de termohalinas, las cuales no son eficientes para remover compuestos de interés.

Alternativas - Tratamiento convencional

Una vez realizado el pretratamiento, suponiendo una concentración de hidrocarburos inicial de 660 mg/l y una eficiencia de remoción del 54%, se obtendría un efluente con 304 mg/l. Para cumplir con el requerimiento legal, el cual especifica una concentración menor a 320 mg/l (Ver [apartado 3.1](#)), es necesario continuar con el tratamiento de hidrocarburos dado que el contenido remanente es muy cercano al parámetro de disposición final. En la siguiente figura 5.14, se representan gráficamente las tres alternativas a evaluar (Conv. 1, 2 y 3). La gran mayoría de información cualitativa y cuantitativa utilizada para este análisis se basa principalmente en el libro de tratamiento de aguas industriales Wesley-Eckenfelder.

⁵⁴ Wesley-Eckenfelder (1997) – *Industrial Water Pollution Control* - Table 3.10 Typical Efficiencies of oil separation units p.106

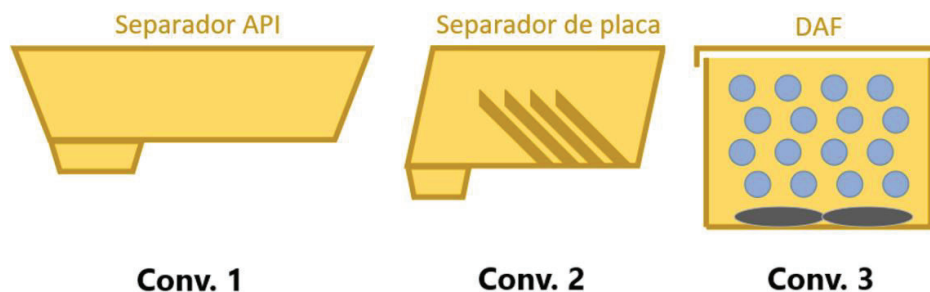


figura 5.11: Alternativas de tratamiento convencional

Separador API (API): La primera opción (**Conv. 1**) consiste en un separador API convencional, el cual es de diseño simple y bajo costo operativo, dado que no consume ningún tipo de químicos ni energía externa. De las tres alternativas a analizar, es la que mayor espacio ocuparía.

El hidrocarburo caracterizado en los pozos de fractura es de baja densidad relativa (0,7) por lo que flota fácilmente y no genera una gran cantidad de emulsiones. Sin embargo, su baja cantidad de carbonos dificulta la formación de burbujas de gran tamaño. Los separadores API poseen una limitante de diseño, la cual considera una separación de gotas de hidrocarburos mayores a 15 μm ; por ese motivo, se asume una eficiencia de remoción de hidrocarburos, según tabla⁵⁵, del 63%. Además, se asume una eficiencia de remoción de SST del 33%.

Separador de Placas Corrugadas (CPI): La segunda opción (**Conv. 2**) contempla la incorporación de un separador con placas corrugadas (CPI). Estas unidades ocupan menos espacio y requieren tiempos de residencia menores, incrementando levemente los costos de mantenimiento. Si bien el tamaño es menor, el costo de inversión es mayor al de un Separador API por la incorporación de las placas corrugadas. Esta alternativa permitiría una remoción de hidrocarburos con un tamaño de gota de 6 μm , por lo que sería razonable asumir una eficiencia de remoción de hidrocarburos mayor. Según bibliografía⁵⁶, una eficiencia del 87% de remoción es esperable. Se considera una eficiencia de remoción de sólidos equivalente al Separador API (33%).

Flotación por Aire Disuelto (DAF): Finalmente, la tercera opción (**Conv. 3**) consiste en una unidad de flotación por aire disuelto. Las unidades DAF aseguran eficiencias superiores al 90% en materia de hidrocarburos y hasta un 70% en SST⁵⁷. Gracias a la flotación por aire disuelto se pueden romper por

⁵⁵ Wesley-Eckenfelder (1997) – *Industrial Water Pollution Control* - Table 3.10 Typical Efficiencies of oil separation units p.106

⁵⁶ Wesley Eckenfelder (1997) – *Industrial Water Pollution Control* - Table 3.10 Typical Efficiencies of oil separation units p.106

acción cizallante, las emulsiones formadas; además, permite la flotabilidad de hidrocarburos más pesados que podrían presentarse (siendo una fracción menor en el yacimiento Loma Gruesa). Sin embargo, es esperable un mayor costo de inversión y operativo, pudiendo requerir agregado de coagulantes. En la siguiente Tabla 5.1 puede observarse un resumen de las eficiencias de tratamiento.

Tabla 5.1: Eficiencias de cada tratamiento, en base al rendimiento resultante del skimmer.

Convencional	η SST (%)	η HTP (%)	SST (mg/l)	HTP (mg/l)
Skimmer	10%	54%	136	304
(1)API	33%	63%	91	112
(2)CPI	33%	87%	91	39
(3)DAF	70%	90%	41	30

Alternativas - Remoción de Metales

Removidos la mayor parte de los hidrocarburos, el tratamiento restante requerido para cumplir con las condiciones de inyección consiste principalmente en la remoción de metales pesados y sales. Según los requerimientos de la autoridad de aplicación y los valores obtenidos de los estudios provistos por FracEnergy, es necesario realizar un tratamiento complementario para remover Cromo y Arsénico de la solución previo a la inyección a pozos sumideros. Cabe destacar que la cantidad de mediciones han arrojado resultados muy variables; sin ir más lejos, muchas operaciones hidrocarburíferas han informado que la presencia de metales pesados es variable, y en muchos casos no es tal como para requerir un tratamiento adicional a la remoción de hidrocarburos. Sin embargo, estos resultados preliminares indicarían que sería necesario en este caso.

Por otro lado, dado el interés que la empresa tiene en incrementar sus porcentajes de reúso de agua mediante la utilización de agua de producción para fractura y otros posibles destinos, también sería necesario como mínimo remover el Hierro, por ser uno de los compuestos presentes en el agua de producción que más interfiere con los HVFR en general debido a su carga positiva; idealmente, otros cationes como magnesio o calcio también deberían reducirse a un margen aceptable. Además, sería necesario remover sales si se requiere utilizar HVFR aniónicos, los cuales no tienen un buen rendimiento a altas salinidades (**Ver apartado [El Fluido de Fractura](#)**).

La remoción de arsénico y cromo son condiciones necesarias para lograr cumplir con los parámetros de vuelco. Si bien ambos iones pueden removerse utilizando diferentes tratamientos específicos para cada uno de ellos, ambos pueden removerse mediante procesos de coprecipitación con hidróxido de

hierro (**ver apartado [Precipitación Química](#)**). Además, la remoción de hierro es deseable si se busca utilizar el agua de producción para la formulación de fluido de fractura.

La remoción de hierro mediante precipitación es más eficiente si se encuentra en su especie más oxidada (Fe^{3+}). Es por ello que el primer paso consiste en el agregado de un oxidante. Dado que este proceso acidifica el sistema y se requiere idealmente un pH entre 6 y 10 para precipitar el hierro como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, también se requiere agregar una base como hidróxido de sodio o calcio. El proceso de oxidación, además de atacar el contenido de hierro, también oxidará el resto de hidrocarburos remanentes que lleguen a esta etapa del proceso.

Producto de la oxidación de los metales y los hidrocarburos, el contenido de sólidos coloidales aumentaría en el efluente. Es por ese motivo que, para propiciar la separación de estos componentes de la matriz es necesario realizar un proceso de coagulación y floculación. Para ello, se proponen 2 alternativas (figura 5.12)

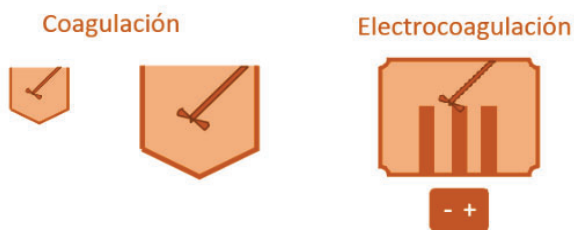


Figura 5.12: Alternativas de tratamiento para la remoción de metales

Coagulación convencional: La primera alternativa de remoción de iones se basa en un proceso de coagulación y floculación convencional mediante el agregado de químicos que permitan decantar los sólidos coloidales formados por el proceso de oxidación y precipitación química. Este es un proceso bien documentado y que ha demostrado obtener eficiencias de remoción de metales pesados óptimos para la inyección del agua de producción a pozos sumideros, o bien su reutilización como agua de fractura.

Electrocoagulación: La segunda alternativa consiste en realizar el proceso de coagulación mediante la utilización de ánodos de sacrificio con aluminio o hierro. Este proceso permitiría, en teoría, obtener el mismo resultado que el tratamiento convencional, pero sin la necesidad de agregado de químicos; sin embargo, se deben mantener los electrodos en condiciones y ser reemplazados periódicamente. Este tratamiento, además, tendría la posibilidad de remover parcialmente sales disueltas si se agregan membranas en los electrodos de sacrificio, proceso conocido como electrodialisis.

5.4. Evaluación y selección de Alternativas (agua de producción)

Las alternativas propuestas para el proyecto en cuestión se evaluarán utilizando la metodología de evaluación del [análisis multicriterio descrito en el anexo 11.2](#).

Evaluación y Selección de Alternativas - Tratamiento convencional

Para el tratamiento convencional, el cual presenta 3 alternativas posibles, se tomarán en consideración un total de 5 criterios, los cuales se proponen en base a cuestiones generales y particulares del requirente:

- Costo de inversión: Considera el costo de la compra de la unidad “llave en mano” o bien la construcción de la misma. Debido a que es uno de los gastos más elevados, se asume un valor de Peso (3) máximo.
- Costo de operación: Incluye el consumo energético y de insumos necesarios. El Peso (2) de este criterio se considera medio; se tomó en consideración que la provisión de energía está garantizada por la generación in-situ mediante el gas producido por el yacimiento.
- Operabilidad: Contempla condiciones particulares como la demanda de personal calificado, la cual está en aumento debido al incremento de actividad en Vaca Muerta, motivo por el cual el Peso (2) se considera medio.
- Eficiencia: El criterio de puntuación para cada alternativa se basa en las eficiencias de tratamiento de hidrocarburos livianos. El Peso (3) de este criterio se considera máximo, debido a que esta eficiencia repercutirá en los hidrocarburos remanentes que ingresarán al tratamiento de metales.
- Espacio: Medido como la cantidad de superficie afectada por el proyecto. La definición del Peso (1) es bajo debido a que existe una limitante a la hora del diseño de la planta, la cual está dada por la resolución N°785, en donde se detalla que todas las playas de tanques deben estar contenidas en diques de contención secundaria capaces de retener la totalidad de los líquidos almacenados. Bajo este punto, no existe mucha maniobrabilidad de esta variable. Además, existe mucho espacio disponible, y ausencia de napas freáticas detectadas en la zona.

Una vez definidos los criterios y la importancia o Peso (P) de cada uno de ellos en base a la información brindada por los requirentes del proyecto, se construye la matriz de evaluación en base a la metodología multicriterio (tabla 5.2).

Tabla 5.2: Evaluación de alternativas con método multicriterio de Anexo 11.2

Criterios	(P)	API	CPI	DAF
Costo de Inversión	3	3	2	1
Costo de operación	2	3	2	1
Operabilidad	2	3	3	1
Eficiencia	3	1	3	3
Espacio	1	1	2	3
		25	27	19

En base a esta metodología, el separador de placa corrugada sería la mejor alternativa para este tipo. Si bien el costo de inversión y operación es un poco más elevado que el separador API, la eficiencia del tratamiento de un separador de placas corrugadas asegura la remoción de gotas de 6 micrones frente los 15 micrones de un separador API convencional, lo cual permite remover hidrocarburos livianos y lo vuelve más atractivo para el tratamiento.

De todas las alternativas, la flotación por aire disuelto termina siendo la menos atractiva debido principalmente a los costos de inversión y operación, los cuales son mayores principalmente por el sistema de compresión. Si bien la eficiencia de remoción de sólidos e hidrocarburos es mayor, no amerita mayor eficiencia para esta etapa del tratamiento.

Evaluación y Selección de Alternativas - Remoción de metales

Para la remoción de metales, en donde los mecanismos a analizar serán la coagulación **(C-F)** y la electrocoagulación **(EC-F)**, se tomarán en consideración un total de 5 criterios, los cuales son:

- Eficiencia: Refiere a la eficiencia de remoción de metales pesados, asumiendo un tratamiento en condiciones óptimas. El Peso (3) de este criterio se considera máximo, debido a que esta eficiencia repercutirá directamente en el cumplimiento de los parámetros de vuelco, así como también la posibilidad de reuso del agua de producción tratada.
- Costo de operación: Incluye la sumatoria de costos del consumo energético y de insumos necesarios. El Peso (2) de este criterio se considera medio; se tomó en consideración que la provisión de energía está garantizada por la generación in-situ mediante el gas producido por el yacimiento, así como también la accesibilidad del yacimiento y disponibilidad de productos.

- Generación de lodos: La generación de barros que requieren disposición final es otra de las variables a considerar debido a que incrementa los costos operativos; el contenido de los barros es considerado un residuo peligroso, motivo por el cual el Peso (2) se considera medio.
- Flexibilidad operativa: La flexibilidad operativa refiere a la capacidad de adaptarse a los cambios en variables operativas como la calidad del efluente al ingreso. Debido a que esto condiciona el cumplimiento de los parámetros de vuelco, el Peso (3) considerado es el máximo.
- Madurez tecnológica: Este criterio refiere a la cantidad de estudios de casos similares de aplicación exitosa, que puedan probar que el tratamiento sea efectivo.

Ambos tratamientos consideran una segunda etapa de separación física, la cual consistirá en un proceso de sedimentación y posterior filtración; algo en lo cual coinciden la mayoría de los estudios, es que los flocs formados por la remoción de metales suelen decantar, motivo por el cual una separación por flotación o DAF no es atractiva.

Una vez definidos los criterios y la importancia o Peso (P) de cada uno de ellos, se construye la matriz de evaluación en base a la metodología multicriterio (tabla 5.3).

Tabla 5.3: Evaluación de alternativas con método multicriterio de Anexo 11.2

Criterios	(P)	C-F	EC-F
Eficiencia	3	3	3
Costo de operación	2	1	2
Generación de lodos	2	1	2
Flexibilidad operativa	3	3	2
Madurez tecnológica	3	3	1
		31	26

En base a los resultados obtenidos, el tratamiento de coagulación-floculación convencional es más atractivo para una implementación. La bibliografía y los ensayos provistos por FracEnergy demuestran que las eficiencias de remoción son lo suficientemente elevadas para cumplir los parámetros de vuelco. Si bien el costo de operación y la generación de lodos puede ser mayor respecto a un tratamiento de electrocoagulación bajo determinadas condiciones, la flexibilidad operativa que permite un tratamiento químico, el cual puede ensayarse en los laboratorios de la planta en forma continua, da mayor seguridad para la implementación.

Si bien la electrocoagulación como alternativa es atractiva, y así lo sugiere la bibliografía existente, la madurez tecnológica de la misma y la falta de estudios que permitan analizar las eficiencias de remoción a diferentes concentraciones de hierro e hidrocarburos remanentes que podrían llegar a esta etapa del tratamiento son condiciones insalvables, con la información actual, para la ejecución del presente proyecto.

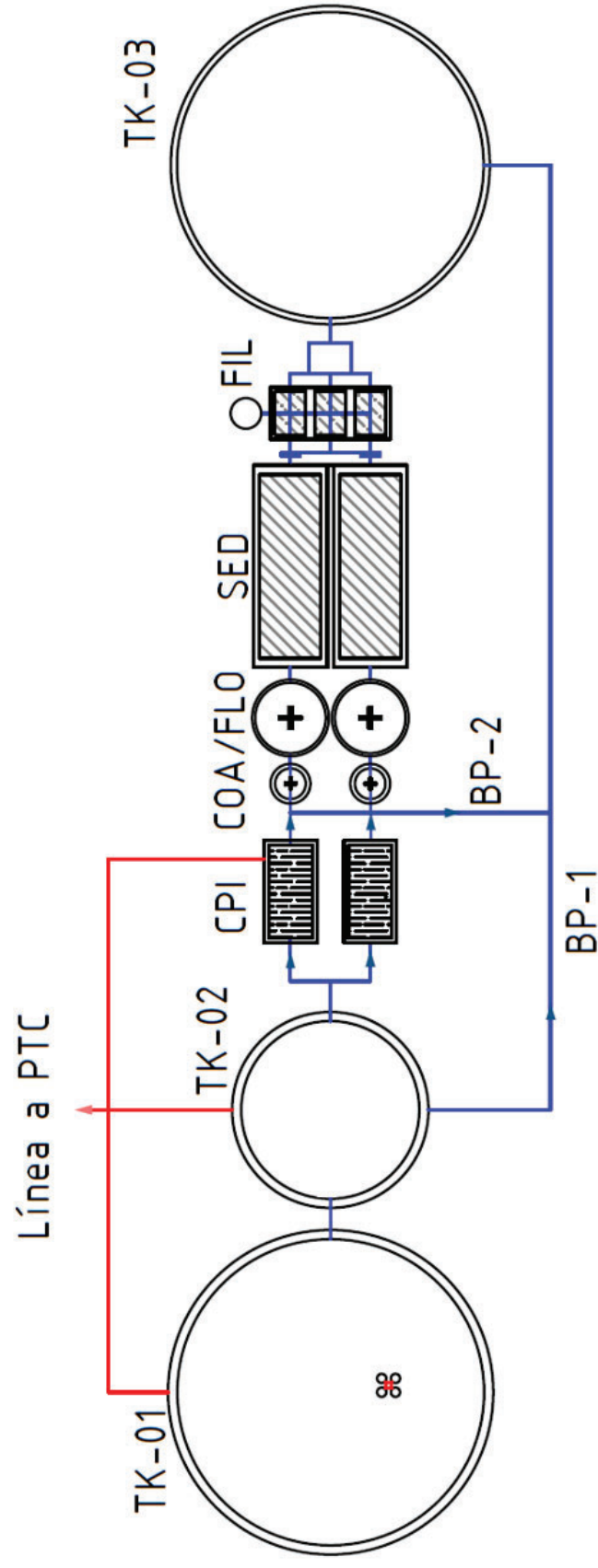
5.5. Memoria descriptiva del tratamiento de agua de producción

La planta de tratamiento de agua (PTA) se ubicará dentro del predio de la planta central de procesamiento (CPF) y está diseñada para procesar aproximadamente 920 m³/d. El diagrama de flujo de procesos puede observarse en la figura 5.13.

El proceso consiste en dos etapas, las cuales pueden diferenciarse por su objetivo, capacidades y tipos de conducción (a presión o a gravedad). La primera de ellas es considerada el tratamiento convencional (PTA-H) en donde se separa el contenido de hidrocarburos más abundante e incluye los tanques API iniciales. Luego, se sigue con una etapa de remoción de metales (PTA-M), la cual se contempla desde el Separador de Placas y aguas abajo. Finalmente, desde ambos destinos existe la oportunidad de enviar flujo al tanque de inyección, o bien derivarlo a cargadero para su utilización como agua de fractura.

El proceso de tratamiento de la PTA-H comienza con la recepción del agua de producción proveniente de los separadores de entrada de la CPF, o bien descargas puntuales de camiones cisterna y sistemas de drenajes abiertos y cerrados dispuestos en la planta. En ambos casos el líquido, compuesto principalmente por agua, pero con cierto contenido de hidrocarburo, ingresa al Tanque Pulmón (TK-01 o TKP) en donde busca amortiguar las fluctuaciones de ingreso y funcionar como un ecualizador que regule el caudal para las siguientes unidades mediante bombeo. Además, cuenta con un aparato flotante que recupera el hidrocarburo que pueda separarse por flotación dentro del mismo, por diferencia de densidad, enviándolo al Tanque de Trasvase (TKT), el cual recibe todo el hidrocarburo separado en la PTA.

Si bien el estado del presente proyecto no está en un punto de avance tal en el cual se deba incluir toda la instrumentación de la planta, a fines de transmitir la filosofía operativa de la misma se incluye una descripción general de los sistemas críticos de control e instrumentación. Una ingeniería de detalle podría originar cambios respecto a esta descripción general.



N°Equipos		1	1	2	2	2	2	3	1	by-pass	by-pass
Contenido	Unidades	TK-01	TK-02	CPI	COA/FLO	SED	FIL	TK-03	BP-1	BP-2	BP-2
Agua	m3/h	38,3	38,3	19,2	19,2	19,2	12,8	37,2	38,3	38,3	38,3
HC (libre)	m3/h	1,92	0,19	< 0,01	0	0	0	0	0	0	0
HC (mezcla)	mg/l	660	304	39	39	39	<15	<15	304	39	39
SST	mg/l	160	136	91	308	123,2	< 15	< 15	136	91	91
Fe	mg/l	83	83	83	83	83	0,3	0,3	83	83	83

figura 5.13: diagrama de flujo de procesos de la planta de tratamiento de agua de producción

El nivel del Tanque Pulmón (TK-01) posee un interruptor de nivel LS-01 (LS = *Level Switch*) con 4 funciones instrumentadas. Por Alto Nivel y Bajo Nivel ($H = 7200\text{ mm}$ y $L = 1500\text{ mm}$) deriva una señal al sistema instrumentado de control que genera una serie de alarmas sonoras y lumínicas para alertar al operador de la sala de control. Complementario a esto, contará con enclavamientos seteados para ordenar acciones auto comandadas y programadas en el sistema de control; el sistema enviará señal de paro al motor de las bombas de salida del TK-01 (bombas B01-A/B) por Muy Bajo Nivel ($LL = 1000\text{ mm}$) y el cierre de la válvula exclusiva (XV-01) por muy alto nivel ($HHLL = 7500\text{ mm}$).

A la salida de esta unidad se encuentra un equipo de bombeo del tipo desplazamiento positivo en duplicado (B01-A/B) para permitir el trasvase adecuado de sólidos e hidrocarburos remanentes. El mismo cuenta con una capacidad de reciclo accionado a necesidad por una válvula auto pilotada (PV-01) para derivar cualquier excedente de caudal que pueda originarse por la diferencia de nivel en el TK-01, de forma tal que pueda mantener constante el nivel en la siguiente unidad de proceso, el Tanque Skimmer (TK-02).

Equipo	Tanque Pulmón (TK-01)
Capacidad Nominal / Neta	628 m ³ / 534 m ³
Altura Nominal / Neta	8 m / 6,5 m
Diámetro	10 m
Norma de diseño	API 650
Material	Acero al carbón

Equipo	Bombas (B01-A/B)
Tipo	Desplazamiento Positivo
Caudal de diseño	38,3 m ³ /h
Potencia	30 HP

El Tanque Skimmer (TK-02) trabaja con un caudal de ingreso constante y uniforme. En éste, se busca un nivel de líquido fijo para permitir una separación de hidrocarburo más eficiente, mediante el rebalse en una canaleta perimetral (Nivel = 4000mm) con destino al Tanque de Trasvase.

Para mantener la altura del nivel del líquido en 4 metros, lo cual permite una correcta separación de hidrocarburos, aguas debajo de las bombas B01-A/B se coloca una válvula de control tipo globo LV-02 (LV = *Level Valve*), la cual funcionará como reguladora de nivel del Tanque Skimmer (TK-02). Esta

válvula, a diferencia de los actuadores discretos como el de la XV-01, presenta sistema de acción continua que responde directamente al transmisor de nivel LT-02 (LT = Level Transmitter) del TK-02, el cual envía su señal al controlador de nivel LC-02 (LC = *Level Controller*). El LC-02 registra continuamente el nivel del tanque, teniendo acción comandada por Alto y Bajo Nivel en el TK-02 ($H = 4200\text{ mm}$ y $L = 3800\text{ mm}$).

El TK-02 es el elemento más crítico del sistema, debido a que el resto de la conducción se realiza por gravedad. Es por ello que también cuenta con un Interruptor de Nivel LS-02 con enclavamientos por Muy Alto Nivel ($LL = 5000\text{ mm}$) que ordenan el paro del motor de las bombas B01-A/B o por Muy Bajo Nivel ($LL = 3000\text{ mm}$) ordenar el Apagado de las bombas B02-A/B (perteneciente a la PTA-M) y B03-A/B (desvío desde TK-02 a TK-03), aguas abajo.

Equipo	Tanque Skimmer (TK02)
Capacidad Nominal/Neta	170 m ³ / 113 m ³
Altura Nominal/Neta	6 m / 4 m
Diámetro	6 m
Norma de diseño	API 650
Material	Acero al carbón

Equipo	Bombas (03-A/B)
Tipo	Centrífuga
Caudal de diseño	38,3 m ³ /h
Altura de diseño	10 m
Potencia	4 HP

A la salida del Tanque Skimmer se permite la derivación del flujo a dos líneas diferentes; la primera, se dirige a la siguiente unidad de tratamiento, el Separador de Placas (CPI-A/B). La segunda, hacia las bombas B03-A/B que bombean el agua de producción directo al tanque de inyección (TK-03). Como configuración típica de operación, la línea que deriva a la PTA-M se encuentra en posición normal abierta, mientras que la segunda es normal cerrada. Sin embargo, ambas líneas cuentan no sólo con válvulas exclusas y de bloqueo, si no también válvulas reguladoras con medidor de caudal a la salida, lo que permitiría generar derivaciones de flujo simultáneas y mezclas en el TK-03 si así se deseara. Como condición de diseño, todo el arreglo de válvulas de control y de exclusión en la PTA-M son manuales.

Todos los tanques API 650 son unidades que presentan un sistema de gas de *blanketing*, el cual protege al sistema del ingreso de oxígeno que, en presencia de inflamables, podrían derivar en riesgo de incendio y/o explosión.

La PTA-M está compuesta por dos trenes de tratamiento con posibilidad de vincularlos entre sí en diferentes etapas del proceso; cada uno de ellos está diseñado para operar a 19,2 m³/h y tendrán la particularidad de presentar conducción por gravedad.

Explicando el proceso de uno de los trenes, en la entrada a la PTA-M se encuentra un equipo de remoción de hidrocarburos por placas corrugadas (CPI-A/B) de la marca SumioWater (SWSCPS125), el cual tiene el objetivo de afinar aún más la remoción de éste, diseñado disminuir el contenido de materia orgánica que ingresa al tratamiento de metales. A la salida de este equipo se permite también derivar el flujo a las bombas B03-A/B, *by-passeando* las unidades posteriores de la PTA-M

Equipo	Separador (CPI) x 2
Volumen	9,9 m ³
Tiempo de residencia	20 min
Caudal de proceso	19,2 m ³ /h

La etapa de remoción de metales se realizará mediante un tratamiento centrado en la oxidación química del hierro ferroso a férrico y un tratamiento de coagulación y floculación, con posterior sedimentación y filtración del efluente. El agregado de coagulante, oxidante y ajuste de pH se realiza en un mismo tanque de coagulación (COA-A/B). Luego, el líquido continúa hacia el tanque de floculación (FLO-A/B) en donde se inyecta un polímero que permite la formación de sólidos de mayor tamaño. Ambos recipientes contienen agitación por la parte superior mediante paletas mecánicas.

Equipo	Coagulación (COA) x 2	Floculación (FLO) x 2
Capacidad	0.8 m ³	9.6 m ³
Tiempo de residencia	2.5 min	30 min
Velocidad de mezcla	135 rpm	17 rpm

Para ver cantidad de químicos a dosificar y los equipos de mezcla ver memoria de cálculo

Una vez formados los flóculos, se pasa a una unidad decantadora en donde ocurre el proceso de sedimentación de las partículas más pesadas (SED-A/B). El agua de producción ingresa por medio de una serie de orificios dispuestos en la pared vertical de entrada de las unidades.

Posterior a esto, el sistema pasa a una etapa de filtración de tres unidades con medio filtrante de arena y antracita (FIL-A/B/C), compartido por los dos trenes de tratamiento. Los tres operan continuamente, poseen válvulas manuales y controladas por operador (como recomendación para la ingeniería de detalle, se aconseja su análisis de automatización mediante temporizadores o medidores de nivel en filtros). El sistema de filtros posee un paso de lavado por flujo ascendente, que se activa cada 36 horas y dura 10 minutos. El agua utilizada para el proceso de lavado es almacenada en el tanque lavador (TKL-01) mediante una derivación de la línea colectora de agua de producción filtrada. El TKL-01 se encuentra elevado y actúa por presión hidrostática; para su llenado, se utiliza una derivación de la línea aguas debajo de las bombas B02-A/B.

Equipo	Sedimentación (SED) x 2	Filtración (FIL) x 3
Volumen (neto)	34 m ³	3,3 m ³
Caudal de proceso	19,2 m ³ /h	12,8 m ³ /h

Una vez realizado el proceso de filtración, el agua es enviada mediante las bombas B02-A/B al Tanque Inyector (TK-03) el cual tiene conexión al pozo inyector LG-PI-01 mediante las bombas B04-A/B, o bien a un cargadero que permite coleccionar agua para su utilización en el proceso de fractura hidráulica. Estas bombas, toman el efluente desde un tanque hormigonado que recolecta el efluente de los filtros. El mismo cuenta con un Interruptor de nivel LS-03 que controla a las bombas B02-A/B mediante paro por bajo nivel, y arranque de la segunda bomba por alto nivel en el sumidero.

Equipo	Tanque Inyector (TKI)
Capacidad Nominal/Neta	170 m ³ / 136 m ³
Altura	6 m
Diámetro	6 m
Norma de diseño	API 650
Material	Acero al carbón

Equipo	Bombas (B02-A/B)
Tipo	Centrífuga
Caudal de diseño	38,3 m ³ /h
Altura de diseño	10 m
Potencia	4 HP

El tanque inyector, al igual que los demás tanques, también presenta un Interruptor de Nivel LS-04 el cual, al igual que el tanque pulmón (TK-01) presenta alarmas por bajo y alto nivel, y señal de paro por alto nivel en las Bombas B01-A/B, B02-A/B y B03-A/B, y señal de paro por bajo nivel en las bombas de inyección B04-A/B.

Equipo	Bombas (B04-A/B)
Tipo	Desplazamiento Positivo
Caudal de diseño	38,3 m ³ /h
Potencia	30 HP

Adicionalmente, la planta contará con posibilidad de realizar un by-pass en dos partes del proceso. El primero de ellos deriva el flujo saliente del TK-02/Skimmer directamente al TK-03/Inyector, mientras que el segundo lo hace desde los separadores de placa CPI-01/02. Además, en caso de no llegar a los parámetros de disposición final, se habilitan líneas desde el TK-03 hacia el TK-01.

Toda la PTA (PTA-H y PTA-M) se ubicará en un recinto hormigonado de 30 centímetros de espesor, y paredes de 1.5 metros de altura en los laterales, de forma tal de obtener un volumen que permita retener todo el líquido de la planta en caso de rotura y vaciamiento total, cumpliendo así con la resolución N°785. Este recinto, además, estará impermeabilizado con una membrana PEAD de 4 mm de espesor.

Por otra parte, la gestión de lodos generados por esta planta se realizará en un recinto habilitado para tal fin por FracEnergy; la mayor parte de ellos serán originados en el Tanque Pulmón, el Tanque Skimmer, y las unidades de decantación, dado que el retro lavado de los filtros es dirigido nuevamente al inicio del proceso.

Los tanques serán limpiados siguiendo los lineamientos de la resolución N°785, la cual obliga el retiro y mantenimiento de los mismos. Por otro lado, los barros generados en el proceso de coagulación y floculación son retirados cada 24 horas mediante purga y enviado al recinto.

5.5.1. Consideraciones para el reuso

El agua almacenada en el Tanque Inyector (TK-03) puede derivarse a dos destinos diferentes; siendo el más común el destino final habilitado por la autoridad de aplicación, el cual es un pozo sumidero en el cual se inyecta agua de producción a la formación Centenario, ubicada a 1000 metros de profundidad. Pero la otra alternativa, recae en una reutilización.

Debido a que es uno de los puntos de interés de Frac Energy aumentar su reuso de agua, para la reutilización del agua de producción se plantean dos operatorias diferentes; la dilución del agua tratada con agua dulce para lograr acercarse a los parámetros de calidad de agua para la formulación de fluidos de fractura aniónicos (A), o la utilización de agua de producción tratada en mayores proporciones o inclusive completa, y fluidos de fractura catiónicos (B). **(ver apartado [Posibilidad para el reuso de agua de producción](#)).**

Para un análisis profundo de estas alternativas requiere la consideración de los siguientes criterios:

- Compatibilidad de las aguas: Mezclas podrían provocar precipitaciones imprevistas.
- Cumplir parámetros de referencia: Los fluidos de fractura utilizados deberían ser compatibles con la calidad de agua obtenida.
- Análisis de costo financiero: Comparar costos de cada implementación y también las alternativas de financiamiento.
- Análisis de costo no financiero: Considerar el valor ecológico del reuso de agua.

Los valores de referencia de calidad de agua requerida provista por el IAPG, considera la utilización de fluidos de fractura más difundidos (generalmente aniónicos), siendo este el punto de partida de comparación para las diluciones. Por otro lado, el agua utilizada normalmente para la fractura en Vaca Muerta puede provenir de tres ríos diferentes; el Limay en el sur, el Neuquén en el centro, y el Colorado en el Norte. Por cuestiones de cercanía y caudal, el río Neuquén sería en principio el agua a utilizar en el proyecto Loma Gruesa.

En la figura 5.14 se observa una representación gráfica de la gestión del agua en actividades de fractura en un yacimiento asimilable a diversos proyectos ya ejecutados en Vaca Muerta. Como se mencionó anteriormente **(ver apartados [El agua de producción](#), [El proceso de fractura hidráulica y el agua de flowback](#) y [La gestión del recurso hídrico en Vaca Muerta](#))**, este escenario plantea la falta de vinculación entre la gestión del agua para la preparación de fluidos de fractura y la gestión del agua de producción.

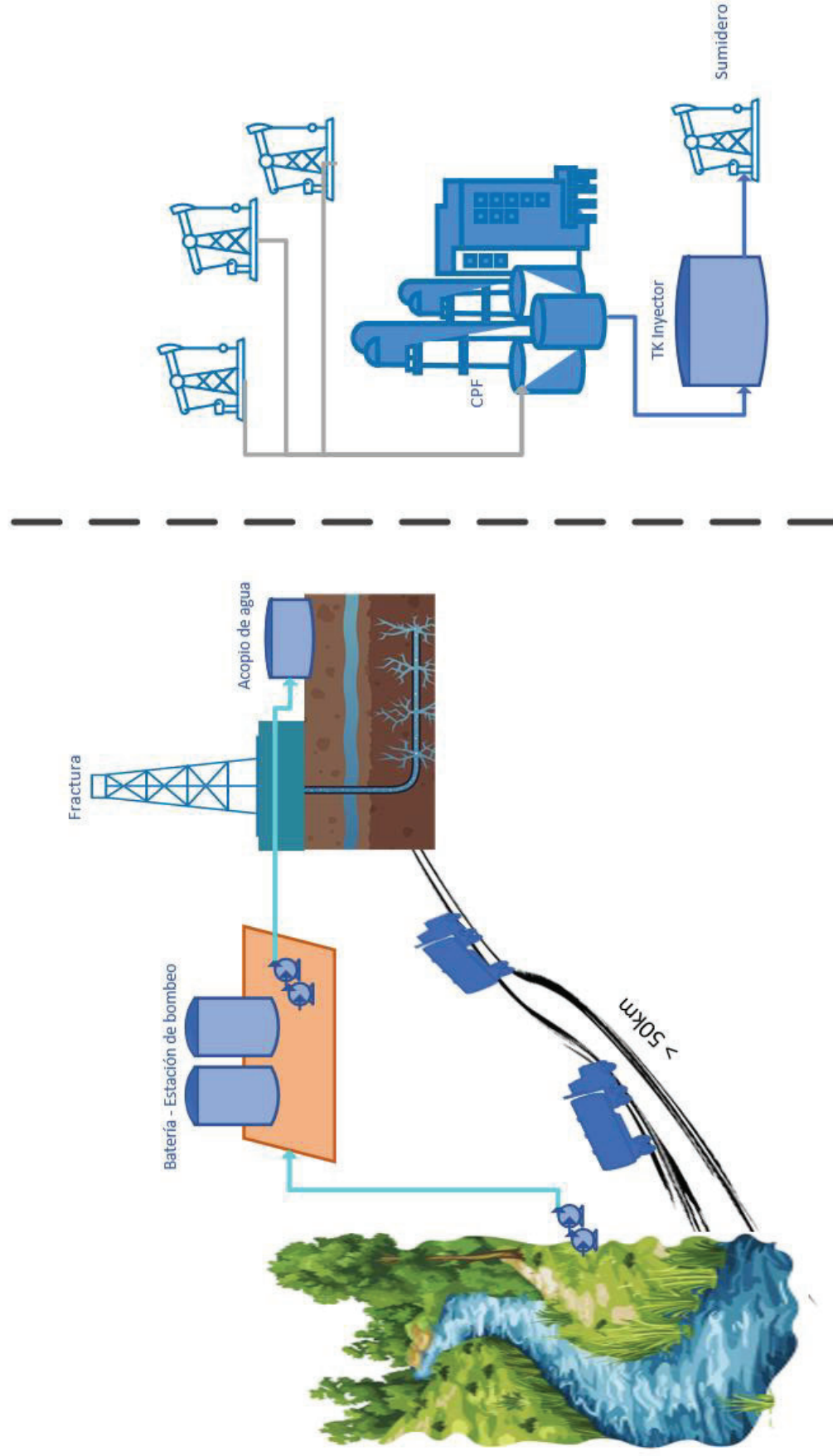


Figura 5.14: Representación gráfica del proceso de movilización de agua dulce para la preparación de fluidos de fractura y, por otro lado, el proceso de gestión del agua de producción.

Para el caso de Loma Gruesa, la adquisición de agua dulce para la preparación de fluidos de fractura requeriría el transporte de grandes volúmenes de agua por vía terrestre desde el río Neuquén, el cual se encuentra a 50 kilómetros lineales. Entre las vías de transporte posibles se incluyen camiones cisterna, y estaciones de toma de agua y bombeo mediante mangueras, con algunas estaciones de bombeo intermedias. Siendo la segunda alternativa más atractiva por acarrear un menor costo, ambas enfrentan diversos costos que dificultan el aprovisionamiento de agua para fractura.

Como una alternativa a este proceso, el presente proyecto considera el diseño de una planta de tratamiento de agua de producción con una filosofía de proceso centrada en la remoción de hierro, el principal elemento que interfiere con la conformación de fluidos de fractura hidráulica. Mediante ese tratamiento, además de permitir asegurar la remoción de metales pesados que podrían superar las concentraciones permitidas de inyección, se habilitaría la utilización de agua de producción como base acuosa para la conformación del fluido de fractura utilizando los reductores de fricción adecuados, que es aquel componente más sensible al hierro en su estado férrico **(Ver apartado [El Fluido de Fractura](#))**.

Debido a que los pozos a fracturarse se encuentran en las inmediaciones de la planta central y, por ende, cercana a la planta de agua, el transporte de agua de producción es mucho más económico que el agua proveniente del río Neuquén; por otra parte, el proceso permite disminuir el consumo de agua total del yacimiento, estando más preparada para afrontar cambios regulatorios, o períodos de sequía que se prevé incrementará a futuro por los efectos del cambio climático. En la figura 5.15 se observa una representación gráfica de este proceso.

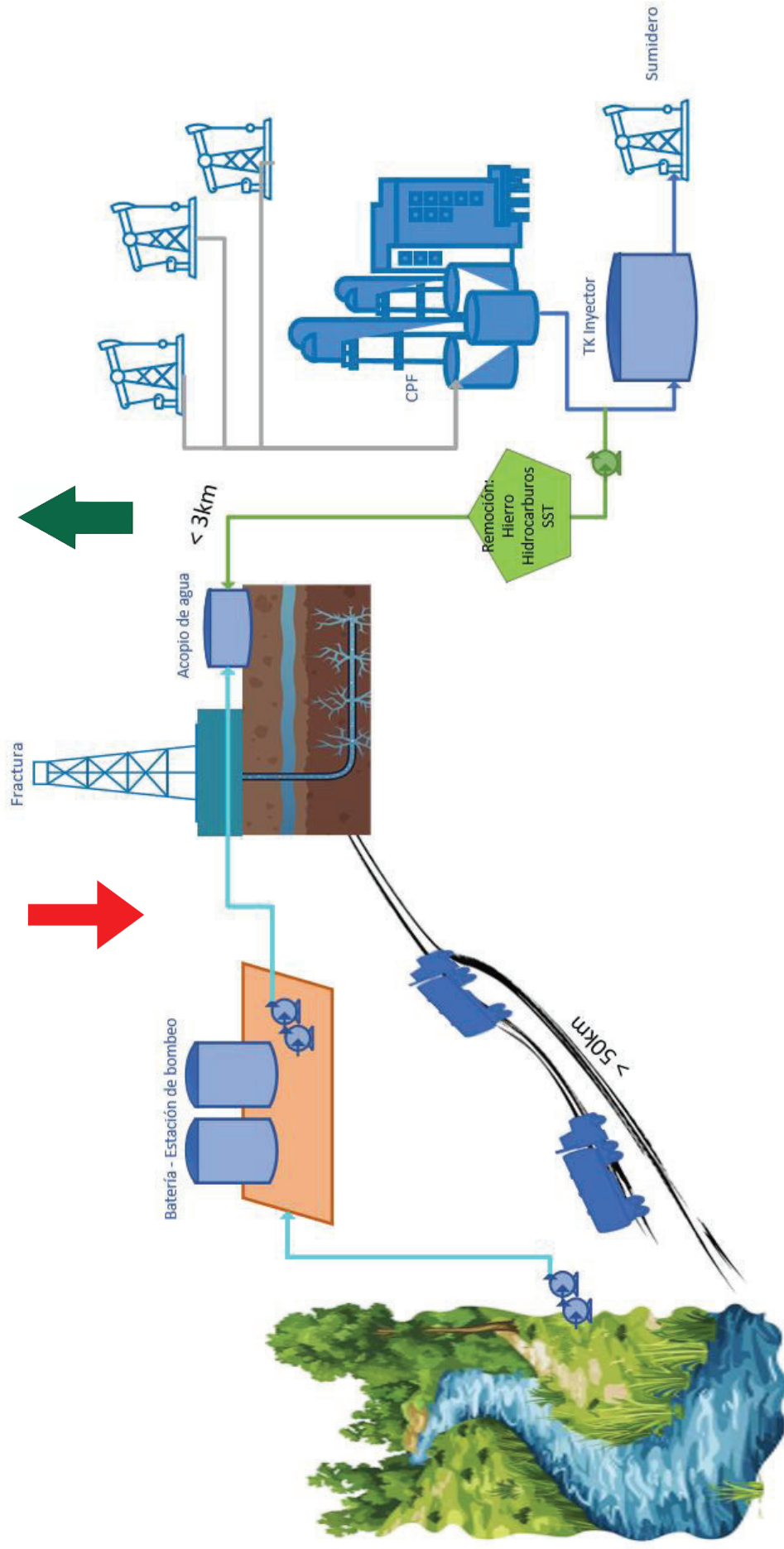


Figura 5.15: Representación gráfica del proceso de preparación de fluidos de fractura, integrando la extracción de agua dulce y el proceso de tratamiento de agua de producción.

En la siguiente tabla 5.4 se incluye un análisis de la utilización del agua de producción para actividades de fractura hidráulica, el cual responde a una simulación semicuantitativa que podría orientar el análisis.

Tabla 5.4: análisis de reuso de agua de producción para fractura hidráulica.
código de colores respecto a Guía de IAPG: Rojo: Parámetro no alcanzado. Naranja: Precaución. Amarillo:
Posible. Verde: Óptimo. Fuente: Elaboración propia⁵⁷.

Alternativas de reuso - Comparativa						
Parámetros de calidad de agua				Dilución Neuquén - Trat		
Parámetro (mg/l)	Guía	Río NQN	PTA-M	50/50	70/30	90/10
pH	6-8	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
SDT	<50.000	214	120000	60107	36150	12193
SST	<50	3	15	9	7	4
Cloruro	<30.000	7	79400	39704	23825	7946
Sulfato	<500	43	30	37	39	42
Carbonato	<600	0	0	0	0	0
Bicarbonato	<600	64	150	107	90	73
Dureza Total	<15000	113	63400	31757	19099	6442
Calcio	50-250	38	21300	10669	6417	2164
Magnesio	10-100	4	1200	602	363	124
Hierro Total	1-20	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Potasio	100-500	2	1200	601	361	122
Sodio	2000-5000	34	20700	10367	6234	2101
Boro	0-20	0	30	15	9	3
Fluido de fractura	Guía	Resultados				
FR-76	Aniónico	X				X
Excelerate - LX-3	Anfótero	X	X	X	X	X
FR-98	Catiónico	X	X	X	X	X

Considerando los parámetros fisicoquímicos del agua del río Neuquén, y aquellas esperadas posterior al tratamiento de remoción de hierro, se plantean diferentes diluciones entre agua de producción y agua del río Neuquén. Asumiendo que la compatibilidad de las aguas sea tal que su mezcla no afecte significativamente los iones recuperados, ni con una proporción 90:10 entre agua dulce y agua de producción se pueden alcanzar los parámetros guía de calidad de agua provistas por el IAPG, los cuales hacen referencia a los reductores de fricción más utilizados en Vaca Muerta. Esto quiere decir que, para poder utilizar agua de producción como fluido de fractura, es necesaria la utilización de formulados más tolerantes a concentraciones de sólidos disueltos mayores. Con ese espíritu, se incluye en la tabla un

⁵⁷ Análisis colaborativo con Juan Carlos Bonapace (Ingeniero Experto de Completaciones) y Cristian Fontana - (Director de Completaciones)

apartado de viabilidad técnica, el cual no es necesariamente representativo de la realidad pero que según expertos podría asemejarse, considerando algunos productos del mercado de la marca Halliburton.

Debido a la gran cantidad de variables a considerar, realizar un análisis de viabilidad económica de esta alternativa, específicamente en Vaca Muerta, no ha sido posible; para evaluar si económicamente es viable la práctica de utilizar agua de producción como base para la formación del fluido, deben considerarse múltiples variables, tales como:

- El costo del transporte del agua dulce desde el Río Neuquén, tanto por carrotanque como por bombeo, con sus respectivas instalaciones.
- El costo del transporte del agua de producción desde la Planta de Tratamiento.
- El costo del tratamiento del agua de producción.
- El costo de los diferentes tipos de reductores de fricción en el mercado.
- La dosificación necesaria de cada compuesto utilizado para conformar el fluido de fractura.
- El rendimiento por unidad monetaria del formulado para la fractura hidráulica.
- Los tiempos requeridos para la conformación del fluido, lo cual podría suponer una menor cantidad de etapas de fractura por día.

Sin embargo, es importante considerar que, debido a otros factores tales como la posibilidad de sequías, la imposibilidad del traslado del agua a grandes distancias y por distintos bloques concesionados a otras operadoras, condiciones climáticas adversas, factores regulatorios futuros, y los objetivos ambientales de la empresa en pos de ganar actuaciones en materia de sostenibilidad empresarial, esta práctica no debe analizarse únicamente desde un punto de vista económico de la actividad en sí misma. Además, si bien la utilización de formulados de mayor costo encarecería el proceso de fractura hidráulica, éste no sería el único caso a considerar dentro del proceso de construcción de un pozo No Convencional, dado que además se requieren incurrir en otros gastos fijos relacionados con los equipos de torre, la perforación, el armado de lodos de perforación, y la utilización de arenas como agente sostén, las cuales son traídas en la mayoría de los casos desde el río Paraná, en Entre Ríos.

Por otra parte, la calidad de agua obtenida posterior al tratamiento podría utilizarse para otros usos, como la preparación de lodos de perforación base agua en las etapas finales de la perforación, en donde ya no se encuentran acuíferos. Otras alternativas de reúso del agua de producción podrían requerir tratamientos más profundos, como la ósmosis inversa y las resinas ablandadoras de intercambio iónico; además, es posible que aplicaciones de técnicas de electrocoagulación pudiesen también contribuir en el ablandamiento y la disminución de los sólidos disueltos totales remanentes en el agua de producción de Vaca Muerta. Si bien estas alternativas no serán contempladas en el presente proyecto, se recomienda su evaluación como posibles proyectos de expansión del diseño actual, dado que potencialmente podrían ser atractivas.

5.6. Memoria de cálculo del tratamiento de agua de producción

En el presente apartado se desarrollará la memoria de cálculos de ingeniería mínimos y necesarios para la realización de un presupuesto, teniendo un estadio de ingeniería básica. Para la correcta ejecución del mismo es necesario pasar por una revisión de la ingeniería presente en este informe, y la conformación de la ingeniería de detalle.

5.6.1. Tanque Pulmón (API 650)

Para el dimensionamiento de un tanque en base al estándar API, se requiere primero establecer un volumen mínimo requerido (V_{neto}). La definición de este volumen depende del uso que se le dará al tanque. Para el tanque pulmón, el cual funcionará como un ecualizador de todos los ingresos de la CPF, normalmente se suelen adoptar tiempos de residencia entre 8 y 12 horas; sin embargo, una estimación mucho más precisa puede lograrse conociendo la variación de caudal de entrada (Q_e) en función del tiempo para una operación similar a la que se busca generar. Para este punto, no se considera el crudo que puede ingresar al tanque, dado que el diseño de la CPF aseguraría una entrada menor al 5% del volumen total.

Inicialmente, se calcula el caudal medio (Q_m) a partir de los datos de ingreso; este valor de caudal será con el cual operaría la bomba normalmente. Luego, se calcula el volumen acumulado por hora que ingresaría en base a la generación del efluente (V_{ar}), y el volumen promedio acumulado por hora que saldría del ecualizador (V_{am}). Una vez obtenidos el V_{ar} y el V_{am} , se calcula la diferencia entre estos valores para cada franja temporal; tanto la diferencia máxima (ΔV_{max}) como la mínima (ΔV_{min}) se utilizan para el dimensionamiento de la unidad (tabla 5.5) (para más información ver [apartado 11.3 del anexo](#)).

Tabla 5.5: Parámetros requeridos para el cálculo del volumen neto del tanque pulmón

Parámetro	Dato	Unidad
Caudal medio de salida (Q_{med})	919,8	m ³ /d
ΔV_{min}	-51,61	m ³
ΔV_{max}	371,3	m ³
Margen de seguridad	20	%

En base a estas variables se calcula el volumen mínimo requerido del tanque (V_{neto}) (Ecuación 5.1)

$$V_{\text{neto}} = (|\Delta V_{\text{min}}| + \Delta V_{\text{max}}) \cdot 1,2 = 507 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Una vez obtenido V_{neto} , se prosigue estimando el volumen nominal del tanque (V_{Nom}). El mismo se obtiene mediante la siguiente ecuación 5.2

$$V_{\text{nom}} = (H_1 + H_2 + h_t) \cdot A + V_{\text{min-req}} + V_2 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

En donde:

- H_1 : Altura muerta del tanque (m). Se considera como $\frac{5}{2}$ el diámetro interno del ducto de salida + 75 mm extras, con un valor mínimo de 600 mm.
- H_2 : Altura del espacio de vapor/nivel máximo de trabajo seguro (m), definida como $\frac{3}{2}$ el Radio hidráulico ($R/2$ para tuberías de sección circular), con un mínimo de 450 mm.
- h_t : Que es definido como la diferencia entre los niveles de altura mínima/máxima del líquido necesarias para generar alarmas por Bajo o Alto Nivel, o bien sistemas de paro de equipos externos por Muy Bajo o Muy Alto Nivel. Este parámetro se relaciona con el tiempo que tiene el operario para responder al comando en sala de control y existe una fórmula empírica para su estimación (Ec. 5.3)

$$h_t = \frac{0,04 V_{\text{min-req}}}{\pi D^2} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

- A : Área del tanque (Dimensión circular) en m^2
- V_2 : Volumen de líquido bombeado fuera del tanque en 3 minutos (m^3), considerado en este tiempo por ser un tiempo mínimo de respuesta de operador de sala de control.

En la siguiente tabla 5.6, se enumeran los parámetros generales del dimensionamiento del tanque calculados/adoptados. Cabe destacar que se decide redondear los parámetros de altura y diámetro en base a la tabla 11.5.1 del anexo.

tabla 5.6: dimensiones calculadas y adoptadas del tanque pulmón

Parámetro	Status	Dato	Unidad
$V_{\text{min-neto}}$	Calculado	507	m ³
Diámetro	Adoptado	10	m
Diámetro cañería salida	Adoptado	80	mm
Área	Calculado	78,5	m ²
H_1	Calculado	0,6	m
H_2	Calculado	0,48	m
h_t	Calculado	0,26	m
V_2	Dato	1,9	m ³
Altura total del tanque H calculada	Calculado	7,57	m
Volumen Nominal (V_{nom}) calculado	Calculado	617	m ³
Altura total del tanque H_T adoptados	Adoptado	8	m
Volumen Nominal (V_{nom}) adoptados	Adoptado	628	m ³

Niveles dentro del tanque

El tanque contiene sensores de alto y bajo nivel, con alarmas de alerta y emergencia:

- LL: Muy bajo nivel en el tanque (Low-Low Liquid Level): Por diseño, se define como la altura muerta (H_1)
- L: Bajo nivel en el tanque (Low Liquid Level): Por diseño, se define como la sumatoria de la altura muerta (H_1) más la altura del líquido en tres minutos de succión (h_t) (Ec 5.4):

$$L = H_1 + h_t \text{ (Ec. 5.4)}$$

- H: Alto nivel en el tanque (High Liquid Level): Se calcula como la diferencia entre la altura total del tanque (H_T) y la sumatoria de la altura del espacio de vapor/nivel máximo de trabajo seguro (H_2) y el margen de aviso de alarma (h_t) definido en la Ec. 5.3

$$H = H_T - H_2 - h_t \text{ (Ec. 5.5)}$$

- HH: Muy alto nivel en el tanque (High-High Liquid Level): Se calcula como la diferencia entre la altura total del tanque y la altura del espacio de vapor (H_2)

A continuación, se expresa en la siguiente tabla 5.7 los niveles de trabajo del tanque y, en base a ellos, la altura y volumen neto calculados (es decir, el volumen operativo). Este último se obtiene mediante la ecuación 5.6, y cumple la condición de ser mayor al Volumen Neto calculado por el método de normalización de caudal de salida en base al caudal variable de entrada descrito anteriormente.

Tabla 5.7. Niveles operativos del tanque pulmón

Parámetro	Unidad	Calculado	Adoptado
LL	m	0,6	1
L	m	0,9	1,5
H	m	7,26	7,2
HH	m	7,52	7,5
H_{neto}	m	-	6,5
$V_{neto-final}$	m ³	507	510
t_{rh}	h	13,2	14

$$H_{neto} = H_T - H_1 - H_2 = 8\text{ m} - 1\text{ m} - 0,5\text{ m} = 6,5\text{ m} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Espesores del tanque

Los tanques API se confeccionan con láminas de acero al carbono, las cuales deben cumplir un mínimo de espesor tal, que pueda soportar la presión hidrostática asumiendo un llenado completo de la columna de agua. Esto es válido para las paredes, el techo y el fondo del mismo. Para todos estos límites la norma API 650 en su edición 2020 establece valores mínimos y máximos, así como también metodologías de cálculo basadas en ecuaciones empíricas⁵⁸.

En la siguiente tabla 5.8, se incorporan los valores calculados para el caso de estudio, considerando como material un acero al carbono tipo A131 Grado A el cual presenta un Esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática (St) de 1750 kg/cm², siendo este parámetro una propiedad del material. Para el caso de las paredes laterales, los estándares recomiendan una reducción progresiva del grosor de las mismas a medida que la altura del tanque aumenta, siempre y cuando supere los 4,76 mm mínimos.

⁵⁸ American Petroleum Institute. (2020). *API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage* (13th ed.). Washington, DC: API Publishing Services.

tabla 5.8: Espesores mínimos del tanque pulmón según API 650

Parámetro	Ecuación	Mínimo	Calculado	Adoptado
Pared lateral inferior	$t_t = \frac{0,00005 \cdot D \cdot (H - 30,48)}{S_t + CA}$	4,76 mm	2,27 mm	6 mm
Techo del tanque	$t_t = \frac{D}{4800 \cdot \text{sen}(\theta)} + CA$	4,76 mm	4,76 mm	6 mm
Fondo del tanque	En base a tabla ⁵⁹	6,3 mm	-	6,3 mm

En donde:

- t_t = espesor de la prueba hidrostática (mm)
- D: Diámetro del tanque (cm)
- H: Altura del nivel del líquido (cm)
- CA: Corrosión admisible (asumida en 0,6 mm)
- S_t : Esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática (kg/cm²)
- θ : ángulo cónico del techo desde la horizontal (asumido en 30°)

Si bien este proceso debería realizarse para cada lámina utilizada para la construcción, reduciendo paulatinamente el espesor a medida que se consideran las partes más altas del tanque (figura 5.19); sin embargo se desestima este cálculo debido a que el espesor de la lámina inferior calculado es menor al mínimo recomendado por API.

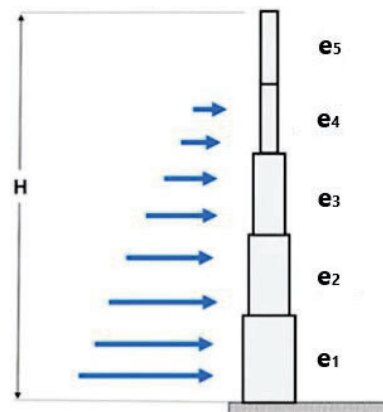


figura 5.19: representación gráfica de las fuerzas hidrostáticas aplicadas sobre las paredes del tanque

⁵⁹ American Petroleum Institute. (2020). *API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage* (13th ed.). Washington, DC: API Publishing Services - Tabla 2.1 Espesor mínimo del fondo (milímetros) - Diseño y Cálculo de Tanques de Almacenamiento basado en API 650.

Para el tanque pulmón, el cual funcionará como un ecualizador y tendrá entradas de caudal variable en función de la producción que provenga de los pozos y de otras partes del proceso de la planta, se instalará una unidad de *skimmer* que funciona por flotación (ver figura 5.20). El elegido para el presente proyecto es el SK1000 AIPL de la marca Ecoway. Independientemente de esta remoción superficial, debido al alto volumen de líquido heterogéneo que ingresa a esta unidad no se asume una eficiencia de remoción de hidrocarburos de la fase acuosa.



Figura 5.20 Skimmer SK1000 AIPL de Ecoway

Equipo de Bombeo

Debido a que el fluido presenta cierta viscosidad, y además es beneficioso para considerar futuras ampliaciones de la planta, se decide optar por una bomba de desplazamiento positivo del tipo tornillo excéntrico [BORNEMANN SL 180-40](#), la cual permite tratar 180 galones por minuto ($40 \text{ m}^3/\text{h}$) con un consumo de 40 HP (figura 5.21).

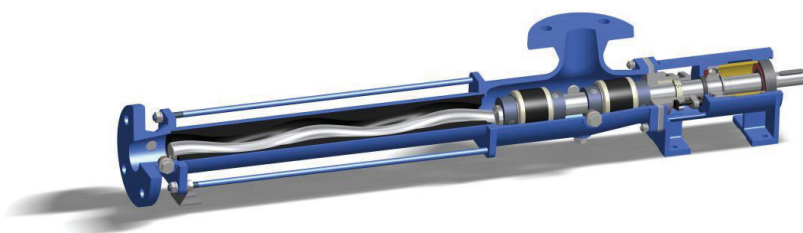


Figura 5.21: Bomba Bornemann tornillo excéntrico

5.6.2. Tanque Skimmer (API 650)

Debido a que el tanque Skimmer es un tanque de separación, el volumen mínimo requerido o volumen neto (V_N) se obtiene mediante la adopción de un tiempo de residencia adecuado para permitir la flotación. Para establecer dicho tiempo de residencia, existen múltiples fuentes; por ejemplo, la cátedra de Procesos Físicoquímicos en Ingeniería Ambiental menciona que un tiempo de residencia adecuado para cámaras de flotación simple se encuentra entre 5 y 20 minutos.

Para el caso de la industria del petróleo y gas, el tiempo de residencia adoptado puede variar en función del diseño de la planta. Según expertos en diseño de plantas de tratamiento de agua de producción los cuales fueron consultados⁶⁰ para la elaboración del presente proyecto, el tiempo de residencia adoptado debería ser como mínimo de 1 hora, y como máximo hasta la mitad del tiempo de residencia del tanque pulmón si sólo se busca que separe hidrocarburos por rebalse. También, es usual tomar tiempos de residencias más altos porque estas unidades pueden utilizarse como un by-pass del tanque pulmón para cortos períodos de tiempo. Siguiendo la recomendación, se adopta un tiempo de residencia hidráulico de 3 horas para el volumen neto (V_{neto}) del tanque, el cual se define en **115 m³**.

En base a este valor, se calcula el volumen nominal (V_{nom}) en base a la ecuación 5.2, definido en **153 m³**. Asumiendo un diámetro (D) de 6 m, se obtiene una altura calculada (H) de 5,41 m.

Por cuestiones de diseño, se adopta un diámetro y altura en base a bibliografía [\(Ver tabla 11.5.1 del anexo\)](#), recalculando así los valores obtenidos (tabla 5.9)

tabla 5.9: parámetros adoptados para el diseño del tanque skimmer

Parámetro	Unidad	Calculado	Adoptado
Volumen nominal (V_{nom})	m ³	153	170
Diámetro (D)	m	6*	6
Altura (H)	m	5,4	6

Niveles dentro del tanque

Debido a que es crucial que nivel del líquido se mantenga constante, se adoptan los niveles operativos del tanque en base a recomendaciones de ambos expertos (tabla 5.10).

⁶⁰Ricardo Delgado (Senior Mánager de proyectos de Facilidades Corporativo)

La mayor parte del tiempo funcionará como un tanque de caudal de ingreso y egreso constante, manteniendo un tiempo de retención hidráulico de 3 horas. Esto nos dejaría con un nivel de pelo de agua (H_{ph}) de **4 metros**.

Tabla 5.10: Niveles operativos del tanque skimmer

Parámetro	Unidad	Adoptado
LL	m	3
L	m	3,8
H	m	4,2
HH	m	5
H_{neto}	m	4
$V_{neto-final}$	m ³	115
t_{rh}	h	3

Espesores del tanque

Al igual que el tanque pulmón, al aplicar el cálculo de espesores mínimos se determina que, como mínimo, se requiere adoptar el espesor recomendado por API 650, fijado en 4,76 mm para las paredes laterales y 6,3 mm para el fondo, eligiendo 6,3 mm en todos los casos.

Remoción de hidrocarburos

Tomando en cuenta la eficiencia recomendada por Metcalf & Eddy, se asume una eficiencia de remoción de hidrocarburos presentes en la fase acuosa de 54%, siendo una adopción conservadora debido a que los hidrocarburos son de alto grado API, permitiendo una mejor separación que hidrocarburos más pesados al tener mayor flotabilidad y menos generación de emulsiones. Por otro lado, el contenido de barro removido será muy bajo debido a una baja presencia, así como también alto grado coloidal.

Unidad	η SST (%)	η HTP (%)	SST (mg/l)	HTP (mg/l)
Skimmer	15%	54%	136	304

5.6.3. Separador de Placa Corrugada

Para el diseño/elección de esta unidad se considerará el documento “Environmental Guidelines for Water Discharges from Petroleum Industry Sites in New Zealand”⁶¹, el cual fue preparado por un equipo de trabajo del ministerio de ambiente de Nueva Zelanda en conjunto con empresas del sector y considerando estándares de la American Petroleum Institute, particularmente la norma 421.

A diferencia de los separadores API convencionales, para esta clase de separadores “es difícil, sino imposible, especificar un procedimiento detallado para el diseño de sistemas de placas paralelas”. Independientemente de que existen parámetros típicos para el diseño básico de un separador de placas corrugadas (figura 5.22), estos solo pueden ser justificados y validados empíricamente. Debido a que son los propios fabricantes los que determinan empíricamente ciertos parámetros, en general “La experiencia del proveedor es la mejor base para elegir la configuración adecuada”⁶².

Variable	Range
Perpendicular distance between plates	2-4 cm
Angle of plate inclination from the horizontal	45° - 60°
Type of oil removed	Free oil only
Direction of wastewater flow	Crossflow, downflow

Figura 5.22: Rangos típicos de diseño para separadores de placa paralelas. Fuente: Monographs on Refinery Environmental Control Management of Water Discharges

Lineamientos generales

Como lineamiento general para especificar al proveedor más parámetros de diseño, se decide calcular aquellos parámetros relevantes para la selección del equipo. Comenzando con este proceso, se calcula la velocidad ascensional de las gotas de hidrocarburos en base a la Ley de Stokes Ec. 5.7).

$$V_a = \frac{g}{18 \mu} (S_w - S_o) D^2 \quad (\text{Ec 5.7})$$

En donde:

- S_w : Gravedad específica del agua adimensional = 1
- S_o : Gravedad específica del hidrocarburo adimensional = 0,78 (ver apartado [Caso de Estudio - Frac Energy](#))
- V_a : Velocidad ascensional
- D : diámetro de la gota de hidrocarburo, asumida en 60 micrones.

⁶¹ https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/water-discharges-guidelines-dec98_0.pdf

⁶² U.S. EPA (s.f.). Wastewater Treatment Technologies. Recuperado de: <https://p2infohouse.org/ref/39/38606.pdf> - Page 33

- μ : Viscosidad absoluta del agua de producción = 0,01103 g/cm. s

Para este caso, obtenemos una velocidad ascensional de 2 m/h. Luego, se calcula el área superficial teórica mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{Q}{V_t} = \frac{19,2 \frac{m^3}{h}}{2 \frac{m}{h}} = 9,4 \text{ m}^2$$

Esta es una de las especificaciones que normalmente se le informa a un proveedor para la elección del equipo adecuado.

Número de placas

La cantidad de placas paralelas a incorporar dentro del separador dependerá de la superficie específica de las mismas; por ese motivo, las placas corrugadas suelen ser las más adoptadas para el diseño de separadores CPI.

A modo de ejemplo, se procede a calcular un número de placas teórico asumiendo placas planas de 0,5m x 1m ($A_p = 0,50 \text{ m}^2$), con una inclinación α de 60° y una separación entre placas de 3 cm⁶³.

Para calcular el número de placas teórico, se calcula el área horizontal proyectada por placa (A_y) (Ec. 5.8)

$$A_y = A_p \cdot \cos(\alpha) = 0,26 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Luego, el número de placas se calcula mediante el cociente entre el área superficial teórica y el área horizontal proyectada por placa (A_y) (Ec. 5.9)

$$N^\circ \text{Placas} = \frac{9,4 \text{ m}^2}{0,26 \text{ m}^2} = 37,6 \approx 36 \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Verificación de flujo laminar entre placas

Para asegurarse de que el diseño de placas es compatible con los procesos de separación de hidrocarburo, es necesario verificar el tipo de flujo entre las placas. Para ello, se debe obtener un tipo de flujo laminar (Número de Reynolds $Re < 2300$) (Ec. 5.10)

⁶³ American Petroleum Institute. (1990). *API Recommended Practice 421: Design and Operation of Oil–Water Separators*. Washington, DC: API Publishing Services

$$Re = \frac{D_h \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 5.10})$$

En donde:

- D_h : Diámetro hidráulico en metros. Para ductos rectangulares, se calcula bajo la siguiente expresión:

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} \text{ siendo } a \text{ y } b \text{ los lados del rectángulo}$$

- v : Velocidad del fluido en m/s. Se calcula como el cociente entre el caudal unitario por placa y el área transversal (A_t) de cada placa:

$$v = \frac{Q}{N^{\circ} \text{placas} \cdot A_t}$$

A_t considera el ancho de la placa (50cm) y la distancia entre las mismas (2cm)

- ρ : densidad del fluido (1,098 kg/m³) y μ : viscosidad del fluido (0,01 kg/m.s).

Aplicando la ecuación 5.10 se obtiene un **Re de 999,8**, por lo que se verifica el flujo laminar.

Separador de Placas seleccionado

Para el presente proyecto, se decidió adquirir dos separadores CPI “llave en mano” de la marca SumioWater, específicamente el modelo [SWSCPS125](#) (figura 5.23). El mismo es capaz de tratar un caudal de hasta 28 m³/h.



Figura 5.23: Separador de placas corrugadas SumioWater.

5.6.4. Coagulación - Floculación

Para el diseño de estas unidades se consideran dos sistemas idénticos trabajando en paralelo, con la posibilidad de operar con un único sistema para el mantenimiento del otro. Para el diseño de estas unidades, se tomarán las referencias del manual ENOHSA⁶⁴ (Ente Nacional de Obras Hídricas y Saneamiento).

El sistema contará de dos unidades de agitación mecánica de geometría circular, los cuales deben respetar ciertas dimensiones para asegurar una condición de mezcla de coagulador y formación de flocs en base a parámetros bibliográficos.

A continuación, se considerará el diseño para una de las líneas paralelas (**Caudal (Q) = 19,2 m³/h**).

Dimensiones de las unidades

Para diseñar el tanque de coagulación, se asume un tiempo de retención hidráulico (t_{rh}) definido por bibliografía de 150 segundos (entre 30 y 180 segundos). A partir de este, se calcula el volumen (V_{coag}) de la unidad a partir de la siguiente ecuación 5.11

$$V = Q \cdot t_{rh} = 19,2 \frac{m^3}{h} \cdot 150 s \cdot \frac{1h}{3600 s} = 0,8 m^3 \quad (\text{Ec. 5.11})$$

A partir de este volumen, se adopta una geometría cilíndrica y una altura (H) de 1 m, pudiendo despejar así el diámetro de la unidad (Ec. 5.12)

$$D_T = \sqrt{\frac{V \cdot 4}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{0,8 m^3 \cdot 4}{\pi \cdot 1 m}} \simeq 1 m \quad (\text{Ec. 5.12})$$

Aplicando las mismas ecuaciones 5.11 y 5.12 para la unidad de floculación asumiendo un t_{rh} de **20 min** y **H** de **2 m**, se obtiene un V_{floc} de **9,6 m³** con un diámetro D_T de **2 m**.

Una vez obtenidas las dimensiones de ambas unidades, se procede a calcular las dimensiones que deben ocupar los agitadores dentro de las mismas para asegurar un correcto proceso de mezcla y floculación. Para ello, ENOHSA enumera ciertas relaciones entre las dimensiones del tanque y el mezclador (tabla 5.11), representadas en la siguiente figura 5.24.

⁶⁴ ENOHSA (2000). *Manual de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Buenos Aires: Secretaría de Obras Públicas. - Criterio 5

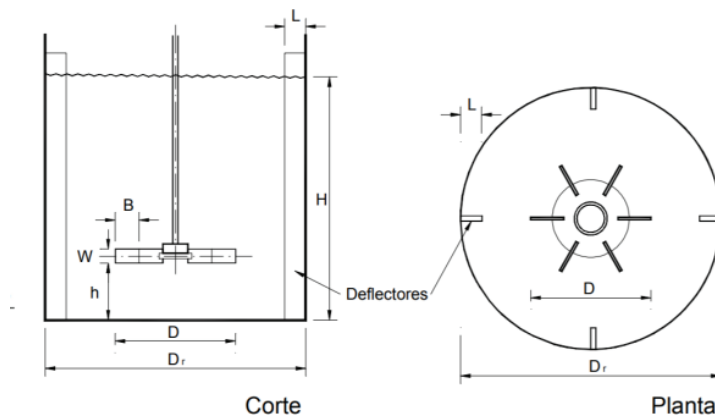


Figura 5.24: Vista en corte y en planta del tanque coagulador y floculación, los cuales respetarán las mismas geometrías (el floculador no tendrá baffles).

En donde:

- W: Ancho de cada paleta (m)
- B: Largo de cada paleta (m)
- h: distancia entre la paleta y el fondo del tanque (m)
- D: diámetro del mezclador (m)
- L: Baffles internos (se utilizan únicamente en equipos de coagulación para eliminar la generación de vórtices que disminuyen el efecto de mezcla deseado).

Tabla 5.11: relaciones a respetar entre las unidades y el mezclador. Fuente: Cátedra de PFQ en IA – UNSAM

Coagulación	Floculación
$2,7 \leq \frac{D_T}{D} \leq 3,3$	$2 \leq \frac{D_T}{D} \leq 6,6$
$2,7 \leq \frac{H}{D} \leq 3,9$	$2,7 \leq \frac{H}{D} \leq 3,9$
$0,75 \leq \frac{h}{D} \leq 1,3$	$0,9 \leq \frac{h}{D} \leq 1,1$
$W = \frac{D}{5}$	$W = \frac{D}{8}$
$B = \frac{D}{4}$	$B = \frac{D}{4}$
$L = \frac{D_T}{10}$	-

En la siguiente tabla se resumen las dimensiones adoptadas para ambas unidades (tabla 5.12)

tabla 5.12: resumen de los parámetros calculados y validados para los tanques de coagulación y floculación

Parámetro	Dato (Coagulación)	Dato (Floculación)
Volumen (V en m ³)	0,64	6,4
Tiempo de retención (t _{rh} en min)	2	20
Diámetro Total (DT en m)	0,9	2
Altura (H en m)	1	2
Baffle (L en m)	0,1	-
Diámetro mezclador (D en m)	0,3	0,7
Largo de paleta (B en m)	0,1	-
Ancho de paleta (W en m)	0,07	0,1
Altura del mezclador (h en m)	0,3	0,75
D _T /D	3	2,9
H/D	3,3	2,9
h/D	1	1,1

Equipamientos de mezcla

Para definir los parámetros operacionales, siempre es recomendable partir de ensayos Jar-Test provistos a nivel laboratorio. Independientemente de esto, existen gradientes de velocidades ($G \frac{1}{s}$) que pueden adoptarse por bibliografía. Para el caso de la Coagulación, varía entre 300 y 1200 $\frac{1}{s}$; para floculación, este valor disminuye a entre 10 y 70 $\frac{1}{s}$. Para el diseño en esta etapa, se asumen los parámetros del Jar Test de Nadella⁶⁵ el cual utilizó cloruro férrico (FeCl₃) como ayudante en la coagulación ante falta de concentración intrínseca de hierro; para los gradientes de velocidad obtuvo los mejores rendimientos a 586 $\frac{1}{s}$ para coagulación y 28 $\frac{1}{s}$ para floculación.

En base a estos gradientes, se puede obtener la potencia entregada al líquido mediante la ecuación de Camp-Stein (Ec. 5.13). Este parámetro es un buen indicador para estimar el grado de mezcla, dado que a mayor potencia existen mayores niveles de agitación.

⁶⁵ Nadella et. Al (2020) - Fit-for-purpose treatment of produced water with iron and polymeric flocculant for reuse in hydraulic fracturing. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31786393/>

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \text{ (Ec. 5.13)}$$

Una vez se obtiene la potencia para cada unidad, se pueden obtener las revoluciones por minuto a entregar en base a la ecuación de Uhl-Gray (Ec. 5.14).

$$P = K \cdot \rho \cdot D^5 \cdot n^3 \text{ (Ec. 5.14)}$$

En donde:

- K: Constante del impulsor mecánico (depende del mezclador utilizado).
 - Se adopta un K = 5 para el mezclador de la coagulación (tipo axial).
 - Se adopta un K = 1 para el mezclador de la floculación (tipo radial).
- ρ : Densidad del líquido (asumido equivalente a la del agua).
- D: diámetro del mezclador.
- n: revoluciones por minuto.

Resolviendo las ecuaciones 5.13 y 5.14, se obtienen los siguientes parámetros operativos (tabla 5.13)

tabla 5.13: parámetros operativos de los equipos de mezcla

Parámetro	Dato (Coagulación)	Dato (Floculación)
Gradiente (G en s ⁻¹)	586	28
Constante del impulsor (K)	5	0,75
Potencia entregada (P en Watts)	210	4,8
Revoluciones (n en rev/min)	155	20

Dosificación de químicos

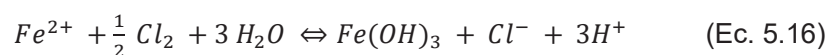
Los químicos implicados en esta etapa del tratamiento son: coagulantes, floculantes, oxidantes y reguladores de pH. Cada uno de ellos tendrá su propia dosificación para lograr el tratamiento adecuado. Debido a falta de sustento bibliográfico, es fuertemente recomendado continuar con las pruebas a nivel laboratorio para lograr obtener una dosificación más representativa del agua de producción de Vaca Muerta. De todas formas, en este presente apartado se estiman las dosificaciones en base a criterios bibliográficos y el análisis fisicoquímico del efluente.

Coagulantes y Floculantes: Según referencia bibliográfica⁶⁶, dado que el hierro contenido en solución puede no ser suficiente como para actuar como coagulante, podría ser necesaria una dosificación adicional de Cloruro Férrico para permitir una mayor formación de hidróxido férrico en suficiente cantidad coloidal, de manera tal que permita la absorción de metales pesados y la formación de flocs mediante la adición de un floculante. Sin embargo, debe considerarse que la concentración de hierro en la muestra del agua de producción de Texas (40 mg/L) era la mitad al agua de Vaca Muerta (80 mg/L), por lo que esta dosis necesaria podría verse reducida. Por otro lado, continuando con la recomendación bibliográfica y por la experiencia de FracEnergy, el floculante a utilizar será una poliacrilamida a razón de 1mg/L. Para este proceso, el máximo rendimiento obtenido fue a un pH de 8.5; según información de la cátedra de Procesos Físicoquímicos en Ingeniería Ambiental, el Cloruro Férrico funciona a pH entre 3.5 y 7, y luego con pH mayores a 8.

Asumiendo una dosis mínima de 80 mg/L de Cloruro Férrico y considerando un caudal de 38,3 m³/h, **se requeriría una dosis de 3,1 kg/h.**

Por otro lado, considerando una dosis mínima de 1 mg/L de poliacrilamida y considerando un caudal de 38,3 m³/h, **se requeriría una dosis de 40 g/h.**

Oxidación: La oxidación del hierro (II) a hierro (III) para este proceso de tratamiento se realizará mediante la adición de un oxidante. Por motivos de seguridad de procesos, se recomienda no insuflar oxígeno debido a que el efluente presenta gases volátiles. Por este motivo, la oxidación será completamente química. A continuación, se proponen las dos alternativas de uso disponibles.



La dosificación del oxidante dependerá de la concentración de hierro, así como también de otras especies susceptibles a ser oxidadas. Según los estudios fisicoquímicos realizados (**ver apartado Caracterización del agua de producción de Loma Gruesa**) además del hidrocarburo remanente en solución después del tratamiento convencional, existe presencia de amoníaco y manganeso que también contribuyen a la demanda química de oxígeno. De todas formas, si bien estos compuestos son susceptibles de oxidación y podrían competir con el hierro por el oxidante en solución, el hierro es el componente más susceptible a oxidarse desde un punto de vista termodinámico y cinético.

⁶⁶ Nadella et. Al (2020) - Fit-for-purpose treatment of produced water with iron and polymeric flocculant for reuse in hydraulic fracturing. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31786393/>

Para saber la dosificación necesaria, ENOHSA provee una estequiometría recomendada para la remoción de hierro en base a Oxígeno y Cloro (tabla 5.14).

Tabla 5.14: Relación estequiométrica para la remoción de hierro y manganeso⁶⁷

Tipo de reacción	Relación estequiométrica (mg/l de Fe o Mn removido por cada 1 mg/l de oxidante)	
	Hierro	Manganeso
Oxidación de Hierro II o Manganeso II con Oxígeno		
- oxígeno requerido (O ₂)	0,14	0,29
- iones de H producidos (H ⁺)	0,04	0,04
- alcalinidad consumida (CaCO ₃)	1,8	1,8
Oxidación de Hierro II o Manganeso II con Cloro		
- cloro requerido (Cl ₂)	0,64	1,29
- iones de H producidos (H ⁺)	0,05	0,07
- alcalinidad consumida (CaCO ₃)	2,7	3,64

En base a la relación de oxidante, $0,64 \frac{g Fe}{g Cl_2}$ y considerando el caudal Q_m por unidad (19,2 m³/h) y la concentración de hierro ferroso ($62 \frac{g Fe}{m^3}$), se estima la dosificación necesaria (Ec 5.17). Para el caso de Hipoclorito de Sodio, se asume una dosificación equivalente puesto que el Mr de ambos compuestos es muy similar, y comparten relación estequiométrica en la reacción de oxidación.

$$19,2 \frac{m^3}{h} \cdot 62 \frac{g Fe}{m^3} / 0,64 \frac{g Fe}{g Cl_2} = 1860 \frac{g Cl_2}{h} \Rightarrow 44,6 \frac{kg Cl_2}{d} \quad (\text{Ec. 5.17})$$

Esto sería equivalente a dosificar un total de 44,6 kg de cloro concentrado por día. Dado que el cloro suele obtenerse en un 60%, se asumen unos **74 kg de producto**.

Como consideración, este proceso producirá un aumento de pH que debe considerarse para el ajuste del mismo para el proceso de coagulación - floculación.

Ajuste de pH: Para lograr la precipitación de hidróxido férrico y el resto de metales, es necesario mantener como mínimo un pH de entre 6 y 7. El efluente normalmente tiene un pH de 6, por lo que es necesario el agregado de una base fuerte. Además, debe considerarse que la reacción de oxidación del hierro acidifica el sistema y que además el agua de producción tiene asociada su propia capacidad buffer, la cual está gobernada por su alcalinidad la cual según los estudios ([ver apartado Caracterización del agua de producción de Loma Gruesa](#)) la misma es de 170 mg CaCO₃/l o lo que

⁶⁷ ENOHSA (2000). *Manual de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Buenos Aires: Secretaría de Obras Públicas. - Fundamento VIII-4. Remoción de Fe y Mn

es equivalente a $8,7 \times 10^{-4}$ mol/L (el Mr de CaCO_3 equivale a 100 g/mol aproximadamente).

Si bien sería ideal la realización de ensayos con el efluente, para justificar el tratamiento se propone un ejercicio de ajuste de pH en base a la alcalinidad del sistema tomando como partida el equilibrio del sistema carbonato en el agua producida (tabla 5.15). Para el desarrollo de esta estimación, se considera bibliografía provista por la cátedra de Contaminación de Aguas y Suelos de la UNSAM⁶⁸

Tabla 5.15: Equilibrios del sistema carbonato en solución acuosa

Reacción de equilibrio	Constante de equilibrio	Fracción molar
$[\text{H}_2\text{CO}_3^*] = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{CO}_{2(aq)}]$	$K_H = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]}{p_{\text{CO}_2}} = 10^{-1,43}$	$\alpha_0 = \frac{1}{(1 + \frac{K_1}{[H^+]} + \frac{K_1 K_2}{[H^+]^2})}$
$[\text{H}_2\text{CO}_3^*] \rightleftharpoons [\text{HCO}_3^-] + [\text{H}^+]$	$K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]} = 10^{-6,3}$	$\alpha_1 = \frac{1}{(\frac{[H^+]}{K_1} + 1 + \frac{K_2}{[H^+]})}$
$[\text{HCO}_3^-] \rightleftharpoons [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{H}^+]$	$K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} = 10^{-10,3}$	$\alpha_2 = \frac{1}{(\frac{[H^+]^2}{K_1 K_2} + \frac{[H^+]}{K_2} + 1)}$

La alcalinidad del sistema se puede imaginar como el exceso de bases fijas con respecto a los ácidos fijos presentes en el agua; es decir, una alcalinidad negativa es posible y se llama acidez mineral. En general (y aplica en este caso) el sistema está dominado por iones Sodio (C_b) y Cloruro (C_a). Este equilibrio estará a su vez dado por la concentración de especies del sistema carbonato y el pH de la solución (Ec 5.18).

$$\text{Alcalinidad} = C_b - C_a = \frac{K_H \cdot p_{\text{CO}_2}}{\alpha_0} (\alpha_1 + 2\alpha_2) + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \quad (\text{Ec 5.18})$$

En un sistema cerrado, el cual no se encuentra en contacto con el aire (el cual contiene CO_2), la concentración total de Carbonatos ($C_t = [\text{H}_2\text{CO}_3^*] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$) se mantiene constante. Sin embargo, en un sistema abierto, a medida que el pH de la solución aumenta el CO_2 presente en la fase gaseosa tiende a solubilizarse, manteniendo la concentración de $[\text{H}_2\text{CO}_3^*]$ constante (Ec. 5.19). Esto quiere decir que el sistema posee mayor capacidad buffer por la continua reposición de ácido carbónico.

$$[\text{H}_2\text{CO}_3^*] = p_{\text{CO}_2} K_H = \frac{\text{Alk}_i + [\text{OH}^-]_i - [\text{H}^+]_i}{(\alpha_1 + 2\alpha_2)_i} \quad (\text{Ec. 5.19})$$

⁶⁸ Cátedra de Contaminación de Aguas y Suelos: AGUA Y AMBIENTE - Un Enfoque desde la Química - Capítulo 6 - El sistema CO_2 - H_2O

Considerando esta expresión, una presión parcial de oxígeno de $P_{CO_2} = 10^{-3,53}$ y un pH = 6, se estima una concentración de $[H_2CO_3^*] = 1,96 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$.

Partiendo de un supuesto de sistema abierto y conociendo la alcalinidad inicial, se plantea la alcalinidad final mediante la siguiente ecuación 5.20, en donde C_b equivale a la concentración de base a agregar al sistema.

$$C_b^* = \frac{[H_2CO_3^*]}{\alpha_{0-f}} (\alpha_1 + 2\alpha_2)_f + [OH^-]_f - [H^+]_f \quad (\text{Ec. 5.20})$$

Utilizando un pH de 7, obtenemos una concentración requerida de **7 x 10⁻³ mol/L de [OH⁻]**, lo que equivale a 0,026 g/l de $Ca(OH)_2$. Partiendo de este supuesto, y considerando la totalidad del caudal a tratar (920 m³/d aproximadamente) se obtiene un requerimiento de **21 kg/d de Cal Viva**. Dado que existen otros procesos acidificadores, se asume un 10% extra, aproximándose entonces a **23 kg/d**.

Finalmente, el punto de dosificación de químicos se dará mediante una manguera de conducción ubicada cercana al agitador (figura 5.25).

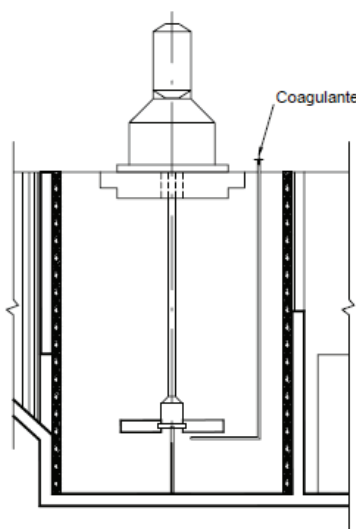


Figura 5.25: punto de aplicación de químicos en mezcla rápida. Fuente: ENOHSA Fundamento VII - Capítulo 6

Generación de Sólidos Suspendedos Totales

El tratamiento de coagulación y floculación elevará el contenido de sólidos suspendidos totales respecto al valor remanente posterior al tratamiento convencional de forma proporcional a la cantidad de coagulante y floculante agregado, así como también el contenido de hierro removido por este proceso. Partiendo de la relación estequiométrica y másica de 1 mg/L de $FeCl_3$ equivalente a 2,6 mg/L

de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y una remoción completa de esta fracción equivaldría a una concentración de 216 mg/L de SST + 91 mg/L de SST aún presentes en solución = **308 mg/L de SST** de entrada al Sedimentador primario.

5.6.5. Sedimentación

Según el criterio N°6 de ENOHSA⁶⁹, si existe una concentración mayor a 10 mg/l de hierro en solución previo al tratamiento físico-químico por precipitación, es necesario un proceso de sedimentación antes de pasar a filtración.

Para diseñar una unidad en la que ocurra un proceso de sedimentación, es usual seleccionar una velocidad terminal de sedimentación representativa del universo de partículas a remover; esta velocidad de sedimentación debe ser equivalente o superior a la carga superficial utilizada para el diseño de la unidad. La Carga Superficial (C_s) es un parámetro que se define como el caudal de ingreso (Q) a la unidad dividido el área de la misma (Ec. 5.21) y es considerado equivalente a velocidad de sedimentación terminal según el modelo de Hazen. De esta definición se desprende el concepto de que la eficiencia de sedimentación es independiente de la profundidad de la unidad.

$$\text{Carga superficial (m}^2\text{/m}^3\cdot\text{día)} = \text{Caudal (m}^3\text{/día)} / \text{Área (m}^2\text{)} \quad (\text{Ec. 5.21})$$

Nadella (et. al, 2020)⁷⁰, además de definir una dosis efectiva mediante cloruro férrico y polímeros aniónicos, también determina la velocidad de sedimentación (**U**) de los flocs formados, considerando la viscosidad de un efluente como puede ser el agua de producción, así como también un rango de temperaturas representativo de los cambios estacionales que ocurren en la base Permian en Texas. En base a sus resultados, el diámetro de flocs formados fue máximo a 22°C (900 μm) pero estos veían reducido considerablemente su tamaño a altas y bajas temperaturas, con tan solo 240 μm a 4°C y 380 μm a 44°C. El tamaño de partícula afecta directamente la velocidad de sedimentación (**U**), siendo máxima a 22°C con un valor de 4,5 mm/s (389 m/d) pero disminuyendo a 1,1 mm/s (95 m/d).

Ahora bien, la velocidad de sedimentación medida en una columna de sedimentación o en reactores estáticos no son representativos de las unidades de sedimentación horizontal; en general, se aplica un

⁶⁹ ENOHSA (2000). *Manual de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Buenos Aires: Secretaría de Obras Públicas. - Criterio N°6 - Remoción de Hierro y Manganeseo

⁷⁰ Nadella et. Al (2020) - Fit-for-purpose treatment of produced water with iron and polymeric flocculant for reuse in hydraulic fracturing. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31786393/>

factor de corrección (**k**) de entre 1,3 y 2,2 dependiendo de características hidráulicas, la capacidad de la planta y la calificación de los operadores de la misma⁷¹.

En base a esta información, se decide tomar el peor escenario de velocidad de sedimentación y un factor intermedio, obteniendo la siguiente expresión para la carga superficial (Ec 5.22)

$$C_s = \frac{U}{k} = \frac{95 \frac{m}{d}}{1,75} = 55 \frac{m}{d} \text{ (Ec. 5.22)}$$

Luego, despejando de la ecuación 5.x y considerando el caudal medio de ingreso (**Q_m = 19,2 m³/h**) se obtiene el área (**A**) de la unidad de sedimentación, la cual es de **8,4 m²**.

El otro parámetro a considerar para el diseño de esta unidad es el tiempo de retención hidráulico, dado que debe asegurarse un tiempo mínimo de permanencia que permita la decantación de los sólidos sedimentables. Según bibliografía este parámetro se sitúa entre los 90 y 150 minutos⁷² pudiendo ser tan bajo como 60 minutos en algunas condiciones particulares⁷³.

Adoptando un tiempo de retención (*t_{rh}*) de 90 minutos, se obtiene el volumen (*V*) de la unidad (Ec. 5.23) y, utilizando el área calculada en 5.22, se obtiene la profundidad (*H*) (Ec. 5.24). La decisión de adoptar este tiempo de retención se fundamenta en diversas cuestiones; la primera de ellas es evitar tiempos de nula aireación elevados que produzcan malos olores, así como también el posterior tratamiento por lodos activados, que posee una gran eficiencia.

$$Volumen (m^3) = Q \cdot t_{rh} = 19,2 \frac{m^3}{h} \cdot 1,5 h = 28,8 m^3 \text{ (Ec. 5.23)}$$

$$Profundidad (m) = Volumen (m^3) / \text{Área} (m^2) = 28,8 m^3 / 8,4 m^2 = 3,4 m \text{ (Ec. 5.24)}$$

Si bien esta metodología de diseño arroja una aproximación acertada, por cuestiones constructivas se adaptan estos valores obtenidos para definir parámetros constructivos (tabla 5.16).

⁷¹ ENOHSA (2000). *Manual de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Buenos Aires: Secretaría de Obras Públicas. – Fundamento VII - Sedimentación

⁷² Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*

⁷³ Cátedra FIUBA, Ingeniería Sanitaria

Tabla 5.16: parámetros calculados y definidos de cada unidad de sedimentación

Parámetro	Adoptado/Calculado	Definido	Unidad
Caudal medio (Q_{med})	19,2	19,2	m ³ /h
Carga Superficial (C_s)	55	38	m ³ /m ² .dia
tiempo de retención (t_{rh})	90	105	min
Volumen (V)	28,8	34	m ³
Largo (L)	1,7	2	m
Ancho (B)	5	6	m
Profundidad (h)	3,4	2,8	m
Área (A_{dp})	8,3	12	m ²

Zona de Ingreso

Para la unidad de entrada se decidió colocar un ingreso por ducto mediante vuelco, dejando un espacio de medio metro hasta la zona de ingreso. Para asegurar un correcto funcionamiento de la unidad, que evite taponamientos y no rompa los flocs, se calcula el Gradiente de paso (G) del efluente sobre los orificios perforados según la ecuación 5.X, siendo n el coeficiente de manning, adoptado en 0,01 por decidir utilizar un material metálico liso. El Gradiente normalmente debe situarse entre 15 y 20 1/s para lograr una eficiencia adecuada.

$$G = \sqrt{g \cdot \rho / \mu} \cdot R_H^{-0,67} \cdot U^{1,5} \quad (\text{Ec. 5.25})$$

En donde g hace referencia a la gravedad, ρ a la densidad del fluido, μ a la viscosidad, R_H al radio hidráulico (Ec. 5.26) y U a la velocidad de paso (Ec. 5.27)

$$U = Q / (\pi \cdot r^2) \quad (\text{Ec. 5.26})$$

$$R_H = r/2 \quad (\text{Ec. 5.27})$$

Los parámetros de la placa son enumerados en la tabla 5.17 y representados gráficamente en la figura 5.26.

Tabla 5.17: Valores de diseño de entrada al sedimentador secundario

Parámetro	Dato	Unidad
Gradiente en orificios (G)	16,4	1/s
Radio de los orificios	3	cm
N° orificios - vertical	6	-
Espacio entre orificios (Vertical)	0,4	m
N° orificios horizontales	4	-
Espacio entre orificios (Horizontal)	0,4	m
N° orificios totales	24	-

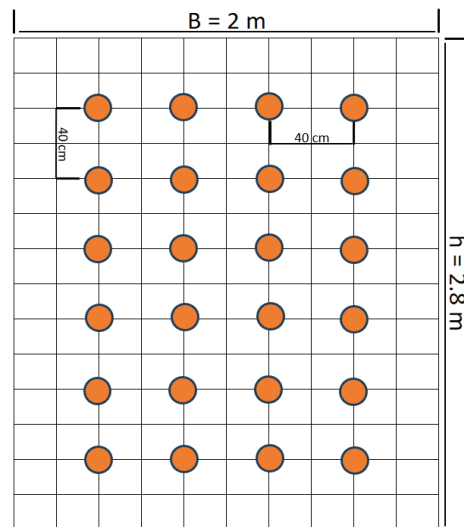


Figura 5.26: Distribución de los orificios de entrada

Zona de salida

Se diseñó la zona de salida por rebalse a través de vertederos triangulares dispuestos en el ancho W del sedimentador. Para el diseño de estos vertederos, los cuales se ubicarán con una disposición equidistante entre sí, se deben adoptar una serie de parámetros, los cuales son:

- altura mojada (h).
- altura del triángulo (h_t).
- ángulo del triángulo (90°).
- altura por sobre el triángulo (h_r).
- ancho de los vertederos (W_v).
- distancia entre vertederos (S).

Estos valores pueden observarse esquematizados en la siguiente figura 5.27.

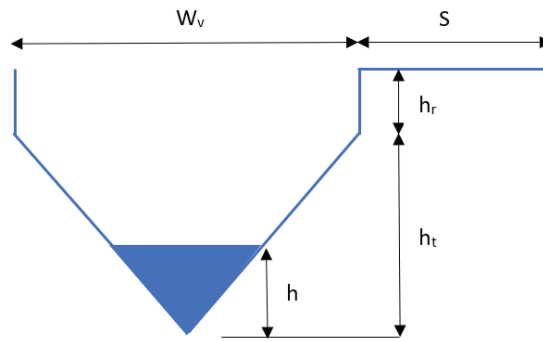


Figura 5.27: Esquema simplificado de un vertedero

Adoptando una altura de pelo de agua de 5 centímetros (cm) y utilizando la fórmula de Gourley para vertederos triangulares (Ec. 5.28) se obtiene el caudal de paso por el vertedero (Q_v)

$$Q_v(m^3/h) = 1,32 \cdot \tan(90/2) h^{2,47} / 3600 = 3 m^3/h \quad (\text{Ec. 5.28})$$

Con el dato de caudal y conociendo el caudal de ingreso a la unidad, puede obtenerse la cantidad de vertederos necesarios (Ec 5.29)

$$n = Q_v / Q_{med} = 19,2 / 3 = 6,5 \quad (\text{Ec 5.29})$$

Cómo este valor debe ser un número natural, se decide adoptar $n = 7$. Utilizando la Ec. 5.28 se obtiene una nueva altura mojada aproximada de 4,85 centímetros.

Adoptando un ancho de vertedero W_v de 20 centímetros y tomando un total de 7 vertederos, se calcula la distancia entre los vertederos con la siguiente Ec. 5.30.

$$S \cdot (1 + n) = B - W_v \cdot n = 2 m - 0,2 m \cdot 7 = 0,6 m \quad (\text{Ec. 5.30})$$

$$S = 0,6 / 8 m = 7,5 cm$$

El resumen de los parámetros puede observarse en la siguiente tabla 5.18.

Tabla 5.18: Variables de diseño de la zona de salida de la unidad de sedimentación

Parámetro	Dato	Unidad
N°Vertederos de salida	7	-
altura mojada (h)	4,85	cm
altura del triángulo (h_t)	10	cm
ángulo del triángulo	90	°
altura por sobre el triángulo (h_r)	10	cm
ancho de los vertederos (W_v)	20	cm
distancia entre vertederos (S)	7,5	cm

Finalmente, se calcula el canal de recolección asumiendo 0,3 m de espesor y 1 m de profundidad (área transversal de $0,3 \text{ m}^2$), lo que equivale a una velocidad de líquido de 0,02 m/s (Ec 5.31) , la cual se encuentra dentro de parámetros normales para conducción de líquidos por gravedad.

$$\text{Velocidad en canaleta (m/s)} = 19,2 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ h/s} / 0,3 \text{ m}^2 = 0,02 \text{ m/s (Ec. 5.31)}$$

Zona de acumulación de barros y producción de lodos

Considerando una geometría circular del sedimentador, se decide adoptar una remoción hidráulica; para ello, se adopta una pendiente del fondo de 5° hasta llegar a la sección de descarga, la cual cubre los últimos $\frac{2}{3}$ del largo del sedimentador (4 metros). Luego, se dimensiona una tolva más pronunciada en donde se acumula y espesa el lodo, la cual consta de una tolva de volumen asimilable a un cono invertido con ángulo de inclinación de 50° respecto a la horizontal (Figura 5.28)

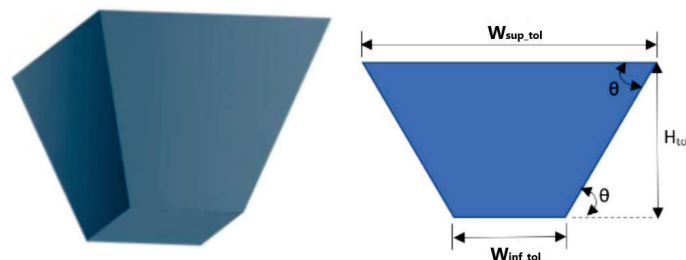


Figura 5.28: Representación gráfica de la tolva de lodos.

ENOHSA⁷⁴ ofrece una expresión empírica para calcular el diámetro de la sección de descarga; sin embargo, esta aproximación sólo tiene sentido si se consideran sedimentadores específicos para potabilización de aguas, en donde los caudales son mucho más elevados. La aplicación de esta expresión para unidades pequeñas arroja resultados demasiado pequeños. Por ese mismo motivo, se decide realizar un diseño en base a criterios matemáticos y operacionales.

Para estimar la producción de lodos (P_x) del sedimentador, se requiere contemplar el caudal de efluente, la cantidad de sólidos suspendidos contenidos en el mismo y la eficiencia de remoción de la unidad (**asumida en 60%**) esperada (Ec. 5.32)

$$P_x = 60\% \cdot 38,3 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 308 \text{ g/m}^3 = 7,08 \text{ kg/h} \quad (\text{Ec. 5.32})$$

Asumiendo una densidad de lodo de 1100 kg/m³, con una proporción de sólidos contenida dentro de este del 6%, se obtiene el volumen de lodo generado por día (Ec 5.33)

$$V_x = P_x / (1100 \text{ kg/m}^3 \cdot 6\%) = 0,11 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{Ec. 5.33})$$

Asumiendo una purga cada 6 horas, el volumen de la tolva debería de poder contener todo este lodo espesado como mínimo (Ec 5.34)

$$V_{Tol} = 0,11 (\text{m}^3/\text{h}) \cdot 6\text{h} = 0,32 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 5.34})$$

Utilizando la ecuación de volumen de una pirámide truncada considerando un W_{sup_tol} de 2 m, W_{inf_tol} de 1,5 m y h_{tol} de 0.6 m, obtenemos un volumen de 1,45 m³, lo cual permitiría purgar cada 24 horas aproximadamente. Esto se traduce en un ángulo de 50° (Ec. 5.35).

$$V_{Tol} = h_{tol}/3 \cdot (W_{sup_tol}^2 + W_{inf_tol}^2 + \sqrt{W_{sup_tol}^2 \cdot W_{inf_tol}^2}) \quad (\text{Ec. 5.35})$$

Finalmente, la sección de descarga será un ducto de salida en el fondo de diámetro de 20 cm.

⁷⁴ ENOHSA (2000). *Manual de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Buenos Aires: Secretaría de Obras Públicas. - Criterio VII - Sección 4 Sedimentación

5.6.6. Filtración

Al igual que los procesos de sedimentación, el primer paso para diseñar un sistema de filtros rápidos es la adopción de una carga superficial (C_s). El valor adoptado dependerá siempre del medio filtrante utilizado. Para ello, se utilizan dos referencias bibliográficas:

- Teoría y práctica de la purificación del agua, de Arboleda Valencia: Según esta fuente, los valores de referencia (tabla 5.19) para el diseño son:

Tabla 5.19: características generales de los diferentes filtros rápidos

Características	Filtro rápido mixto	Filtro rápido	Filtro lento
Carga Superficial ($m^3/m^2.d$)	235 - 590	87,5 - 176	7 - 14
Velocidad de filtración (m/h)	9,8 - 24,6	3,6 - 7,3	0,3 - 0,6
Profundidad del lecho	30 - 40 cm grava 45 - 60 cm antracita 15 - 30 cm arena	30 - 45 cm grava 60 - 75 cm arena	30 cm grava 90 - 110 cm arena
pérdida de carga	0,2 a 2,7 m	0,3 a 2,7 m	0,16 a 1,2 m
Lavado	Flujo invertido 0,6 a 1 $m^3/m^2.min$	Flujo invertido 0,8 a 1,2 $m^3/m^2.min$	Raspado y lavado superficial
Tiempo entre limpiezas	12 - 48 horas	24 - 72 horas	20 - 60 días
Cantidad de agua	1 - 3 % agua filtrada	1 - 6 % agua filtrada	0,2 - 0,6 % agua filtrada

- Criterio N°6 - Filtración rápida post tratamiento de remoción de metales (7.2.3): Según esta fuente, la cual da parámetros específicos para el tratamiento de remoción de hidróxido férrico tratado previamente, se recomiendan filtros duales de arena y antracita de altura 0,40 m y 0,50 m respectivamente, adoptando una velocidad de filtración de 7 a 10 m/h (168 a $240 m^3/m^2.d$).

Tomando $C_s = 168 m^3/m^2.d$ y considerando el caudal total $Q_m = 919,2 m^3/d$, se despeja el área total necesaria S_t de filtrado (Ec. 5.36):

$$S_t (m^2) = \frac{Q_m}{C_s} = \frac{919,2 m^3/d}{168 m^3/m^2.d} \simeq 5,5 m^2 \quad (\text{Ec. 5.36})$$

Una vez definida el área necesaria de filtrado, se requiere adoptar un número de filtros a instalar. Existe una fórmula empírica propuesta por Morril-Wallaced para calcular el número de filtros, el cual es proporcional al caudal que ingresa en metros cúbicos (Ec 5.37). Sin embargo, esta expresión suele ser utilizada para caudales grandes, orientados a plantas de potabilización de aguas.

$$N^{\circ}Filtros = 0,044 \cdot Q^{1/2} = 0,044 \cdot (919,2 \text{ m}^3/d)^{1/2} = 1,3 \quad (\text{Ec. 5.37})$$

En base a la aplicación de este modelo, sería únicamente necesario entre uno y dos filtros; sin embargo, esta solución desde un punto de vista operativo es poco práctica, debido a que las tareas de mantenimiento y limpieza del manto filtrante. Debido a que la operación de lavado implica sacar fuera de servicio un filtro, la carga superficial aumenta para mantener el mismo caudal tratado. Partiendo de esta base, se considera la aplicación de 3 filtros.

Continuando con el diseño, se adopta una geometría rectangular; según Arboleda Valencia, la proporción Largo - Ancho (L/B) de los filtros rápidos debe situarse entre 1,25 - 1,33. Adoptando un valor de 1,3 se calculan las dimensiones transversales del filtro.

Por otro lado, para estimar la profundidad se debe considerar el manto filtrante y la operatoria de lavado. Adoptando la recomendación de ENOHSA, se decide utilizar un relleno mixto compuesto por 40 cm de arena y 50 cm de antracita. A estos 0,9 metros, se le suma un valor adicional de nivel de pelo de agua máximo en el filtro de 50 cm por encima de éste, siendo la peor condición. Finalmente, se adopta una revancha de 80 cm por cuestiones constructivas.

En cuanto al sistema de drenaje, existen varias metodologías; según el fundamento VII-5 de ENOHSA, los fondos más comunes consisten en ladrillos o conductos perforados. Para este caso, se eligen 2 conductos perforados con una serie de orificios de 3 mm de diámetro. Las dimensiones de cada filtro se resumen en la siguiente tabla 5.20.

tabla 5.20: dimensiones unitarias de cada filtro

Parámetro	Unidades	Calc./Adoptado	Definido
Relación L/B	-	1,30	1,33
Ancho (B)	m	1,18	1,2
Largo (L)	m	1,54	1,6
Altura manto filtrante	m	0,9	0,9
Altura + Revancha	m	2,3	2,3
Volumen total por filtro	m ³	2,7	2,7

Adicional a esto, en la siguiente tabla 5.21 se incluyen otros parámetros definidos para el diseño del sistema de filtrado.

Tabla 5.21: Parámetros varios de diseño de filtros rápidos

Parámetro	Unidades	Calc./Adoptado	Definido
Carga Sup. (Cs)	m ³ /m ² .d	168	159,7
Caudal total (Q)	m ³ /d	38,3	38,3
Sup. total (St)	m ²	5,5	5,8
NºFiltros	-	3	3
Caudal unitario (Q)	m ³ /d	12,8	12,8
Sup. unitaria (Sf)	m ²	1,8	1,9

Operación durante el lavado

Durante la operación de lavado de los filtros, uno de ellos sale fuera de servicio; esto significa que los dos filtros que aún se encuentran operativos deberán soportar todo el caudal que ingresa desde la sedimentación. Siguiendo la recomendación de ENOHSA, la carga superficial máxima se encontraría en 10 m³/h (240 m³/m².d). Considerando el caudal total y solo dos filtros (área de filtración = 2 S_f) se calcula la carga superficial durante el lavado (Ec. 5.38).

$$C_s = \frac{Q}{S_f \cdot (N^{\circ}filtros - 1)} = \frac{919,2 \text{ m}^3/d}{1,8 \text{ m}^2 \cdot (2)} = 239,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d \quad (\text{Ec. 5.38})$$

Para definir la operatoria de lavado, se toman los parámetros de Arboleda Valencia. Cada filtro se lavará cada 36 hs (**t_{op}**), utilizando un 4% del agua filtrada en ese período con una velocidad de lavado ascensional de 1 m/min.

El volumen de lavado (**V_l**) se calcula considerando un porcentaje del volumen filtrado durante el tiempo entre lavados, por filtro (Ec. 5.39):

$$V_l = t_l \cdot \% \text{ agua} \cdot \frac{Q_m}{N^{\circ}filtros} = 36 \text{ h} \cdot 4\% \cdot \frac{38,3 \text{ m}^3/h}{3} = 18,4 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 5.39})$$

El caudal de lavado (**Q_l**) se obtiene considerando la velocidad de lavado (**U_l**) ascensional adoptada y la superficie del filtro (**S_f**) (Ec. 5.40):

$$Q_l = U_l \cdot S_f = 1 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 1,9 \text{ m}^2 = 1,9 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \quad (\text{Ec. 5.40})$$

El tiempo de lavado (t_l) se calcula como el cociente entre el volumen de lavado (V_l) y el caudal de lavado (Q_l) (Ec. 5.41).

$$t_l = \frac{V_l}{Q_l} = \frac{18,4 \text{ m}^3}{1,9 \text{ m}^3/\text{min}} = 9,7 \text{ min} \approx 10 \text{ min} \quad (\text{Ec. 5.41})$$

Debido a que el caudal de lavado necesario es mayor al caudal generado por la planta, es necesario el diseño de una desviación del caudal de salida para acumular agua en un tanque de lavado.

El caudal extra a incorporar en el lavado (Q_{extra}) se calcula como la diferencia entre el caudal de lavado y el caudal medio (Ec. 5.42):

$$Q_{\text{extra}} = Q_l - Q_m = 1,9 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} - 0,6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 1,3 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \quad (\text{Ec. 5.42})$$

Luego, el volumen requerido en el tanque (V_{tk}) se calcula como el producto entre el tiempo de lavado (t_l) y el caudal extra (Q_{extra}) (Ec. 5.43):

$$V_{tk} = Q_{\text{extra}} \cdot t_l = 1,3 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot 10 \text{ min} = 13 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 5.43})$$

Finalmente, considerando que el tiempo entre lavados es cada 12 horas, se calcula el caudal de desvío necesario al tanque ($Q_{\text{desvío}}$) (Ec. 5.44):

$$Q_{\text{desvío}} = \frac{V_{tk}}{t_{op} - t_l} = \frac{13 \text{ m}^3}{(12 - \frac{10}{60})h} = 1,1 \frac{\text{m}^3}{h} \quad (\text{Ec. 5.44})$$

Todos estos parámetros se resumen en la siguiente tabla 5.22:

Tabla 5.22: parámetros operacionales de diseño del lavado de filtros

Parámetro	Unidades	Valor Adoptado
Tiempo entre lavado (t_{op})	horas	36
Volumen de lavado (V_l)	m^3	19
Velocidad de lavado (U_l)	m/min	1
Tiempo de lavado (t_l)	min	10
Caudal de lavado (Q_l)	m^3/min	1,9
Caudal de salida	m^3/h	37,2
Volumen (V_{tk})	m^3	13
Caudal de desvío	m^3/h	1,1

$$h_l = 0,94 L_{arena} + 0,24 L_{antracita} = 0,5 m$$

Sección de salida



5.6.7. Tanque Inyector (TKI) y Tanque de Trasvase (TKT)

El diseño del tanque Inyector se realiza siguiendo los mismos lineamientos del Tanque Pulmón y el Tanque Skimmer. Para este caso, se considera un tiempo de residencia de 12 horas, permitiendo almacenar un volumen de agua considerable que permita ejecutar proyectos de trasvase a piletones de agua para fractura, así como también la inyección en pozos sumideros.

Por otro lado, el Tanque de Trasvase, el cual es considerado como el vaso comunicante con la planta de tratamiento de crudo, es identificado en algunos esquemas y en la memoria descriptiva pero no forma parte de esta etapa del proyecto, por lo que no se incluirá su diseño.

5.6.8. Sistema de gas de blanketing

Por cuestiones de seguridad operativa y mantenimiento del efluente, los tanques diseñados bajo el estándar API 650 cuentan con un sistema de gas de blanketing, el cual consiste en una inyección de gas natural a una presión muy cercana a la atmosférica, con una proporción de gas lo suficientemente grande como para desplazar al oxígeno y evitar así la posibilidad de generación de una atmósfera explosiva dentro del tanque.

El equipamiento elegido para los tanques de este sistema es el módulo M1-722-S38-G de Pefow Equipamientos S.A (Figura 5.30)

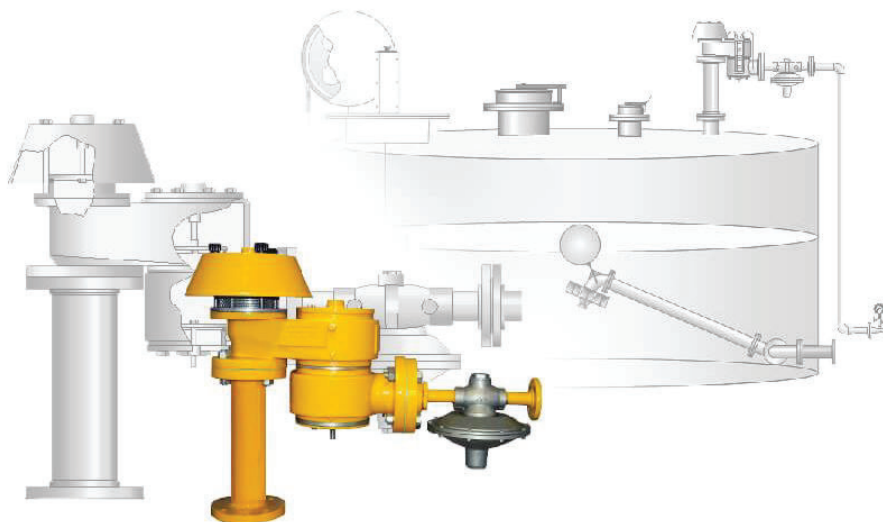


Figura 5.30: Sistema de gas de blanketing de Pefow Equipamientos S.A.

5.6.9. Sistema de conducción

El sistema de conducción de la planta de tratamiento de agua de producción, diseñado en base a la memoria de cálculo de sistemas de conducción de cañerías explicada en el [anexo 11.4](#), se compone de tramos conducidos mediante impulsión y gravedad. En la siguiente tabla 5.23 se identifican de los tramos diseñados, junto con sus respectivas características de diseño:

Tabla 5.23: Descripción de los conductos de la planta: En Azul los tramos de acero al carbono que transportan la línea de agua de producción en la PTA-H; en Marrón, las líneas colectoras de crudo; en verde, las líneas de PVC pertenecientes a la PTA-M.

N° Tramo	Descripción	Tipo conducción	Caudal de entrada (m3/h)	Diámetro interno (m)	Velocidad (m/s)
A-1	Desde TK-01 a B01-A/B	Gravedad	38,3	0,10	1,5
A-2	Reciclo B01-A/B	Impulsada	38,3	0,06	3,4
A-3	Desde B01-A/B a TK-02	Impulsada	38,3	0,10	1,5
A-4	Desde TK-02 a B03-A/B	Gravedad	38,3	0,10	1,5
A-5	Desde B03-A/B a TK-03	Impulsada	38,3	0,10	1,5
A-6	Desde TK-02 a ingreso PTA-M	Gravedad	38,3	0,10	1,5
B-1	Desde TK-01 a TKT	Gravedad	1,1	0,02	1,4
B-2	Desde TK-02 a TKT	Gravedad	0,1	0,02	0,7
C-1	Ingreso a CPI-A/B	Gravedad	19,2	0,06	1,7
C-2	CPI-A/B a COA-A/B	Gravedad	19,2	0,10	0,6
C-3	CPI-A/B derivación a B03-A/B	Gravedad	38,3	0,10	0,6
C-4	COA-A/B a FLO-A/B	Gravedad	19,2	0,10	0,6
C-5	FLO-A/B a SED-A/B	Gravedad	19,2	0,21	0,2
C-6	SED-A/B a FIL-A/B/C	Gravedad	19,2	0,10	0,6
C-7	FIL-A/B/C a Sumidero Filtro	Gravedad	1,0	0,03	0,3
C-8	Bomba-TKL a TKL	Impulsada	1,0	0,02	1,2
C-8	TKL a Filtros	Gravedad	102,0	0,13	2,0
C-9	Sumidero Filtros	Gravedad	19,2	0,13	0,4
A-7	B02-A/B a TK-03	Impulsada	37,2	0,10	1,5
A-8	B02-A/B a Cargadero	Impulsada	30,0	0,10	1,2

Los mismos pueden observarse de forma gráfica en la siguiente figura 5.31

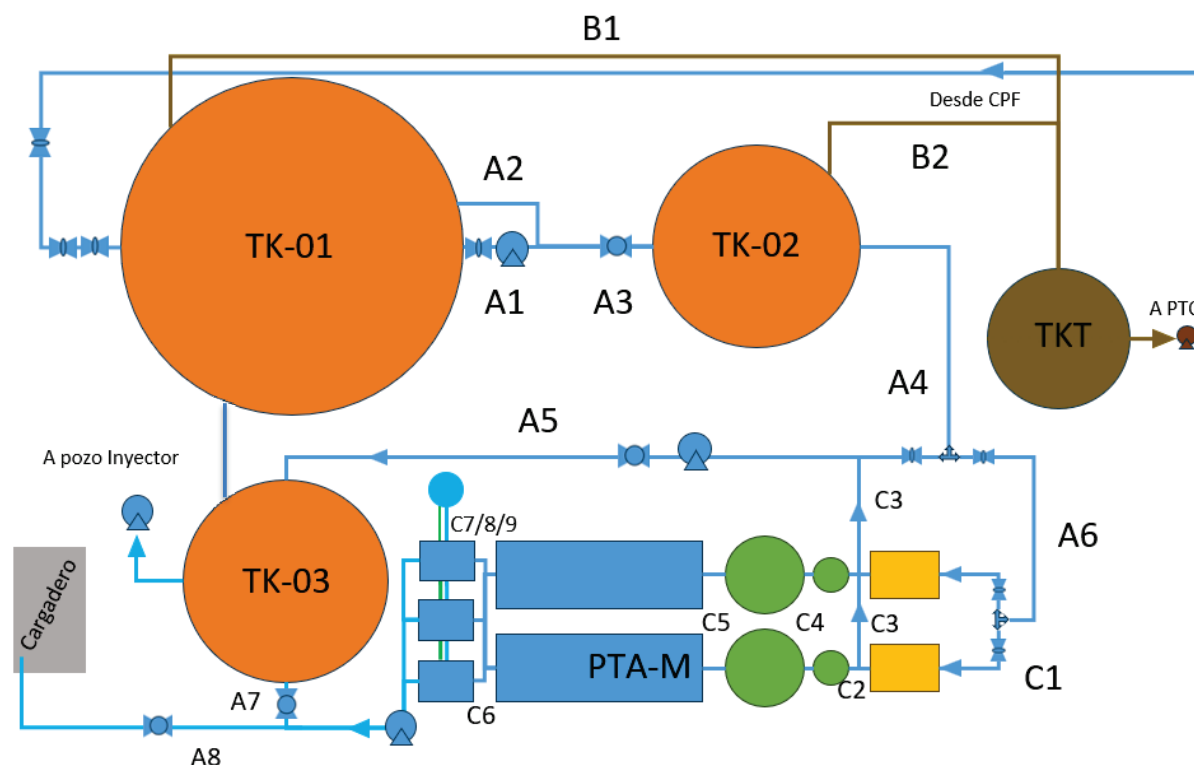


figura 5.31: Representación esquemática del sistema de conducción de la planta de agua de producción.

En base a este diseño preliminar y el layout de la planta (para más detalle, ver el apartado de [Planos](#)), en la siguiente tabla 5.24 se incorpora un resumen de los tipos y cantidades de cañerías a instalar en la planta.

Tabla 5.24: Listado de productos necesarios para el armado del sistema de conducción de la planta.

Tipo de cañería	Material	D. nominal (in.)	D. nominal (mm)	Largo (m)	N°Vál Globo	N°Vál Exclusa	N° Codos	N° "T" recto	N° "T" lateral
Sch 40	Acero al Carbono	3 1/3	90	153	4	13	16	0	5
Sch 40	Acero al Carbono	2 1/2	65	18	0	2	2	0	1
Sch 40	Acero al Carbono	1/2	15	35	0	4	2	0	0
Sch 10	PEAD/PVC	3 1/3	90	19	0	2	4	2	2
Sch 10	PEAD/PVC	1	25	5	1	1	0	0	0
Sch 10	PEAD/PVC	5	125	27	0	1	5	0	2
Sch 10	PEAD/PVC	1/2	15	10	1	1	0	0	0
Sch 10	PEAD/PVC	8	200	1	0	0	0	0	0

Finalmente, se calculan las alturas hidráulicas antes y después de cada unidad, considerando la pérdida de carga de cada tramo de conducción (Tabla 5.25); De esta manera, se establece el perfil hidráulico de la planta (Ver apartado Planos).

Tabla 5.25: Pérdida de carga asociada a cada tramo de conducción.

N° Tramo	Material	Tipo de cañería	D. nominal (mm)	Altura hidráulica inicial (m)	Pérdida de carga (m)	Altura hidráulica final (m)
A-1	Acero al Carbono	Sch 40	90	1,0 (LL TK-01)	0,4	0,6
A-2	Acero al Carbono	Sch 40	65	Despreciable debido a bombeo por desplazamiento positivo		
A-3	Acero al Carbono	Sch 40	90			
A-4	Acero al Carbono	Sch 40	90	4,0	0,6	3,4
A-5	Acero al Carbono	Sch 40	90	3,4	0,4	3,0
A-6	Acero al Carbono	Sch 40	90	4,0	1,1	2,9
B-1	Acero al Carbono	Sch 40	15	4,5	1,4	3,1
B-2	Acero al Carbono	Sch 40	15	4,5	0,3	4,2
C-1	Acero al Carbono	Sch 40	65	2,9	0,4	2,5
C-2	PEAD/PVC	Sch 10	90	2,5	0,1	2,4
C-3	Acero al Carbono	Sch 40	90	2,4	0,1	2,3
C-4	PEAD/PVC	Sch 10	90	2,4	0,0	2,4
C-5	PEAD/PVC	Sch 10	200	2,4	0,0	2,4
C-6	PEAD/PVC	Sch 10	90	2,4	0,1	2,3
C-7	PEAD/PVC	Sch 10	25	1,2	0,0	1,2
C-8	PEAD/PVC	Sch 10	15		1,1	
C-8	PEAD/PVC	Sch 10	125	4,0	0,7	3,3
C-9	PEAD/PVC	Sch 10	125	1,2	0,0	1,1
A-7	Acero al Carbono	Sch 40	90		1,2	
A-8	Acero al Carbono	Sch 40	90		0,8	

6. Proyecto: Planta de tratamiento de aguas residuales

En este apartado, se comienza con una breve descripción del estado del arte en lo que respecta a las opciones posibles de tratamiento de aguas servidas, divididas en sus respectivas etapas y teniendo en consideración la bibliografía existente referida al tema. Luego, se analiza la mejor opción a ser implementada considerando los requerimientos de la autoridad de aplicación, el interés de FracEnergy respecto al gerenciamiento del agua, y los posibles usos que se le puedan dar al efluente tratado. Finalmente, se presentará el diagrama de flujo de la planta de tratamiento a ser construida junto con su filosofía de operación y respectiva memoria de cálculo.

6.1. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto contempla el diseño del tratamiento del efluente una vez ingresa a la planta; queda por fuera del mismo todo lo relacionado a las redes de recolección del efluente que tenga el campamento y el comedor, así como también su conducción hasta la misma.

6.2. Estado del arte

El siguiente apartado explora el estado del arte en el tratamiento de aguas residuales generadas por una población, enfocado principalmente en los tratamientos convencionales. Para este campo, existe una amplia variedad de bibliografía, contenida en múltiples manuales de ingeniería sanitaria como: *Metcalf y Eddy wastewater engineering treatment*, *Ingeniería Ambiental de J. Glynn Henry y Gary W. Heinke*, e inclusive fuentes nacionales, *las directrices de diseño del Ente Nacional de Obras Hídricas y Sanitarias (ENOHSA)*. Todas estas bibliografías coinciden en que, para realizar un tratamiento se debe realizar una configuración en tres etapas. Debido a que existe mucha información, se presentará únicamente un breve resumen de cada una de ellas.

Si bien la bibliografía es extensa y la variedad de tratamientos es muy alta, no se describirán en este capítulo las tecnologías o diseños que supongan una dificultad para operar o implementar tal que no sean atractivas considerando el lugar de implantación del proyecto así como también la disponibilidad de recursos humanos, el mantenimiento y su monitoreo. Considerar esta salvedad como el primer criterio de exclusión en la evaluación de alternativas (**ver apartado 6.2 [Evaluación y elección de alternativas](#)**).

6.2.1. Pretratamiento

El pretratamiento, también conocido como desbaste, es la primera etapa de prácticamente todo proceso de depuración de aguas residuales. El objetivo del mismo es remover los sólidos de gran tamaño y que puedan generar problemas en el funcionamiento de las unidades de bombeo y los sistemas de tratamiento posteriores.

En general, estos tipos de tratamientos pueden variar en la cantidad de unidades necesarias en función de la composición general del efluente; como concepto, consiste en barreras físicas que permiten el paso del efluente, reteniendo los sólidos de mayor a menor tamaño.

Dentro de esta etapa se suele considerar también la etapa de ecualización, en donde se pasa a un caudal constante.

6.2.2. Tratamiento Primario

Una vez se eliminan los componentes del efluente que podrían complicar la operación de la planta, se nivela el caudal y equilibran los parámetros fisicoquímicos, se continúa con la etapa de tratamiento que utiliza procesos físicos y químicos con el objetivo de reducir el contenido de sólidos suspendidos y sedimentables, así como también las grasas y los aceites.

6.2.3. Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario utiliza procesos biológicos para la degradación de la materia orgánica remanente en el efluente la cual ingresa en la categoría de los sólidos solubles y, para este proceso, debe ser degradada por microorganismos, los cuales utilizan este contenido de carbono y nutrientes como alimento, convirtiéndolo en gases que se liberan a la atmósfera y también biomasa en forma de lodos, que se retiran por un proceso de sedimentación.

6.2.3.1. Lodos activos

Los lodos activados fundamentan su tratamiento en un proceso físico-biológico que consiste en dos unidades de proceso en serie. La primera de ellas es donde ocurre toda la actividad biológica y se trata de un reactor en donde se promueve el crecimiento biológico en suspensión, el cual es alimentado mediante aireación mecánica o difusores de fondo con el objetivo de mantener un medio aerobio en condiciones de alta carga orgánica y a su vez, un mezclado eficiente que evita la sedimentación de los microorganismos (lodos activados). La segunda unidad que le sigue es un sedimentador, en donde se

permite que el proceso de decantación natural de los barros ocurra y, de esta manera, se obtiene el efluente clarificado y con una menor carga orgánica (figura 6.1).

Por otro lado, los lodos o barros, que son restos de flocs biológicos que se generan tienen dos destinos. El primero de ellos es la purga, la cual es necesaria para mantener una edad de lodo adecuada. El segundo es la recirculación al reactor biológico, con el objetivo de mantener una concentración de microorganismos en el “licor mezcla” - término acuñado para describir al medio líquido, efluente y biomasa - adecuado para mantener una tasa de degradación efectiva. La cantidad de purga y de recirculado son los dos parámetros operativos que definen la eficiencia del tratamiento y permiten correcciones en caso de presentar desvíos.

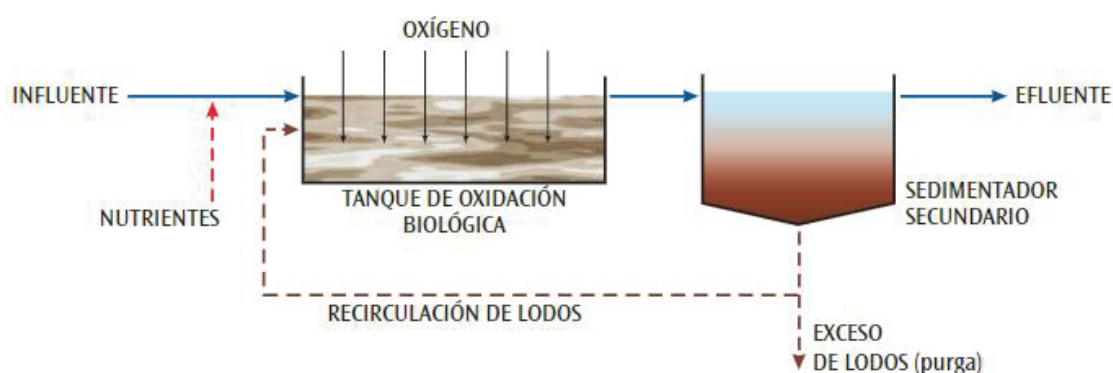


Figura 6.1: Diagrama del sistema de lodos activados con reciclo integrado por un tanque de aireación y sedimentador secundario. Fuente: Marín, A., & Osés, M. (2013)

Siendo este el fundamento general, existen varias particularidades que pueden considerarse a la hora de diseñar el reactor biológico, que dependen del efluente a tratar; en general, la variabilidad depende de la carga orgánica y la biodegradabilidad.

En general, la eficiencia del tratamiento de lodos activos dependerá, muchas veces, de la condición ambiental particular en la cual se expone el efluente, obteniendo eficiencias típicas de entre el 85% y 95%⁷⁵.

6.2.3.2. Filtros percoladores

Un filtro o lecho percolador es un lecho empaquetado de material cubierto con una capa de biopelícula, sobre el cual se hace pasar el agua residual. A medida que el agua residual atraviesa el filtro, la materia orgánica presente en el agua es eliminada por la película biológica²². La biomasa está adherida al

⁷⁵ Cátedra de Diseño de Tratamientos Biológicos para Efluentes Líquidos - UNSAM

medio soporte, por lo que permite operar con o sin recirculación. Por otro lado, el oxígeno que propicia la degradación es provisto por un sistema de bajo costo, muchas veces natural.

El tiempo de residencia de estos sistemas es de unos pocos minutos, por lo que se debe asegurar que la materia que ingresa sea altamente biodegradable.

El biofilm consiste en una capa heterogénea, con una fase aeróbica, una facultativa y parte anaeróbica. Esto permite degradar el efluente con una producción de lodos muy baja. Sin embargo, las eficiencias de remoción son más bajas que los lodos activos.

Por otro lado, el medio filtrante que da soporte al biofilm debe ser de un material que permita su adherencia. Sumado a esto, una mayor relación área-volumen también optimiza el espacio requerido para el reactor, pero también eleva el costo.

Debido a su corto tiempo de residencia, la eficiencia de remoción varía entre el 50% y 70%.⁷⁶

6.2.3.3. Lagunas

Las mismas consisten en grandes espacios en donde se vuelca el efluente, con una gran relación superficie/volumen, y se propicia la degradación biológica natural por biomasa suspendida, aunque no se llega a las concentraciones de floc biológico que puede obtener un reactor de lodos activos. Su mecánica de depuración no busca maximizar el rendimiento de biomasa; por este motivo, suelen ser de gran tamaño para que el tiempo de residencia hidráulico sea alto y por lo tanto se pueda degradar el efluente. Esto se traduce en bajos costos de inversión y operativos, aunque requiere mayor espacio y la calidad del efluente de salida suele ser pobre.⁷⁷

Aunque existen varios tipos de lagunas, constructivamente siguen el mismo lineamiento: se realiza una excavación y movimiento de suelos, para su posterior compactación e impermeabilización con materiales de baja o nula permeabilidad

Una de las variables constructivas que definirán la operación de la misma es la profundidad; a diferencia de los lodos activos en donde existe aireación desde el fondo, las lagunas dependen del intercambio de oxígeno natural que se da en la superficie. Es por ello que, a mayor profundidad, y sobre todo más contenido de carga orgánica, se producen zonas de bajo o nulo oxígeno disuelto.

⁷⁶ Cátedra de Procesos Fisicoquímicos en Ingeniería Ambiental - UNSAM

⁷⁷ Grady, C. P. L., Daigger, G. T., Love, N. G., & Filipe, C. D. M. (2011). *Biological Wastewater Treatment* (3rd ed.)

Otra condición importante a la hora de elegir este tipo de tratamientos es la temperatura; si la misma es muy baja, el rendimiento disminuye considerablemente⁷⁸. Además, en determinadas condiciones pueden ser focos de olor.

6.2.4. Tratamiento Terciario

El tratamiento terciario es un proceso de depuración para un efluente cloacal consiste principalmente de la desinfección previo al vuelco. Ya habiéndose degradado la materia orgánica, resta la eliminación de los microorganismos patógenos, que son aquellos capaces de causar una enfermedad infecciosa mediante la ingesta o contacto. Entre los más comunes encontramos los géneros Coli y Salmonella.

La desinfección es el proceso de destrucción o inactivación de los microorganismos. La eficacia de este proceso depende de múltiples variables, como el tipo de mecanismo de acción del agente desinfectante, los patógenos existentes, y el tiempo de contacto.

Entre los diferentes agentes de desinfección, el mecanismo puede ser químico como el cloro, ozono o peróxido de hidrógeno, físico como el calor o el UV. Se busca que sean capaces de destruir los organismos causantes de enfermedades, no requerir demasiado tiempo, ser de fácil obtención y determinar analíticamente su eficacia de forma sencilla.

6.3. Descripción de alternativas (campamento)

En este apartado se discutirán las tres alternativas planteadas para el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales del campamento.

Alternativa A



⁷⁸ Wesley-Eckenfelder (1997) – *Industrial Water Pollution Control*

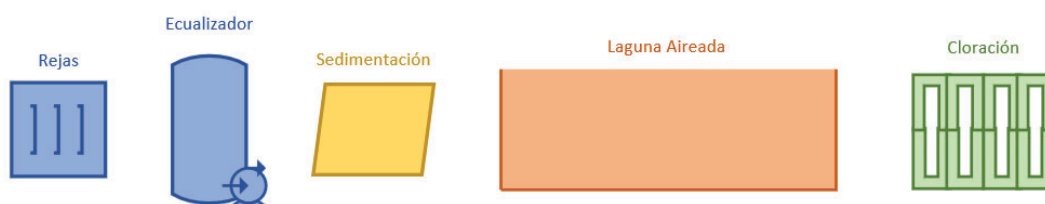
Pretratamiento: Compuesto por unas rejillas de retención de los sólidos más voluminosos y un ecualizador que tendrá el objetivo de homogeneizar la calidad del efluente, así como también nivelar el caudal.

Tratamiento primario: La unidad elegida es un sedimentador, en donde se produce el proceso de sedimentación. Esta configuración de tratamiento primario se repite en las demás alternativas porque, si bien estas unidades no son diseñadas para tal fin, el tiempo de retención y la incorporación de equipos tales como barredores superficiales permiten también la remoción de grasas y aceites remanentes que no han sido separadas en etapas previas.

Tratamiento secundario: Se compone de un proceso biológico de lodos activados y su respectivo sedimentador secundario, siendo un tratamiento convencional altamente probado en varias condiciones. Considerando las condiciones climáticas y temporales que tiene la provincia de Neuquén, en especial en el área del proyecto, el estándar de diseño del reactor de mezcla completa sería en este caso la aireación extendida.

Tratamiento terciario: Se propone utilizar el agente cloro en su estado líquido y/o gaseoso, para luego almacenarse en un tanque con cargadero para el retiro de agua por parte de un camión cisterna.

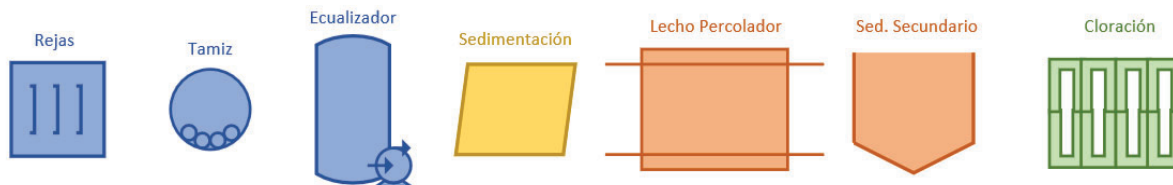
Alternativa B



Compartiendo pretratamiento, tratamiento primario y terciario con la alternativa A, la alternativa B se diferencia en el tratamiento secundario.

Para esta configuración, la depuración biológica se compone de una laguna con aireación mecánica superficial para garantizar aerobiosis. Esta alternativa implica un mayor movimiento de suelos e impermeabilización. El espacio ocupado sería mayor frente a las alternativas A y C, pero también implica un menor costo en materiales necesarios para construir, y también un menor costo operativo. Los barros biológicos se depositan en el fondo de la laguna, y luego deben removerse mecánicamente.

Alternativa C



Pretratamiento: La alternativa C incluye, además de unas rejas y el ecualizador, una etapa de tamizado que tiene el objetivo de remover sólidos finos. La incorporación de esta unidad permite alargar la vida útil de los equipos de conducción, además de mejorar la eficiencia de los tratamientos posteriores.

Tratamiento primario: Al igual que en las otras alternativas, se mantiene un sedimentador con barredor superficial. Dado que existe un tamizado previo, esta unidad requerirá menos mantenimiento y purga de barros; sin embargo, sigue siendo necesaria para mantener una buena eficiencia en el tratamiento secundario.

Tratamiento secundario: En esta alternativa, se propone un tratamiento biológico compuesto por un lecho percolador. Es por ello que, para evitar los posibles taponamientos que puedan generarse por el arrastre de sólidos de diferentes tamaños a esta etapa y que disminuirían la eficiencia del tratamiento, además de otros problemas operativos. Esta unidad viene acompañada de un sedimentador secundario, independientemente de que la cantidad de lodos biológicos sea menor.

Tratamiento terciario: Se repite el mismo tratamiento que la Alternativa A.

6.4. Evaluación y selección de alternativas (campamento)

La metodología de evaluación será el [análisis multicriterio descrito en el anexo 11.2](#), en donde se discutirán las 3 configuraciones planteadas en el apartado anterior en base a una serie de requerimientos provistos por el solicitante del proyecto. Para este proceso, se tomarán en consideración un total de 6 criterios, los cuales se proponen en base a cuestiones generales y particulares del requirente. Los mismos son:

- Consumo energético: Refiere al consumo que insume la operación de la planta. Como característica particular del proyecto para definir el Peso (P) de este criterio, la CPF de Loma Gruesa contempla una central de generación de energía eléctrica alimentada por el gas natural que se extrae en el yacimiento; por ese motivo, la disponibilidad de energía

no sería un problema. Sin embargo, dados los objetivos corporativos del equipo de sustentabilidad de *FracEnergy*, un consumo energético desmedido tampoco sería provechoso porque implicaría un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero.

- Eficiencia del tratamiento: El criterio de puntuación para cada alternativa se basa en las eficiencias de tratamiento bibliográficas. El Peso (P) de este criterio se definió en base al requerimiento de calidad de agua necesario para el destino de la misma; la primera alternativa es el uso para riego de caminos, lo cual implica que la calidad del agua no debe ser tan alta como en un vuelco en cauces pluviales. Como segunda alternativa, se utilizaría para riego de vegetación, lo cual demandaría la misma calidad de agua que para el riego de caminos desde un punto de vista legal, pero más restrictivo si se considera la fauna y flora afectada.
- Espacio: Medido como la cantidad de superficie afectada por el proyecto. La definición del Peso (P) es bajo debido a que existe mucho espacio disponible, y ausencia de napas freáticas detectadas en la zona.
- Operabilidad: Este criterio considera la facilidad para operar la planta. Cabe destacar que es uno de los criterios más importantes porque la demanda de empleo en Neuquén es muy elevada, especialmente para esta clase de proyectos, y la oferta laboral y capacitación, según el equipo de capacitación y atracción de talentos de la compañía, es limitada.
- Diseño: Considera cuestiones constructivas, tales como los materiales requeridos y su integridad, y la capacidad de reemplazo. Si bien no es un requerimiento de Frac Energy, sus últimos diseños para todas sus plantas de proceso es un armado modular, de fácil montaje y desmontaje. Es por ese motivo que los diseños modulares son más atractivos para la compañía.
- Olores: Dado que el tratamiento para este efluente implica degradar contaminantes orgánicos provenientes de baños y cocinas con métodos biológicos, existe una posibilidad de generación de olores que podría llegar al campamento y molestar a los trabajadores. Experiencias pasadas de la empresa con sistemas tercerizados de tratamiento, pobres en diseño y capacidad, han provocado disgusto en otras plantas. Por ese motivo, el peso de este criterio es el máximo.

Una vez definidos los criterios y la importancia o Peso (P) de cada uno de ellos en base a la información brindada por los requirentes del proyecto, se construye la matriz de evaluación en base a la metodología multicriterio (tabla 6.1).

Tabla 6.1: Evaluación de alternativas con método multicriterio de Anexo 11.2

Criterios	(P)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Consumo energético	2	1	2	3
Eficiencia del tratamiento	2	3	1	2
Espacio	1	3	1	2
Operabilidad	3	1	3	2
Diseño	2	3	1	2
Olores	3	3	1	2
		29	21	28

En base a las puntuaciones obtenidas, la alternativa A, que consiste en un arreglo de 4 fases de tratamientos con la característica particular de un tratamiento secundario mediante lodos activos termina siendo la elegida para ejecutar el proyecto. Los lodos activados son una metodología de tratamiento probada en numerosas oportunidades y es probablemente la más utilizada en todo el mundo. Gracias a su tiempo de residencia frente a las lagunas aireadas, permite un desarrollo más compacto, así como también un mejor control de los olores y una eficiencia de tratamiento adecuada a lo largo de todo el año, inclusive bajo diferentes climas. Si bien su operatividad es más compleja que las alternativas de laguna y lechos percoladores, en la industria y la empresa en cuestión existen muchos profesionales e ingenieros que, con una capacitación adecuada, podrán mantener la planta en óptimo funcionamiento. Su consumo energético es más elevado, pero no se trata de una planta de gran tamaño, motivo por el cual su consumo es marginal frente al grueso de todo el yacimiento, además de que la provisión de energía no es un impedimento para Frac Energy.

La alternativa C, consistente en un tratamiento secundario compuesto por lechos percoladores, ha salido segunda por el mínimo margen. Es una alternativa atractiva para este caso y con gran margen de cumplimiento en todos los criterios. Sin embargo, queda como segunda alternativa debido a que no se destaca en ninguno de los puntos críticos por sobre las demás. Si bien su diseño es también compacto en comparación a las lagunas, requiere más unidades que los lodos activados; es más propensa a generar olores y no es capaz de manejar cargas muy variables, condiciones que pueden surgir en base al cronograma de la empresa y especialmente en los momentos en los que se realizan paros de planta por mantenimiento y cambios.

Finalmente, la alternativa B es la menos atractiva de las tres para el proyecto. Si bien cumple con los requerimientos mínimos de tratamiento y es a su vez la alternativa con menor CAPEX y OPEX, en otros yacimientos de la empresa han aplicado a esta misma configuración para el tratamiento de aguas residuales y cuestiones como los olores y el impacto visual ha repercutido negativamente en el bienestar de los trabajadores.

6.5. Memoria descriptiva de la Planta de tratamientos de aguas residuales

La filosofía de diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales consiste en un arreglo de cuatro etapas, y tendrá como objetivo obtener una calidad de agua apta para el riego de los caminos de acceso a yacimiento, los cuales deben mantener una condición lo más húmeda posible con el objetivo de evitar el levantamiento de material particulado, condición que aumenta el riesgo de accidentes vehiculares y vulnera la salud de los trabajadores (figura 6.2) El sistema de tratamiento está diseñado para operar de manera eficiente y segura bajo un esquema de control híbrido, que combina un Sistema Instrumentado de Control (SIC) accionado por un Controlador Lógico Programable (PLC) y una operación manual como respaldo o en situaciones específicas.

El pretratamiento comienza con un caño colector de entrada que incorpora al final de este un arreglo de rejas de limpieza manual que eliminará los sólidos más voluminosos. Luego, el efluente pasará a un caño colector en donde se instalará un caudalímetro electrónico que estará conectado al PLC para enviar la señal de nivel a la computadora de control y registre la información. Luego el efluente ingresa a una cámara de ecualización en donde se homogeneiza el flujo de las diferentes corrientes del campamento, como la cocina y los baños. El ecualizador solo está diseñado para tal fin, pero es posible que dentro de este ocurra un fenómeno de acumulación de materia flotante, motivo por el cual debe mantenerse periódicamente. El egreso del ecualizador se logra mediante dos bombas sumergibles de la marca Motorarg, específicamente el modelo DRT 1100, estando una de operación y otra de respaldo. Por otro lado, se incorpora un sistema difusor de aire de burbuja gruesa CB-300 para evitar un estado de anaerobiosis, de la marca REPICKY. Además, el tanque incorpora dos sensores por alto y bajo nivel, que envían una señal al sistema de control para ordenar el arranque o paro de la bomba.

El tratamiento primario consiste en un equipo diseñado con los lineamientos de un sedimentador primario. En él, ocurrirá toda la remoción de sólidos sedimentables y en suspensión; si bien estas unidades no están diseñadas para la retención de grasas, existen varias etapas anteriores como trampas de grasa y el mismo ecualizador, que retendrán una cantidad considerable de este material, dejando al sedimentador como un afino en materia de grasas y sólidos, el cual además contará con remoción superficial periódica.

Continuando, el tratamiento secundario consistirá en un reactor biológico de lodos activos. El mismo será aireado con difusores de burbuja fina RG-300 de la marca Repicky, asegurando así una correcta aireación que disminuirá la generación de olores. Los barros generados se dirigirán a un digestor para su posterior compostaje. El efluente clarificado tendrá un afino final en una cámara de cloración para asegurar la correcta desinfección del mismo.

Gracias a que existe un sistema de control y se trata de una planta pequeña, el requerimiento del personal operativo es únicamente un supervisor, más un operario de respaldo para las mediciones de laboratorio. Finalmente, se requerirá un apoyo externo ocasional para tareas especializadas como mantenimiento de equipos eléctricos y el manejo de lodos.

Para asegurar que el tren de tratamiento funcione de forma óptima, el personal que esté de permanencia en el campamento tiene la obligación de utilizar correctamente las instalaciones, evitando la disposición de sólidos tales como plásticos, envoltorios, textiles, papel higiénico y otros elementos de higiene personal, restos de comida, aceite crudo, y productos de limpieza no regulados o agresivos como lavandina.

Finalmente, se recomienda incorporar a los procesos de compra tanto para las habitaciones del campamento como para la cocina el uso de detergentes biodegradables, con el objetivo de asegurar un correcto tratamiento y disminución de los nutrientes y otros compuestos de baja biodegradabilidad.

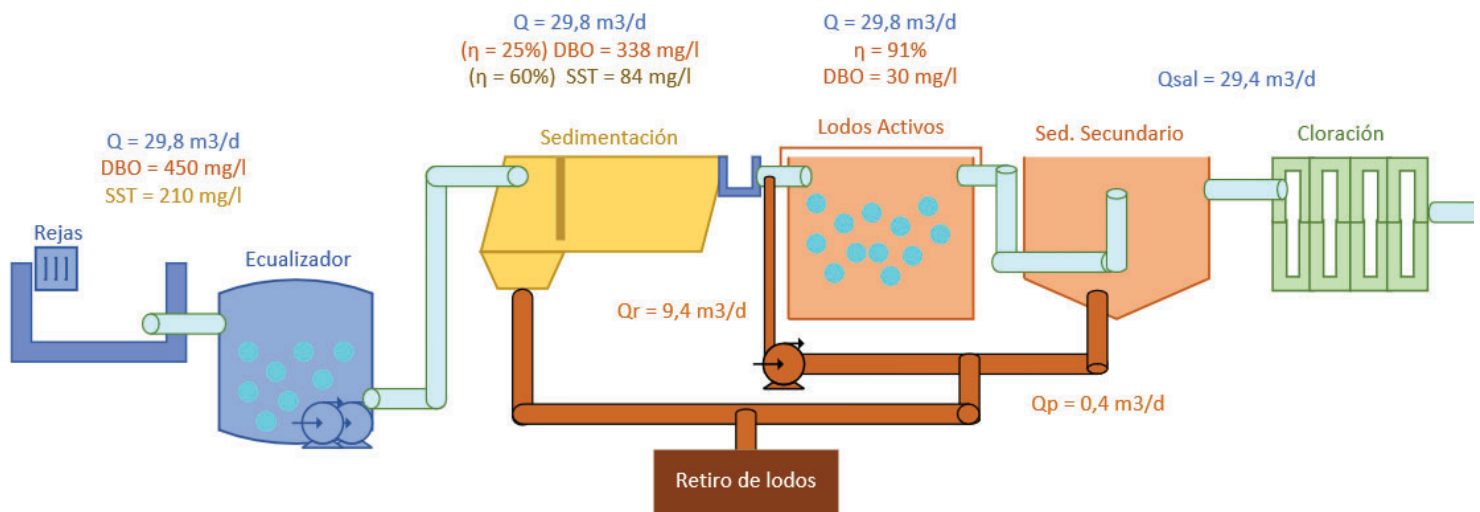


Figura 6.2: Diagrama de flujo de procesos del sistema de tratamiento seleccionado. Fuente: Elaboración Propia

Memoria de cálculo del tratamiento de efluentes del campamento

6.5.1. Pretratamiento

6.5.1.1. Rejas

Para el diseño de las rejas de esta línea, debido al bajo caudal de generación que impide una conducción adecuada de los sólidos por un canal, se optó por una configuración consistente en dos cestos, los cuales se instalan posteriormente al caño colector de entrada a la planta, con un aumento de sección para la recepción de líquidos.

En la siguiente tabla se muestran las dimensiones del cesto de retención (tabla 6.2).

Tabla 6.2: Dimensiones del cesto.

Sistema de cesto enrejado		
Parámetro	Dato	Unidad
Ancho (W)	0,3	m
Largo (L)	0,5	m
Alto (H)	0,5	m
Volumen (V)	0,075	m ³
Área (A)	0,15	m ²

Para el diseño del entramado de rejas, se tomó un grosor de las mismas de 1 centímetro, dejando de espacio entre ellas de 1,5 cm. Esto nos deja con un total de 20 barras frontales y en el fondo (Tabla 6.3) y 12 en los laterales (Tabla 6.4).

Tabla 6.3: Espaciado y grosor de barras en el frontal y fondo

Frontal y fondo		
Parámetro	Dato	Unidad
Espacio entre barras	0,015	m
Grosor de barras	0,01	m
número de barras	20	-
número de espacios	19	-

Tabla 6.4: Espaciado y grosor de barras en el lateral

Laterales		
Parámetro	Dato	Unidad
Espacio entre barras	0,015	m
Grosor de barras	0,01	m
número de barras	12	-
número de espacios	11	-

Finalmente, considerando como referencia una cantidad mínima y máxima de residuos generados por m³ por bibliografía⁷⁹, se estiman entre 0,15 y 1,5 veces por día para la limpieza (tabla 6.5).

Tabla 6.5: Consideraciones cuantitativas para la limpieza del canasto

Limpieza del canasto		
Parámetro	Dato	Unidad
Volumen de agua a tratar	29,8	m ³ /d
Cantidad de residuos separados (min)	0,000375	m ³ _b /m ³
Cantidad de residuos separados (max)	0,00375	m ³ _b /m ³
Volumen del canasto	0,075	m ³
limpiezas por día (min)	0,15	1/d
limpiezas por día (min)	1,5	1/d

6.5.1.2. Vertedero

Para tener un sector de toma de muestras y medición de caudal de respaldo en conformidad con la legislación nacional, se incluye en el diseño un canal con vertedero del tipo triangular (figura 6.3)

Para el diseño de este vertedero, se considera un ángulo del triángulo de salida de 30 centímetros. En base al caudal que reciba la planta, la altura del pelo de agua en el canal variará. En la siguiente Ecuación 6.1 se describe el cambio de altura del líquido en función del caudal que es volcado por el vertedero triangular.

⁷⁹ Cátedra de Procesos Físicoquímicos en Ingeniería Ambiental, UNSAM

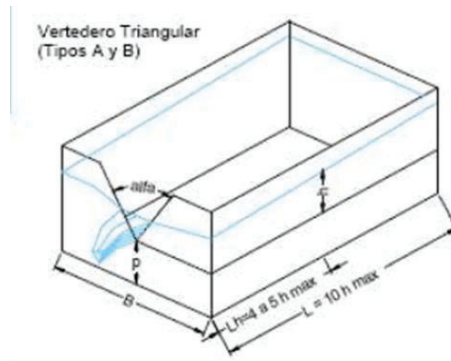


Figura 6.3: Vertedero triangular. Fuente: Cátedra de Procesos Físico-químicos en IA - UNSAM

$$h \text{ (m)} = \left(\frac{Q \text{ (m}^3/\text{s)}}{1,32 \operatorname{tg}(\alpha/2)} \right)^{1/2,47} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

En la siguiente tabla 6.6 se resumen las alturas para el caudal mínimo, medio y máximo esperadas.

tabla 6.6: alturas de pelo de agua en función del caudal de ingreso.

Caudal (m³/h)	h (cm)
Q _{max} = 2,45	8
Q _{med} = 1,24	6
Q _{min} = 0,20	3

Conociendo estos parámetros, en la siguiente tabla 6.7 se enuncian las dimensiones del vertedero, siguiendo la nomenclatura graficada en la figura 6.3.

tabla 6.7: dimensiones del vertedero de entrada

Parámetro	Valor
p (m)	0,5
B (m)	0,8
Lh (m)	0,4
L (m)	0,8

6.5.1.3. Ecualizador

Para el dimensionamiento del ecualizador es necesario conocer la variación de caudal en función del tiempo. Según los datos estimados del proyecto (**apartado 3.2 [Caracterización del agua residual de campamento](#)**) existirá una generación diferenciada entre días de semana y fines de semana, motivo

por el cual debe contemplarse una serie temporal de 1 semana entera de modo tal que se mantenga el mismo caudal de salida en la planta. Si bien sería posible trabajar con un régimen de caudal diferente durante los fines de semana, esta condición pondría mayores dificultades para operar, especialmente teniendo en cuenta el tratamiento biológico.

De forma análoga al [apartado 5.2 \(Tanque Pulmón API 650\)](#), se comienza calculando el caudal medio a partir de la variación de caudal de entrada. Luego, se prosigue con el cálculo de los volúmenes acumulados de ingreso y de salida (V_{ar} y el V_{am}). Una vez obtenidos, se calcula la diferencia entre estos valores para cada franja horaria; los valores máximo (ΔV_{max}) y mínimo (ΔV_{min}) (tabla 6.8) se utilizan para el dimensionamiento de la unidad mediante la siguiente ecuación 6.2, adoptando un margen de seguridad del 20%.

tabla 6.8: Variables de diseño del Ecualizador

Variables de diseño: Ecualizador		
Parámetro	Dato	Unidad
Caudal medio de salida (Q_{med})	1,24	m ³ /h
ΔV_{min}	-4,7	m ³
ΔV_{max}	25,7	m ³
Margen de seguridad	20	%

En base a estas variables se calcula el volumen mínimo requerido del tanque (V_{minTK}) (Ec. 6.2)

$$V_{min-req} = (|\Delta V_{min}| + \Delta V_{max}) \cdot 1,2 = 36 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 6.2})$$

En base a este resultado, se decide adoptar un diseño de ecualizador cúbico (tabla 6.9).

tabla 6.9: Dimensiones del Ecualizador

Dimensiones: Ecualizador		
Parámetro	Dato	Unidad
Volumen	42,9	m ³
Alto	3,5	m
Largo/ancho	3,5	m

En lo que respecta al sistema de aireación, el mismo se instala con el objetivo de prevenir condiciones anaeróbicas que puedan generar olores desagradables y otro tipo de sustancias, así como también prevenir la deposición de sólidos sedimentables, los cuales serán tratados en posteriores etapas.

De acuerdo a Metcalf & Eddy, un tanque de homogeneización requiere una tasa de aire de 0,02 metros cúbicos normales por minuto por cada metro cúbico del reactor. En consecuencia, para que el tanque ecualizador tenga la cantidad de aire suficiente y una buena mezcla, el caudal mínimo de aire para el mismo estando lleno debe ser de $0,85 \text{ m}^3_{\text{aire}}/\text{min}$

Según la especificación del modelo recomendado por el fabricante (Repicky CB-300), se requieren 9 discos distribuidos uniformemente funcionando a $6 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

6.5.2. Tratamiento Primario

El tratamiento primario de este efluente consiste en un sedimentador del tipo rectangular que permitirá la remoción parcial de los sólidos en suspensión y parte de la carga orgánica del efluente. Tomando valores bibliográficos⁸⁰, una opción conservadora sería considerar un 60% para los sólidos sedimentables, y 25% para la carga orgánica, siendo estas las cotas inferiores.

Esta unidad no presenta aireación ni agitación, permitiendo un flujo laminar estable y, por lo tanto, la deposición de barros en el fondo y la flotación de grasas en su superficie.

El fenómeno de separación de este proceso será una sedimentación de partículas discreta, en la cual se descarta su interacción con otras partículas (floculación).

6.5.2.1. Sedimentación primaria

De forma análoga al capítulo [5.6.5 Sedimentación](#), el proceso de diseño de un sedimentador comienza con la selección de un valor de carga superficial (C_s) adecuado (Ec. 6.3). Siguiendo parámetros bibliográficos de Metcalf & Eddy, la carga superficial para aguas residuales se sitúa normalmente entre los 30 y $50 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{día}$; para esta unidad, se asume la cota inferior de $30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{día}$, lo cual asegura una mayor eficiencia.

$$\text{Carga superficial } (\text{m}^2/\text{m}^3.\text{día}) = \text{Caudal } (\text{m}^3/\text{día}) / \text{Área } (\text{m}^2) \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Adoptando un valor de Carga superficial (C_s) de $30 \text{ m}^2/\text{m}^3.\text{día}$ se obtiene el área (A) del sedimentador (Ec. 6.4):

⁸⁰ Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* - Capítulo 5-7 – Pág. 396 – Sedimentación Primaria

$$\text{Área (m}^2\text{)} = Q \text{ (m}^3\text{/día)} / C_s \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{.día)} = 29,8 \text{ m}^3\text{/d} / 30 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{.día)} \cong 1 \text{ m}^2 \text{ (Ec. 6.4)}$$

El siguiente parámetro es el tiempo de retención. Según la cátedra FIUBA de Ingeniería sanitaria, este valor varía entre 60 y 120 minutos para aguas residuales domésticas.

Adoptando un tiempo de retención (t_{rh}) de 90 minutos, se obtiene el volumen (V) de la unidad (Ec. 6.5) y, utilizando el área calculada en Ec. 6.4, se obtiene la profundidad (H) (Ec. 6.6). El motivo de decisión de adoptar este tiempo de retención es evitar tiempos de nula aireación elevados que produzcan malos olores; además, el tratamiento continúa posteriormente con un reactor de lodos activos, que también puede separar sólidos en el sedimentador secundario.

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \frac{Q}{t_{rh}} = 1,24 \frac{\text{m}^3}{h} \cdot 1,5 h = 1,8 \text{ m}^3 \text{ (Ec. 6.5)}$$

$$\text{Profundidad (m)} = \text{Volumen (m}^3\text{)} / \text{Área (m}^2\text{)} = 1,8 \text{ m}^3 / 1 \text{ m}^2 = 1,8 \text{ m} \cong 2 \text{ m} \text{ (Ec. 6.6)}$$

En general, para el diseño de las proporciones del sedimentador se suele adoptar una relación Largo (L) y Ancho (W) de 3:1. Tomando eso como parámetro pueden definirse todas las dimensiones del sedimentador. En la siguiente tabla 6.10 se resumen las mismas junto con sus respectivos parámetros ajustados según valores constructivos.

tabla 6.10: Variables de diseño de la unidad de sedimentación

Variables de diseño: Sedimentación		
Parámetro	Dato	Unidad
Caudal medio de salida (Q_{med})	1,24	m ³ /h
Carga Superficial (C_s)	33	m ³ /m ² .día
tiempo de retención (t_{rh})	87	min
Volumen (V)	2,2	m ³
Ancho (W)	0,5	m
Largo (L)	1,8	m
Profundidad (H)	2	m

Previo a la zona de salida además se instalará, en los últimos 25 centímetros dentro de la zona de sedimentación, una placa que retendrá los posibles flotantes que puedan acumularse en la unidad.

El ingreso se da por una cañería de PVC de 2 pulgadas, en donde el efluente cae por gravedad hacia el comienzo de la unidad de sedimentación. Para disminuir la energía cinética del efluente, se instala una placa vertical perforada con un total de 6 orificios distribuidos en dos columnas.

Los parámetros de la placa son enumerados en la siguiente tabla 6.11. La misma incorpora el Gradiente de paso (G) del efluente según la ecuación 6.7, siendo n el coeficiente de manning, adoptado en 0.011 por decidir utilizar un material metálico. El Gradiente normalmente debe situarse entre 15 y 20 1/s para lograr una eficiencia adecuada. Un gradiente mayor a 20 podría provocar suspensiones indeseadas, mientras que un gradiente menor a 15 provocaría una mayor acumulación de sólidos en la zona de ingreso.

$$G = \sqrt{g \cdot \rho / \mu} \cdot R_H^{-0,67} \cdot U^{1,5} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

En donde g hace referencia a la gravedad, ρ a la densidad del fluido, μ a la viscosidad, U a la velocidad de paso (Ec. 6.8) y R_H al radio hidráulico (Ec. 6.9)

$$U = Q / (\pi \cdot r^2) \quad (\text{Ec. 6.8})$$

$$R_H = r/2 \quad (\text{Para cañerías circulares completamente sumergidas}) \quad (\text{Ec. 6.9})$$

Tabla 6.11: Variables de diseño del ingreso a la unidad de sedimentación

Variables de diseño: Ingreso Sedimentación		
Parámetro	Dato	Unidad
Ancho (W)	0,5	m
Profundidad (L)	1	m
Gradiente en orificios (G)	17,8	1/s
N° orificios totales	10	-
Radio de los orificios	13	mm

Se diseñó la zona de salida por rebalse a través de vertederos triangulares dispuestos en el ancho W del sedimentador. Para el diseño de estos vertederos, los cuales se ubicaran con una disposición equidistante entre sí, se deben adoptar una serie de parámetros, los cuales son:

- altura mojada (h)
- altura del triángulo (h_t)
- ángulo del triángulo (90°)
- altura por sobre el triángulo (h_r)
- ancho de los vertederos (W_v)
- distancia entre vertederos (S)

Adoptando una altura de pelo de agua de 2 centímetros (cm) y utilizando la fórmula de Gourley para vertederos triangulares (Ec. 6.10) se obtiene el caudal de paso por el vertedero (Q_v)

$$Q_v(m^3/h) = 1,32 \cdot \tan(90/2) h^{2,47} / 3600 = 0,25 m^3/h \quad (\text{Ec. 6.10})$$

Con el dato de caudal y conociendo el caudal de ingreso a la unidad, puede obtenerse la cantidad de vertederos necesarios (Ec 6.11)

$$n = Q_v / Q_{med} = 1,24 / 0,53 = 4,05 \quad (\text{Ec. 6.11})$$

Cómo este valor debe ser un número natural, se decide adoptar $n = 5$. Utilizando la Ec. 6.x se obtiene una nueva altura mojada aproximada de 1,8 centímetros.

Adoptando un ancho de vertedero W_v de 8 centímetros y tomando un total de 5 vertederos, se calcula la distancia entre los vertederos con la siguiente Ec. 6.12.

$$\begin{aligned} S \cdot (n + 1) &= B - W_v \cdot n = 0,5 m - 0,3 m = 0,2 m \quad (\text{Ec. 6.12}) \\ S &= 0,05 m \end{aligned}$$

El resumen de los parámetros puede observarse en la siguiente tabla 6.12.

Tabla 6.12: Variables de diseño del egreso de la unidad de sedimentación

Variables de diseño: Egreso Sedimentación		
Parámetro	Dato	Unidad
N°Vertederos de salida	5	-
altura mojada (h)	1,8	cm
altura del triángulo (h_t)	4	cm
ángulo del triángulo	90	°
altura por sobre el triángulo (h_r)	5	cm
ancho de los vertederos (W_v)	8	cm
distancia entre vertederos (S)	5	cm

Finalmente, se calcula la canaleta de recolección de 20 cm de espesor y 20 cm de profundidad ($0,06 \text{ m}^2$), dejándonos con una velocidad de líquido de $0,01 \text{ m/s}$ (Ec 6.13), la cual se encuentra dentro de parámetros normales para conducción de líquidos por gravedad.

$$\text{Velocidad en canaleta (m/s)} = 1,24 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ h/s} / 0,04 \text{ m}^2 = 0,01 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 6.13})$$

Zona de acumulación de barros y producción de lodos

Para el diseño de la zona de acumulación de barros, se toman dos secciones:

La primera de ellas tendrá un ancho W igual a la unidad, con un largo L_{b1} igual a $2/3$ del largo del sedimentador (es decir, 1.2 metros), y contará con una pendiente de 10 centímetros por metro a lo largo que permitirá un arrastre natural, dado que el sedimentador no incorporará barredor de fondo.

La segunda sección, de largo L_{b2} igual a 0,6 m, contará con una tolva de pendiente de al menos 60° en los cuatro sentidos en forma de pirámide truncada invertida.

Para calcular el volumen de la tolva, se requiere estimar la producción de lodos de forma tal que la cantidad de purgas por día esté dentro de valores manejables por la operación. Según las normas del Ente Nacional de Obras Hídricas y Saneamiento (ENOHSA) el tiempo de purga recomendado es cada 6 horas. Sin embargo, para simplificar la operatoria se asume una purga por día.

Para estimar la producción de lodos (P_x) del sedimentador, se requiere contemplar el caudal de efluente, la cantidad de sólidos suspendidos contenidos en el mismo y la eficiencia de remoción de la unidad esperada (Ec. 6.14)

$$P_x = 60\% \cdot 29,8 \text{ m}^3/d \cdot 210 \text{ g/m}^3 = 3,76 \text{ kg/d} \quad (\text{Ec. 6.14})$$

Una vez obtenido el peso de los lodos producidos, se estima el volumen de los lodos a purgar; para ello, se asume una densidad levemente superior a la del agua ($\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$) y un 6% de proporción de sólidos suspendidos (Ec. 6.15)

$$V_x = P_x / (1030 \text{ kg/m}^3 \cdot 6\%) = 0,06 \text{ m}^3/d \quad (\text{Ec. 6.15})$$

Asumiendo una purga diaria, el volumen de la tolva debería ser aproximadamente de $0,06 \text{ m}^3$. Utilizando la ecuación de volumen de una pirámide truncada considerando un $W_{\text{sup_tol}}$ de 0,5 m, $W_{\text{inf_tol}}$ de 0,25 m y h_{tol} de 0,25 m, obtenemos un volumen de $0,07 \text{ m}^3$ (Ec. 6.16). Esto se traduce en un ángulo de 63° aproximadamente .

$$V_{\text{Tol}} = h_{\text{tol}}/3 \cdot (W_{\text{sup_tol}}^2 + W_{\text{inf_tol}}^2 + \sqrt{W_{\text{sup_tol}}^2 \cdot W_{\text{inf_tol}}^2}) \quad (\text{Ec. 6.16})$$

6.5.3. Tratamiento Secundario

La eficiencia del tratamiento secundario por lodos activos depende fuertemente de la cinética microbiana del reactor. Como no se han realizado estudios en laboratorio, se tomarán valores bibliográficos para el diseño de estas unidades. Las principales fuentes de información serán los libros de Metcalf & Eddy y Eckenfelder.

6.5.3.1. Sistema de lodos activos

El sistema de tratamiento secundario consta de dos unidades y es necesario contemplarlas en conjunto para su dimensionamiento; esto es debido a que los lodos biológicos que se separan del efluente clarificado en el sedimentador secundario son recirculados al reactor de mezcla completa con el objetivo de mantener la edad de los microorganismos.

Para realizar el dimensionamiento del reactor biológico de mezcla completa, se utilizan una serie de balances de materia en distintos volúmenes de control, considerando tanto el contenido de materia

orgánica a degradar, como la biomasa que lo consume. Un planteo genérico de balance de materia o masa en un determinado volumen de control se ejemplifica en la siguiente expresión (Ec. 6.17):

$$\text{Acumulación (A)} = \text{Entrada (E)} - \text{Salida (S)} + \text{Generación (G)} - \text{Decaimiento (D)} \quad (\text{Ec. 6.17})$$

En donde “*acumulación*” se refiere a la materia analizada que se acumula en dicho volumen de control, “*entrada*” es el transporte neto de dicha materia y “*salida*” su egreso del sistema; adicionalmente, pueden considerarse los términos de “*generación*” y “*decaimiento*”, los cuales toman en consideración las reacciones fisicoquímicas o biológicas que pueden ocurrir dentro del volumen de control y dependen de la interacción entre los distintos componentes que integran el sistema.

El volumen de control es definido arbitrariamente, pudiendo ser no necesariamente igual a los volúmenes de las unidades. Para el diseño del tratamiento secundario, los volúmenes de control a considerar se ejemplifican en la siguiente figura 6.4.

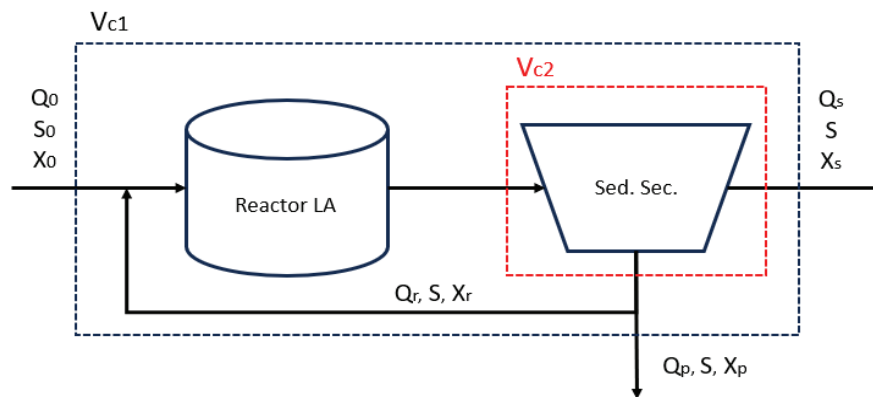


Figura 6.4: representación gráfica de los balances de masa considerados para el diseño de tratamientos biológicos. V_c = Volumen de control.

Considerando el volumen de control V_{c1} observado en la figura 6.9, el cual considera todo el sistema de tratamiento biológico, una expresión de balance de masa más compleja puede definirse mediante la siguiente Ec. 6.18.

$$V_{c1} \frac{dC}{dt} = Q_0 \cdot C_0 - Q_s \cdot C_s - Q_p \cdot C_p + V_{c1} \cdot r_c \quad (\text{Ec. 6.18})$$

En donde C hace referencia a un compuesto o componente de interés, pudiendo ser la biomasa (**X** o **SSV**) o el sustrato a degradar (**S**). Q_0 hace referencia al caudal de entrada, Q_s al caudal de salida principal y Q_p el caudal de purgado, una segunda salida que se considera en el diseño de los sistemas de tratamiento biológicos para separar la biomasa una vez el sustrato fue degradado. Finalmente, r_c hace referencia a la tasa de transformación neta del componente de interés (generación - decaimiento), siendo esta una variable que puede depender del tiempo.

Esta segunda expresión es muy compleja para resolver. Es por este motivo que, para utilizar balances de masa en el diseño de reactores biológicos, es necesario realizar una serie de consideraciones que simplifican la dinámica real que tiene el sistema; sin embargo, permiten modelar con gran precisión los procesos que ocurren dentro del reactor y el sedimentador. Las suposiciones son las siguientes:

1. El reactor funciona en estado estacionario; esto quiere decir que la concentración de los componentes (biomasa y sustrato) no dependen del tiempo.
2. Mezcla completa dentro del reactor; la concentración de salida del sustrato, y que ingresa al sedimentador secundario, es igual a la que se obtiene dentro del mismo.
3. Efluente a tratar estéril, carente de microorganismos ($X_0 = 0$).
4. Concentración de microorganismos a la salida nula; dicho de otras palabras, un funcionamiento adecuado del sedimentador secundario ($X_s = 0$).
5. Concentración de microorganismos en la purga idéntica a la del reciclo ($X_p = X_r$).
6. No ocurre degradación de sustrato en el sedimentador secundario.
7. Se adopta una cinética de crecimiento neta de los microorganismos r_x en base al modelo de Monod de primer orden (Ec. 6.19). Este factor se modela por dos términos, uno de generación r_g , y otro de decaimiento r_d .
8. La tasa de decaimiento del sustrato en el reactor secundario es directamente proporcional a la cinética de generación de la biomasa, afectada por un factor de rendimiento $Y_{x/s}$, el cual mide el ratio de generación de biomasa en gramos por cada gramo de sustrato consumido (gX/gS). (Ec. 6.20)

$$r_x = r_g + r_d = \mu_{max} \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot X - k_d \cdot X \quad (\text{Ec. 6.19})$$

$$r_g = r_s \cdot Y_{x/s} \quad (\text{Ec. 6.20})$$

En donde μ (1/s) es la velocidad de reacción de primer orden y la cual presenta una dependencia en función de la temperatura (Ec. 6.21) y k un coeficiente de decaimiento que describe la tasa de muerte o mantenimiento celular. Por otro lado, K_s una constante de saturación que representa la concentración de sustrato a la cual la tasa de crecimiento es la mitad de μ , y está directamente relacionada con la afinidad de la biomasa que lo degrada (a mayor K_s , más rápidamente satura el sistema e inhibe el crecimiento y la degradación; un K_s alto es común en sustratos con cierta toxicidad).

$$\mu = \mu_{20^\circ C} \varphi^{(T-20^\circ C)} \quad (\text{Ec. 6.21})$$

En donde gamma es un coeficiente sin unidades extraído de la bibliografía.

Según valores bibliográficos provistos por Metcalf & Eddy, se expresan los valores adoptados para el dimensionamiento del reactor (tabla 6.13). El coeficiente cinético de crecimiento adoptado se sitúa en el límite inferior; esto es debido a que se asume que la cinética de crecimiento se verá afectada por las condiciones climáticas de muy baja temperatura durante las noches, y se busca un escenario más conservador. A su vez y debido a los mismos motivos, se asume un coeficiente de decaimiento más cercano al límite superior.

Tabla 6.13: Variables de diseño típicas para el modelamiento de procesos de lodos activados. Fuentes: Metcalf & Eddy - Table 7-9 - Coeficientes cinéticos típicos del proceso de lodos activados para la remoción de materia orgánica de aguas domésticas.

Variables de diseño: Reactor de L.A.				
Coeficientes típicos	Unidad	Rango	Típico	Adoptado
$\mu_{20^{\circ}\text{C}}$	1/s	2-10	5	2
K_s	1/s	25-100	60	60
k_d	1/s	0,06 a 0,2	0,12	0,16
$Y_{x/s}$	gx/gs	0,4 a 0,8	0,6	0,6
X	mg/l	1500-4000	2500	2500
$\mu_{12^{\circ}\text{C}}$	1/s	Ec. 6.x	-	1,08

Considerando el tratamiento primario, el cual tiene una eficiencia del 25% de remoción de DBO, la concentración del sustrato al ingreso se estima en unos 338 mg/l.

Utilizando la Ec. 6.18 y tomando las suposiciones anteriormente mencionadas, se plantea el balance de masa de sustrato en el V_{C1} (Ec. 6.22).

$$0 = Q_o \cdot S_o - Q_s \cdot S - Q_p \cdot S - r_s \cdot V \quad (\text{Ec. 6.22})$$

Despejando volumen y simplificando términos mediante un balance de Caudal (Ec. 6.17) en el V_{C1} y la utilización de la Ec. 6.19 y Ec. 6.20., obtenemos la siguiente expresión que determina el volumen requerido para el reactor (Ec. 6.23).

$$V = \frac{Q_o(S_o - S) \cdot Y_{x/s} (K_s + S)}{\mu_{12^\circ C} \cdot X \cdot S} \quad (\text{Ec. 6.23})$$

Tomando en consideración el escenario de temperatura media anual siendo de 12 grados centígrados⁸¹. Con un coeficiente gamma⁸² de 1,07 se estima la velocidad de crecimiento **μ en 1,08 1/s.**

$$V = \frac{29,8 (m^3/d) \cdot (338 (mg/l) - 30 (mg/l)) \cdot 0,6 (mgSSV/mg S) \cdot (60 (mgS/l) + 30 (mgS/l))}{1,08 (1/s) \cdot 2500 (mgSSV/l) \cdot 30 (mgS/l)}$$

$$V = 6,1 m^3$$

Continuando con el diseño, se adopta una profundidad de reactor *h* de 3,5 metros, siguiendo lineamientos de la cátedra de diseños de tratamiento biológico de la UNSAM el cual recomienda entre 3 y 6 metros; Si bien esta condición no será la más beneficiosa para el sistema de aireación de fondo mediante burbuja fina, se considera que de esta forma el mantenimiento de la unidad se simplificará.

En la siguiente tabla 6.14 se especifican las dimensiones del reactor calculadas y adoptadas.

tabla 6.14: dimensiones calculadas y adoptadas para el reactor de lodos activados.

Dimensiones calculadas y adoptadas del reactor de L.A.			
Parámetro	Unidad	Calculado	Adoptado*
Largo	m	1,87	2
Ancho	m	0,93	1,1
Profundidad	m	3,5*	3,5
Área	m ²	1,7	2
Volumen	m ³	6,1	7

Producción de lodos y caudal de reciclo

Para calcular la producción de lodos estimada, se considera la relación directa entre la generación de biomasa y el consumo de sustrato. Para hallar este valor, se utiliza la siguiente Ec. 6.24

⁸¹ Estudio de Impacto Ambiental - Perforación de pozo TPT LA-100x

⁸² Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* - Table 8-10: Activated Sludge kinetic coefficients at 20°C

$$P_x (kg/d) = Y_{obs} \cdot Q_o \cdot (S_0 - S) \quad (\text{Ec. 6.24})$$

Y_{obs} viene del término “observed yield” y es una corrección del $Y_{x/s}$. Si bien el reactor produce microorganismos con el ratio definido por la variable $Y_{x/s}$, y es el que se utiliza para modelar procesos cinéticos de degradación, la producción de lodos contempla el reciclo de los barros al reactor biológico y la tasa de decaimiento por muerte celular. (Ec. 6.25)

$$Y_{obs} = \frac{Y_{x/s}}{1 + k_d \theta_c} \quad (\text{Ec. 6.25})$$

En donde k_d es la constante de decaimiento de la Tabla X. y θ_c el tiempo de retención celular (Ec. 6.26), el cual se define como el tiempo medio de residencia de los microorganismos en el sistema. Para tratamientos que no tienen reciclo de barros, este valor es idéntico al tiempo de retención hidráulico. Sin embargo, para reactores con reciclo este valor es mayor.

$$\theta_c = \frac{V \cdot X}{Q_p \cdot X_p} \quad (\text{Ec. 6.26})$$

Para obtener el tiempo de retención celular, es necesario conocer el caudal Q_p y la concentración del licor mezcla X_p en la purga. Para ello, es necesario realizar un balance de materia en el Volumen de Control V_{c1} , siguiendo como componente de interés a la biomasa (Ec. 6.27).

$$0 = Q_o \cdot X_o - Q_s \cdot X_s - Q_p \cdot X_p - r_x \cdot V \quad (\text{Ec. 6.27})$$

Siguiendo los supuestos de diseño mencionados anteriormente, X_o y X_s se consideran cero, por lo que la ecuación se resume a la purga y la generación neta de microorganismos en el sistema (Ec. 6.28).

$$Q_p = \frac{r_x \cdot V}{X_p} \quad (\text{Ec. 6.28})$$

Reemplazando con la ecuación 6.27 y asumiendo una concentración en el licor mezcla de purga 4 veces mayor a la del reactor ($X_p = 4 \cdot X$), se obtiene la siguiente expresión (Ec. 6.29)

$$Q_p = \frac{V \cdot X}{4 \cdot X} (\mu_{max} \cdot \frac{S}{K_s + S} - k_d) \quad (\text{Ec. 6.29})$$

$$Q_p = \frac{6,5 \text{ m}^3 \cdot 2500 \text{ mg/l}}{4 \cdot 2500 \text{ mg/l}} (1,08 \text{ 1/d} \cdot \frac{30 \text{ mg/l}}{60 \text{ mg/l} + 30 \text{ mg/l}} - 0,11 \text{ 1/d})$$

$$Q_p = 0,4 \text{ m}^3/d$$

Obtenido el caudal de purga, es posible resolver el sistema de ecuaciones 6.25, 6.26 y 6.27.

$$\theta_c = \frac{6,5 \text{ m}^3 \cdot 2500 \text{ mg/l}}{0,32 \text{ m}^3/d \cdot 4 \cdot 2500 \text{ mg/l}} = 5 \text{ d}$$

$$Y_{obs} = \frac{0,6 \text{ gSSV/gS}}{1 + 0,11 (1/d) 5 (d)} = 0,35 \text{ gX/gS}$$

$$P_x (\text{kg/d}) = 0,38 \text{ gX/gS} \cdot 29,8 \text{ m}^3/d (338 \text{ gS/m}^3 - 30 \text{ gS/m}^3) (\text{kg}/1000\text{g}) = 3,2 \text{ kg/d}$$

De este parámetro, también es posible calcular el caudal de salida de la planta Q_s (Ec. 6.30).

$$Q_s = Q_0 - Q_p = 29,8 - 0,4 = 29,4 \text{ m}^3/d \quad (\text{Ec. 6.30})$$

Adicionalmente, se puede calcular el caudal de reciclo del sistema realizando un balance de masa en el sedimentador secundario (V_{C2}) de la figura X (Ec. 6.31)

$$X(Q_0 + Q_r) = X_s Q_s + X_p Q_p \quad (\text{Ec. 6.31})$$

Luego, sabiendo que X_s es cero, y asumiendo nuevamente una concentración de SSV en la purga cuatro veces mayor a la del reactor ($X_p = 4 \cdot X$), obtenemos la siguiente expresión (Ec. 6.32):

$$Q_r = \frac{Q_0 - 4 Q_p}{3} = 9,4 \text{ m}^3/d \quad (\text{Ec. 6.32})$$

Requerimiento de aireación

Para el requerimiento de oxígeno (**RO**), existe una fórmula empírica provista por Metcalf & Eddy⁸³, que define la cantidad teórica de oxígeno que necesita para funcionar correctamente un reactor (Ec. 6.33). Este suministro de oxígeno debe ser suficiente para satisfacer la DBO a tratar, la respiración endógena, la mezcla en el reactor, y mantener un oxígeno disuelto (**OD**) de al menos 1 mg/l.

⁸³ Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* - Capítulo 7 – Requerimiento de oxígeno - Ecuación 7-59.

$$RO \text{ (kg } O_2/d) = Q_o (S_o - S) - 1,42 P_x \text{ (Ec. 6.33)}$$

A partir del requerimiento de oxígeno, se calcula el requerimiento de oxígeno estándar (SOR), que toma en consideración las variables externas de transferencia como la presión y la temperatura externas (Ec. 6.34).

$$SOR \text{ (kg } O_2/d) = \frac{RO \text{ (kg } O_2/d)}{((\beta \cdot C_w - C_L)/C_s) \cdot 1,024^{(T-20^\circ C)} \cdot \alpha_c} \text{ (Ec. 6.34)}$$

En donde β es 1, de corrección por salinidad. C_L es la condición de funcionamiento, siendo 1,5 mg/L para Lodos activos. C_s es la concentración de oxígeno saturado a 20°C y 1 atm, mientras que C_w es la concentración por la temperatura y presión en el sitio de la planta (**ver apartado 11.5 [Misceláneos](#)**). T hace referencia a la temperatura del volumen de agua en el reactor, y no la atmosférica, la cual se considerará igual a la estándar (20°C). En general, en condiciones normales de presión y temperatura, el SOR es equivalente al RO, siendo afectado únicamente por el factor de reaseguro α_c .

Luego, la aireación se calcula en función de la tecnología disponible. En la actualidad, el más recomendado y utilizado son los difusores de fondo, por tener la mejor eficiencia de transferencia de oxígeno sumado a un menor costo energético.

En la mayoría de proveedores, el rendimiento de difusores es conocido como **SOTE**, y es un parámetro que contempla la capacidad de transferencia de oxígeno la cual está afectada por las siguientes variables:

- Tamaño de burbuja: A menor tamaño, mayor relación superficie/volumen por burbuja y, por lo tanto, mayor eficiencia.
- La profundidad de instalación de difusores: A mayor profundidad, mayor eficiencia.
- El caudal de aire por difusor: A menor caudal por difusor, mayor eficiencia.
- La densidad de difusores: A mayor densidad, mayor eficiencia.

Conociendo nuestro SOR, se diseña un sistema de aireación que sea igual o mayor a ese SOR. Este diseño debe contemplar que se sopla aire atmosférico, por lo que además hay que contemplar la fracción de oxígeno en el aire (Ec. 6.35)

$$Q_{O_2} \text{ (Kg } O_2/d) = Q_{aire} \text{ (Nm}^3/d) \cdot 0,28 \text{ (Kg } O_2/Nm^3) \text{ (Ec. 6.35)}$$

El caudal de aire entregado al sistema Q_{aire} está dado por la siguiente Ec. 6.36, la cual contempla el SOTE, la altura del reactor, el caudal por difusor seleccionado y el número de difusores.

$$Q_{aire} (Nm^3/d) = Q_{dif} (Nm^3/d) \cdot N^{\circ}Dif \cdot \%SOTE (1/m) \cdot h_{Reactor} \quad (Ec. 6.36)$$

Haciendo uso de las Ec. 6.33 se obtiene el Requerimiento de oxígeno.

$$RO (kg O_2/d) = 29,8 m^3/d (338 g/m^3 - 30 g/m^3) kg/1000g - 1,42 \cdot 4 kg/d = 3,5 kg O_2/d$$

Contemplando una altitud de entre 900 y 1000 metros sobre el nivel del mar, la concentración de saturación de oxígeno disuelto disminuye a un 89% respecto a la línea de base (**ver apartado 11.5 [Misceláneos](#)**). En base a esta condición de operación y utilizando la ecuación 6.34, se obtiene el requerimiento de oxígeno estándar

$$SOR (kg O_2/d) = \frac{3,5 (kg O_2/d)}{((8,1 mg/l - 1,5 mg/l) / 9,09 mg/l) \cdot 0,9} = 5,4 kg O_2/d$$

Finalmente, asumiendo que el aire contiene, en promedio, 280 gramos por Nm^3 , se calcula el caudal de aire necesario en $19,3 Nm^3/d$. Los valores se resumen en la siguiente tabla 6.15.

Tabla 6.15: requerimientos mínimos de aireación

Parámetro	Valor	Unidad
RO	9,5	kg O_2/d
SOR	17,8	kg O_2/d
Q_{aire}	63,5	Nm^3/d

Equipamiento de aireación

El equipo seleccionado para este proyecto son los sopladores de disco de burbuja fina RG-300 de la marca Repicky⁸⁴ (**ver apartado 11.5 [Misceláneos](#)**). Las especificaciones del fabricante se resumen en la siguiente tabla 6.16.

Tabla 6.16: Parámetros relevantes de diseño y operación de los difusores de burbuja fina RG-300.

Parámetro	Unidad	Rango
Densidad de difusores	dif/ m^2	1 a 6
Caudal por difusor	Nm^3/h	2 a 8
SOTE	%/m	5,5 a 8

⁸⁴Difusor de aire de membrana RG-300, Repicky. Fuente: <https://www.repicky.cl/index.php/difusor-aire-de-membrana.html>

En base a estos mismos, se consideran las siguientes configuraciones de aireadores y sus respectivos parámetros de operación y mantenimiento (tabla 6.17). Para la operación normal, se contará con dos líneas de 3 aireadores en paralelo dispuestas a lo largo de la unidad, sumando un total de 6 aireadores. Durante el mantenimiento el cual será cruzado, se remueve una de las dos líneas y se aumenta el caudal de aireación de la línea que queda operativa. Ambas condiciones cumplen el requerimiento de aire.

Tabla 6.17: parámetros adoptados para el diseño y la operación del sistema de aireación. *en base a curvas de eficiencia incluidas en la ficha técnica del modelo de aireación RG-300.

Parámetro	Unidad	Adoptado	Mantenimiento
N° de difusores	un.	8	4
Densidad de difusores	dif/m ²	4	2
Caudal por difusor	Nm ³ /h	2	3
SOTE*	%/m	8	7
Q _{aire-real}	Nm ³ /d	107,5	70,6

$$Q_{\text{aire-operación}} (\text{Nm}^3/\text{d}) = 2 (\text{Nm}^3/\text{d}) \cdot 6 \cdot 7,5\% (1/\text{m}) \cdot 4 (\text{m}) = 86,4 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{aire-mantenimiento}} (\text{Nm}^3/\text{d}) = 4 (\text{Nm}^3/\text{d}) \cdot 3 \cdot 6,5\% (1/\text{m}) \cdot 4 (\text{m}) = 74,9 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

Verificación de variables operativas y de diseño

Sumando a muchas de las variables ya mencionadas en el presente desarrollo, existen otras que integran el sistema y que, siguiendo las buenas prácticas, es adecuado validarlas para asegurar la consistencia del diseño. Entre ellas encontramos:

- Relación alimento/biomasa (F/M) (Ec. 6.37): Ampliamente utilizada para el control de los reactores de lodos activos. Si un F/M es bajo significa que hay poco sustrato para degradar en comparación a los microorganismos; si es alto, es lo opuesto. Según Metcalf & Eddy, la relación debe encontrarse entre 0.2 a 0.6 1/día. Si bien existen muchos ejemplos en el cual este parámetro se ha utilizado para el diseño, en la práctica esto puede llevar a errores operacionales. Muchas plantas operan fuera de ese rango pero obtienen buenos resultados y esto se debe a, entre otras cuestiones, las condiciones climáticas, la población microbiana y el tipo de sustrato.

$$F/M = \frac{S_o \cdot Q_o}{X \cdot V} \quad (\text{Ec 6.37})$$

- Tasa de reciclo (α): Se define como el cociente entre el caudal de reciclo Q_r y el caudal de ingreso al reactor Q_o . Según bibliografía, un reactor de mezcla completa convencional posee una tasa de reciclo de entre 0,2 y 1; para aireación extendida, este rango se acota de 0.15 a 0.5. No posee unidades.
- Tiempo de retención celular (θ_c): Definido anteriormente, es el tiempo medio de residencia de los microorganismos en el sistema (Ec. 6.26)
- Tiempo de retención hidráulico (θ) (Ec. 6.38): Es el tiempo de residencia del efluente a tratar en el reactor biológico (no considera sedimentación). Según la cátedra de ingeniería sanitaria de FIUBA, debe encontrarse entre las 4 y 8 horas para tratamiento de aguas domésticas. No considera el caudal de reciclo.

$$\theta = \frac{V}{Q_o} \quad (\text{Ec. 6.38})$$

En la siguiente tabla 6.18 se resumen las principales variables a controlar y considerar para el diseño y la operación del reactor biológico. Las mismas se encuentran dentro de valores bibliográficos. Se observa una cercanía con el límite superior del F/M , así como también una tasa de reciclo cercana al límite inferior. Esto se debe principalmente a las adopciones consideradas dentro de la cinética microbiana.

Tabla 6.18: verificación de las variables de diseño y operativas del sistema.

Parámetro	Unidad	Rango	Diseño
Tiempo de retención hidráulico (θ_c)	hora	4-8	6
Tiempo de retención celular (θ)	día	5-15	5
Relación alimento/biomasa (F/M)	1/día	0,2-0,6	0,52
Concentración de barros (X)	mgSSV/l	1500-4000	2500
Tasa de reciclo (α):	-	0,25-1	0,3

En la sedimentación secundaria ocurre el proceso de separación de la biomasa que proviene del reactor de lodos activos, con el objetivo de obtener un sobrenadante clarificado y los lodos que luego son recirculados o purgados.

Para el diseño de estas unidades hay varias aproximaciones que parten de distintas variables. Para este presente trabajo se utilizará como referencia el manual de sedimentación secundaria ATV a131⁸⁵ y Metcalf & Eddy.

Si bien hay múltiples aproximaciones para el diseño de estas unidades, la mayoría concuerdan que los parámetros más relevantes a la hora de diseñar son la carga superficial (Ec 6.39), la carga de sólidos C_{sol} (Ec 6.x) y la profundidad.

$$C_{sol} (kg/m^2h) = \frac{(Q_o + Q_r) \cdot X}{A} \quad (\text{Ec. 6.39})$$

En donde Q_o y Q_r hacen referencia al caudal de diseño y caudal de reciclo calculados previamente, X la concentración de biomasa adoptada para el reactor biológico, y A el área del sedimentador.

Si al sedimentar la biomasa se comportara como una partícula aislada, la profundidad no tendría mayor importancia (como es el caso del sedimentador primario de este proyecto); sin embargo, los barros biológicos tienen un comportamiento floculento, que hace que la velocidad de sedimentación aumenta a medida que crecen los flocs, es decir, a mayor profundidad. Según Metcalf & Eddy este valor se encuentra entre 3,6 y 6 metros. El manual Clarifier Design⁸⁶ reporta valores de entre 2,4 y 4,3.

El manual de buenas prácticas de la norma alemana ATV 131 provee un método estandarizado, aunque empírico, para determinar la profundidad de un sedimentador secundario; el mismo se basa en el concepto del índice volumétrico de lodos (IVL), el cual refiere a la capacidad de los lodos de decantar en 30 minutos (Ec. 6.40)

$$IVL (mg/g) = \frac{SS_{30r} (ml/l)}{SST (g/l)} \quad (\text{Ec. 6.40})$$

⁸⁵ Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). (2000). *ATV-DVWK-A 131: Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants*. Hennef, Germany: DWA Publishing.

Traducción técnica: Javier Nanning B. (septiembre de 2003)

⁸⁶ Water Pollution Control Federation (WPCF) Design of Municipal Wastewater Treatment Plants – Manual N°FD-8

En donde $SS_{30'}$ es la cantidad de volumen ocupado por los barros decantados a 30 minutos de comenzar el proceso de sedimentación y SST los sólidos suspendidos totales del efluente, que normalmente suele asumirse equivalente a la biomasa X .

Este valor se obtiene tomando una muestra del efluente al ingreso del sedimentador secundario y dejándolo reposar en una probeta. Con este valor y una carga hidráulica determinada la cual se adopta por bibliografía, se calcula la profundidad del sedimentador en un total de 4 secciones (h_1 , h_2 , h_3 y h_4 ; Ec. 6.41, 6.42, 6.43 y 6.44), que consideran la velocidad de floculación y decantación del sistema (figura 6.5). Las secciones h_1 , h_2 y h_3 son estrictamente de sedimentación, mientras que h_4 es parte de la zona de acumulación de barros y purga.

$$h_1 = 0,5 \text{ m} \quad (\text{Ec. 6.41})$$

$$h_2 = \frac{0,5 \cdot C_{sol} \cdot (1+\alpha)}{(1 - (X \cdot IVL / 1000))} \quad (\text{Ec. 6.42})$$

$$h_3 = \frac{(0,3 \cdot X) 1,5 \cdot IVL \cdot C_{sol} \cdot (1+\alpha)}{500} \quad (\text{Ec. 6.43})$$

$$h_4 = \frac{X \cdot IVL \cdot C_{sol} \cdot (1+\alpha) \cdot t_0}{300 \cdot t_0 + 500} \quad (\text{Ec. 6.44})$$

En donde, para estas expresiones, α refiere a tasa de recirculación (tabla 6.18) y t_0 a un parámetro conocido como tiempo de espesamiento, el cual depende del tipo de lodo (0,6 a 2 horas).

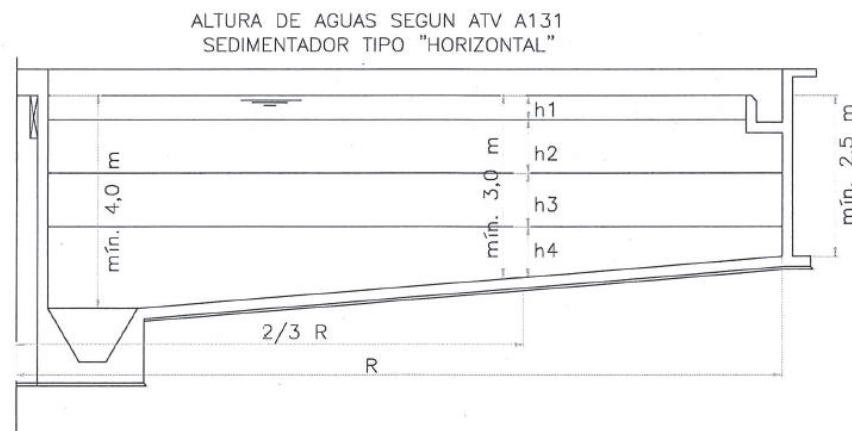


Figura 6.5: determinación de las 4 secciones de decantación consideradas en el diseño de sedimentadores secundarios según norma ATV A131.

Estrictamente, estas ecuaciones no utilizan el índice volumétrico de lodos de la forma que se ha definido anteriormente, si no que toman un parámetro adaptado llamado índice volumétrico de lodos

diluido (IVL_{dil}), el cual sale de la norma ATV A131. El mismo es muy similar al IVL, con la diferencia de que considera diluciones para un rango muy elevado.

Tanto el IVL como el IVL_{dil} son parámetros que normalmente son revisados para diagnosticar el funcionamiento del reactor biológico; al usarlos en el diseño de unidades, ambos son representativos y buenas aproximaciones si se decide calcular la profundidad de un sedimentador secundario⁸⁷.

En la siguiente *tabla 6.19* se muestran los valores adoptados para el diseño de este sedimentador, junto con sus respectivos rangos bibliográficos. Para el mismo, se adoptó una geometría circular.

Tabla 6.19: parámetros adoptados y calculados para el diseño del sedimentador secundario

Parámetro	Condición	Unidad	Rango	Diseño
Carga superficial (C_s)	Adoptado	$m^3/m^2.dia$	8 - 33	26
Tiempo residencia (θ)	Calculado	h	2 - 4	3,3
Concentración del lodo (X)	Adoptado	mg/l	1500 - 4000	2500
Tasa de reciclo (α)	Calculado	m^3/h	0,25-1	0,3
Carga de sólidos (C_s)	Calculado	$kg/(m^2.h)$	1 - 5,9	3,6
Diámetro (D)	Calculado	m	-	1,2
IVL	Adoptado	ml/g	50-200	100
h_1	Adoptado	m	0,5	0,5
h_2	Calculado	m	-	0,95
h_3	Calculado	m	-	1,07
Zona de espesamiento (h_4)	Calculado	m	-	0,64
tiempo de espesamiento (t_o)	Adoptado	h	0,6 - 2	2
Área (A)	Calculado	m^2	-	1,1
Profundidad ($h_1+h_2+h_3$)	Calculado	m	> 2,5	2,5
Profundidad total (H_t)	Calculado	m	-	3,15
Volumen de sedimentación	Calculado	m^3	-	2,9
Volumen total	Calculado	m^3	-	3,2

Tanto la carga superficial adoptada como la carga de sólidos calculadas corresponden a un sedimentador diseñado para un Lodos Activos convencional, de baja tasa. Sin llegar a ser aireación extendida, la cual encarece mucho el costo de implementación, esta aproximación asegura una calidad del efluente lo suficientemente buena para riego aún en malas condiciones climáticas.

⁸⁷ Nanning, J., 2003. Sedimentación secundaria en sistemas de lodos activados. AKROS Ingeniería

Entrada del sedimentador secundario

Para la unidad de entrada se decidió colocar un ingreso por ducto perforado en el centro de la unidad a la altura de h_2 . El mismo contará de un diámetro de 0,2 metros y tendrá un total de 16 orificios perforados de 6 centímetros de diámetro para evitar taponamientos dispuestos equidistantes horizontal y verticalmente. Utilizando la misma metodología que para el [sedimentador primario](#), se calcula el gradiente de paso de dichos orificios (tabla 6.20).

Tabla 6.20: Valores de diseño de entrada al sedimentador secundario

Parámetro	Dato	Unidad
Altura	1,2	m
Diámetro ducto entrada	0,2	m
Gradiente en orificios (G)	0,5	1/seg
N° orificios totales	16	-
Radio de los orificios	4	cm
Espacio entre orificios (Vertical)	0,15	m
Espacio entre orificios (Horizontal)	0,15	m

Salida del sedimentador secundario

Siguiendo los mismos lineamientos que los descritos en el [apartado 5.6.5 - Sedimentación](#), se plantea un vertedero de salida similar al de la figura 5.26. Utilizando las ecuaciones 5.25, 5.26 y 5.27 se obtienen los parámetros de diseño de los vertederos de salida, los cuales se disponen radialmente y equidistantes entre sí (tabla 6.21).

Tabla 6.21: parámetros de diseño de los vertederos de salida

Parámetro	Dato	Unidad
N° Vertederos de salida	8	-
Perímetro de salida	3,8	m
altura mojada (h)	1,5	cm
altura del triángulo (h_t)	5	cm
ángulo del triángulo	90	°
altura por sobre el triángulo (h_r)	5	cm
ancho de los vertederos (W_v)	10	cm
distancia entre vertederos (S)	38	cm

Para el diseño de la tolva, se adopta un ángulo de inclinación de 55° sin barredor de fondo, debido a que se trata de una unidad de poco tamaño. Por este mismo motivo, es necesario realizar un mantenimiento periódico que evite la canalización de los sólidos.

Esta inclinación y considerando un h_4 de 0,64 metros, nos deja con un área inferior de $0,07 \text{ m}^2$, lo cual es equivalente a un diámetro inferior de 0,3 metros. Utilizando la fórmula de volumen de un cono truncado, se obtiene el volumen de fangos. Luego, la poceta de salida será de 20 centímetros de diámetro. Todos estos parámetros se resumen en la siguiente tabla 6.22.

Tabla 6.22: parámetros de diseño de los vertederos de salida

Parámetro	Dato	Unidad
Área superior	1,1	m^2
Diámetro superior	1,2	m
Ángulo	60	$^\circ$
H tolva	0,65	m
Área inferior	0,07	m^2
Diámetro inferior	0,3	m
Volumen de zona de lodos	0,32	m^3

6.5.4. Tratamiento Terciario

El tratamiento terciario se asegura mediante una cámara de cloración, en la cual se dosifica el agente desinfectante con el objetivo de reducir la carga de patógenos en el efluente. Para este diseño, se optó por una cámara laberíntica de flujo pistón que tiene como objetivo lograr una dispersión uniforme del desinfectante. Este último será hipoclorito de sodio (NaClO) en estado líquido. Se optó por esta disposición y no otros mecanismos como el ozono, o la radiación UV, o mismo el cloro gaseoso, por los bajos caudales de la planta y su simplicidad de uso.

Cuando se utiliza Cloro como agente oxidante, una de las cosas a considerar para una correcta dosificación es la curva de generación de especies cloradas. Según la evidencia recabada, la cantidad de especies cloradas que se generan por la adición del agente oxidante depende de la dosis de cloro de una forma no lineal, si no que tiene 3 puntos de interés (figura 6.6).

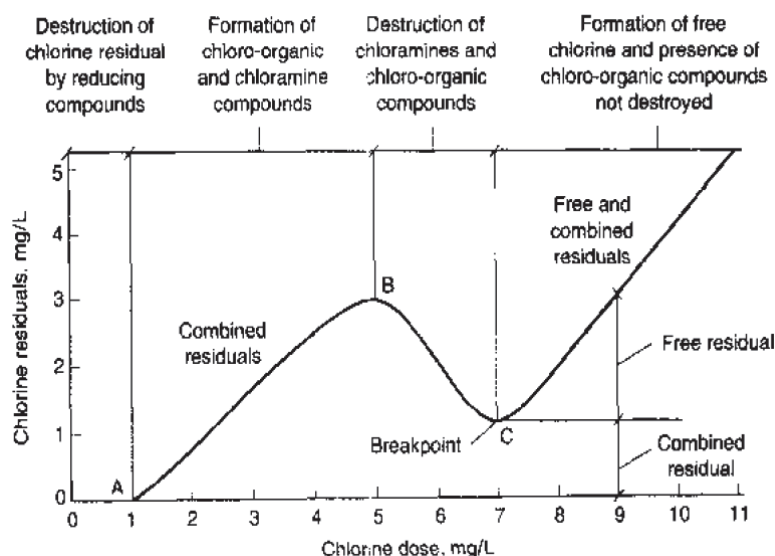


Figura 6.6: Curva de cloración típica de un agua residual doméstica (Fuente: Metcalf & Eddy)

Cuando la dosis es muy baja (A), el cloro es consumido en su totalidad por compuestos reductores presentes en el efluente (como, por ejemplo, bacterias). A medida que aumenta la dosis, comienzan a formarse compuestos organoclorados y cloraminas, que son tóxicas para la vida acuática (B). Aumentando la dosis, ocurre un proceso de nitrificación y formación de N_2O y N_2 gaseoso, lo cual baja la concentración de organoclorados y llegando a un punto de quiebre (C). Finalmente, si se continúa aumentando la dosis se formarán más especies residuales y la desinfección es, aunque eficaz para matar patógenos, ineficiente para obtener un efluente apto para vuelco como riego. En general, es este punto de quiebre la dosificación ideal para desinfectar el efluente.

Si bien la figura 6.6 muestra una generalidad para todos los efluentes domésticos, este punto debe obtenerse mediante ensayos de laboratorio.

6.5.4.1. Cloración

El diseño del sistema de cloración consiste en un arreglo de tres elementos; la cámara de contacto laberíntica, el sector de almacenamiento del cloro y la dosificación.

Cámara de contacto

Para el diseño de la cámara de desinfección, se adopta un diseño de cámara que recrea las condiciones de un flujo pistón; es decir, tiene estructura laberíntica. Esto permite un proceso de desinfección mucho más eficaz que el que se puede obtener en un tanque o reactor de mezcla

completa, debido a que de esta forma se asegura un tiempo mínimo de contacto de cada fracción del efluente. Para ello, se busca que la relación “ancho - recorrido hidráulico” sea mayor a 40:1, dado que este parámetro asegura que no se generen estancamientos (figura 6.7)

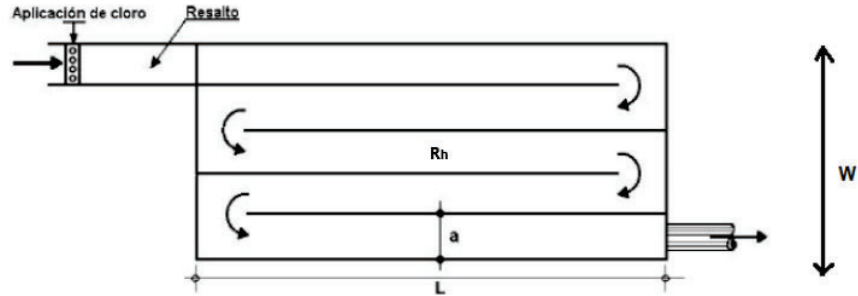


Figura 6.7: configuración laberíntica de una cámara de contacto mediante cloración.

Considerando un tiempo de residencia de 20 minutos, y considerando el caudal medio a desinfectar ($Q = 29,5 \text{ m}^3/\text{d}$), se obtiene el volumen (V) de la cámara (Ec. 6.45)

$$V = Q \cdot t_{rh} = 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot 20 \text{ min} = 0,4 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 6.45})$$

En base a este, se adoptan los siguientes parámetros para el diseño de la cámara de contacto (tabla 6.23)

Tabla 6.23: Valores geométricos adoptados para el diseño de la cámara de contacto.

Parámetro	Dato	Unidad
Cantidad de canales (n)	10	°
Ancho de canales (a)	0,1	m
Profundidad (h)	0,1	m

En base a la cantidad de canales y el ancho predeterminado de cada uno de ellos (el cual considera las paredes de los canales, que serán de aluminio de 2 mm de espesor), puede obtenerse el ancho de la cámara (W). Por otro lado, asumiendo la profundidad y conociendo el volumen, se obtiene el área, lo cual permite calcular el largo máximo (L) conociendo (W) (Ec. 6.46 y 6.47)

$$W = n \cdot a = 10 \cdot 0,1 \text{ m} = 1 \text{ m} \quad (\text{Ec. 6.46})$$

$$L = \frac{V}{h \cdot W} = \frac{0,4 \text{ m}^3}{0,1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = 4 \text{ m} \quad (\text{Ec. 6.47})$$

Finalmente, se calcula el recorrido hidráulico (R_h) del efluente considerando la cantidad de canales y el largo del sistema (Ec. 6.48)

$$R_h = L \cdot n = 4m \cdot 10 = 40 m \quad (\text{Ec. 6.48})$$

En la siguiente tabla 6.24 se observan todos los parámetros relevantes del diseño de la cámara, así como también la verificación de la relación “ancho - recorrido hidráulico”.

Tabla 6.24: Valores geométricos adoptados para el diseño de la cámara de contacto

Parámetro	Dato	Unidad
Volumen (V)	0,4	m ³
Ancho neto de la cámara (W)	1	m
Largo de la cámara (L)	4	m
Recorrido hidráulico (R_h)	40	m
Largo de los tabiques (L_t)	3,9	m
Velocidad de paso (v_p)	3,33	cm/s
Relación $R_h - W$	40	-

Dosificación

Para dimensionar la cantidad de hipoclorito de sodio a utilizar, Metcalf & Eddy⁸⁸ provee una ecuación empírica que se basa en la cantidad de microorganismos presentes en el efluente y la cantidad requerida por el límite legal admisible (Ec. 6.49).

$$\frac{N}{N_0} = (1 + 0,23 \cdot C_t \cdot t)^{-3} \quad (\text{Ec. 6.49})$$

En donde:

- **N** refiere a la población de coliformes fecales remanentes, medido en unidades formadoras de colonias (UFC/100 ml).
- **N₀** refiere a la población de coliformes fecales iniciales, medido en unidades formadoras de colonias (UFC/100 ml).

⁸⁸ Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse - Secondary and Filtered Effluent - Disinfection with Chlorine* 12-3 - Page 1249

- C_{Cl} refiere a la concentración de cloro requerida (mg/l).
- t refiere al tiempo de retención o contacto del cloro con el efluente hasta el punto de salida o vuelco.

En base a la concentración de cloro residual obtenida para un tiempo de residencia y eficiencia de desinfección determinada, se puede obtener la dosis de cloro a aplicar por día.

Para la población de coliformes fecales, al tratarse de un diseño por bibliografía, se asumen parámetros guía de Metcalf & Eddy para aguas residuales ($10^5 - 10^6$ UFC/ml)⁸⁹. En general, esta fuente considera que la dosis de cloro promedio para una gran cantidad de aguas residuales es de 5 a 15 mg/L de ión clorito. Sin embargo, esto sólo sirve para estimar, siendo en realidad un valor a determinar en la propia instalación mediante ensayos de laboratorio una vez la planta comienza a funcionar.

Para este ejercicio, se decide utilizar la Ec. 6.49 asumiendo un N final de 100 UFC/100ml y un N_0 de 10^6 UFC/100ml, considerando un tiempo de contacto de 20 minutos; de esta forma, se obtiene la concentración de cloro.

$$C_{Cl} = \frac{\left(\frac{N}{N_0}\right)^{-1/3} - 1}{0,23 \cdot t} = 4,5 \text{ mg/l}$$

Considerando entonces una solución de hipoclorito de sodio (NaOCl) de 12,5% y el caudal del efluente, se obtiene el caudal de dosificación (Ec. 6.50):

$$Q_{Cl} = \frac{C_{Cl} Q_s 100ml}{12,5 g} = \frac{4,5 (g/m^3) \cdot 1,2 (m^3/h) 100ml}{12,5 g} = 0,0432 \text{ L/h} = 1,1 \text{ L/d} \quad (\text{Ec. 6.50})$$

Debido a que el caudal requerido es bajo, se decide adquirir un dosificador de cloro integrado a un tanque de almacenamiento de 20 Litros, por lo que deberá controlarse el nivel del líquido cada 10 a 15 días.

6.5.5. Sistemas de conducción e impulsión.

El tipo de conducción predominante es por gravedad. Una vez el efluente ingresa por la cañería de desagüe, el mismo cae por diferencia de altura hasta un ecualizador construido de cemento y enterrado. El mismo cuenta el primer aparato de bombeo, una bomba sumergible preparada para triturar los sólidos de mayor tamaño de la marca MotorARG, modelo DRT 1100 (**ver anexo [11.5](#)**

⁸⁹ Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* - Table 12-13 - Chapter 12.3 - Disinfection with Chlorine 12-3 - Page 1253

Misceláneos). La misma entrega un caudal constante para las siguientes unidades, las cuales son construidas sobre el nivel del suelo; a partir de la primera recepción con un baffle para amortiguar la velocidad, el resto de la conducción se da por gravedad hasta el tanque de despacho. Para ver el perfil hidráulico, ver el [apartado planos](#).

Tabla 6.25: Descripción de los conductos de la planta de aguas residuales

Nº Tramo	Descripción	Impulsión	Vel (m/s)	D (mm)
A-1	Del ecualizador al sedimentador	Impulsada	1,1	20
A-2	Del sedimentador al reactor biológico	Gravedad	0,3	40
A-3	Del reactor biológico al Sed. Sec.	Gravedad	0,3	40
A-4	Del Sed. Sec. a cloración	Gravedad	0,3	40
A-5	De cloración a tanque de despacho	Gravedad	0,3	40

Por otro lado, la alimentación del sistema de aireación de la planta se da mediante dos sopladores de aire que trabajan de manera intermitente, capaces de transportar un caudal de aire tanto para el sistema de aireación del ecualizador como para el reactor de lodos activos, el cual es de aproximadamente 116 Nm³/h. Teniendo en cuenta este requisito, el modelo elegido es el R200 de la marca Repicky. (ver anexo [11.5 Misceláneos](#))

7. Cómputo y presupuesto

En este apartado se detalla el cómputo y presupuesto para ambas plantas presentadas en el presente informe. Ambos subproyectos contarán con el análisis de inversión inicial y el análisis de operación y mantenimiento. La inversión inicial de bienes de capital, o *Capital Expenditures (CAPEX)* hace referencia al costo inicial económico que se debe realizar para construir la planta. En general, cada costo se divide en dos apartados; por un lado, el costo directo que hace referencia a la compra y puesta en marcha de las unidades, y por otro lado el costo indirecto, que hace referencia a todos los trabajos preliminares, la confección de documentos, la obtención de permisos, etc. Por otra parte, el análisis de costos derivados de la operación y mantenimiento de la planta u *Operational Expenditures (OPEX)*, considera los costos recurrentes de la planta; se incluye en este presupuesto el costo asociado a los operarios, los químicos, el costo energético y la disposición de barros.

Estos análisis de costos contienen un ítemizado por rubro, el cual llega a valores unitarios para equipos y materiales esenciales. Dichos valores se obtuvieron de diferentes fuentes, como catálogos de compras online en internet, referencias de otros proyectos de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de San Martín, referencias de proyectos similares ejecutados por FracEnergy previamente, y consultas directas a proveedores de dichos insumos.

Cabe aclarar que es un estudio económico preliminar, lo que permitirá evaluar la factibilidad con un margen relativamente grande. Es por ello que, al momento de realizar la ejecución del proyecto, es posible que los valores cambien.

Ambos análisis se han realizado utilizando como moneda el dólar estadounidense (USD), debido a que las rentabilidades de proyectos de exploración y producción de hidrocarburos suelen atar sus rendimientos a la venta de petróleo, el cual se rige por el precio internacional. Todo valor cotizado en pesos como dato primario se convierte a dólares estadounidenses tomando como valor de referencia la cotización del dólar contado con liquidación (CCL) en torno a \$1.200 pesos argentinos.

7.1. Planta de tratamiento de agua de producción

Debido a que no es posible ejecutar un proyecto de explotación de hidrocarburos sin una gestión adecuada del agua de producción, tanto por problemas técnicos como legales, para evaluar la viabilidad económica de la instalación de la planta de tratamiento de agua de producción se realizará una comparativa asumiendo que, de no realizarse esta planta, toda el agua de producción debería ser evacuada a tratamiento por empresas de terceros. Según estimaciones provistas por FracEnergy, el retiro de agua producida en un yacimiento similar rondaba los 270 USD/m³⁹⁰ en junio de 2019. Actualizando este valor por la inflación en dólares (de 24,38%⁹¹ de acumulada hasta marzo 2025), se obtendría un valor actual de **336 USD/m³**. Considerando una producción 920 m³ por día, se traduciría en un costo operativo de 300.000 dólares por día, o lo que es equivalente a USD **\$108.000.000** por año, **haciendo inviable la rentabilidad del proyecto de construcción de la planta central sin una planta de agua de producción.**

Por otra parte, considerando que cada camión cisterna puede transportar un máximo de 30 m³, se requerirían un total de 30 camiones que cada día deberían retirar dicha producción. Esto implicaría un

⁹⁰ Camps, Y. (2019). *Adecuación de la Planta de Tratamiento de Agua – Yacimiento Piedra Atravesada de la Empresa Petrolia*. Proyecto Integrador Profesional. Universidad del Comahue.

⁹¹ <https://www.dineroeneltiempo.com/inflacion/dolar/de-2019-a-valor-presente?valor=100&ano2=2025>

movimiento muy elevado en la planta, lo cual hace aún menos atractiva la alternativa de tratamiento por terceros.

Para el siguiente proyecto, principalmente debido a su alto costo de inversión, se decide utilizar como guía metodología la práctica recomendada (PR) N°18 R-97 de la [Asociación para el Avance de la Ingeniería de Costes](#) (ACEE), denominada **“sistema de clasificación para costos estimados - cómo aplicarlo en ingeniería, contratación y construcción para procesos industriales”**.

Debido a que los costos de un proyecto deben realizarse durante toda la vida del mismo, y los proyectos pasan por diferentes grados de maduración en la medida que se toman decisiones, el análisis de costos debe ser realizado a un nivel de detalle acorde al grado de madurez alcanzado en el respectivo estadio. En el caso de la PR N°18 R-97, se diferencian 5 clases (figura 7.1).

CLASE ESTIMADA	Características primarias	Características secundarias			
	NIVEL DE DEFINICIÓN DEL PROYECTO Expresado como % de la definición completa	FIN DE USO Propósito típico de estimación	METODOLOGÍA Método típico de estimación	PRECISION ESPERADA, RANGO Variaciones típicas en <u>bajos</u> y <u>altos</u> rangos (a)	PREPARACIÓN DE ESFUERZO Grado normal de esfuerzo relativo al índice de costo mínimo de 1 [b]
Clase 5	0% a 2%	Concepto de detección	capacidad de factoring, modelos paramétricos, juicio o analogía	B: -20% a -50% A: +30% a +100%	1
Clase 4	1% a 15%	Estudio de viabilidad	Equipo de factoring o modelos paramétricos	B: -15% a -30% A: +20% a +50%	2 a 4
Clase 3	10% a 40%	Presupuesto, autorización o control	Costos unitarios semi-detallados con línea de ensamble. Ítems en línea	B: -10% a -20% A: +10% a +30%	3 a 10
Clase 2	30% a 70%	Control u oferta/demanda	Costo unitario detallado con detalles de proyección	B: -5% a -15% A: +5% a +20%	4 a 20
Clase 1	50% a 100%	Lista estimada u oferta/demanda	Costo unitario detallado con detalles de proyección	B: -3% a -10% A: +3% a +15%	5 a 100

Figura 7.1: Diferentes clases de estimación de costos en función del nivel de definición de un proyecto.

Fuente: AACE

En este documento se ha desarrollado un proyecto que se encuentra en un estadio asimilable a un proyecto de clase 3, motivo por el cual el margen de precisión esperado podría ser de -20% a +30%. Si bien el ítemizado realizado es bastante preciso, la obtención de presupuestos para la construcción de la planta se centró únicamente en aquellos elementos que se llevan el mayor porcentaje del costo total.

Según un análisis preliminar, el costo directo, enfocado a los equipos, la preparación del terreno y otros materiales necesarios es de **USD \$3,345,962**. El presupuesto se ha realizado con diferentes niveles

de detalle en función de la participación total esperada de cada ítem; de todos ellos, el mayor es el rubro N°4 del Excel adjunto, vinculado directamente a los Tanques API 650, y su sistema de Skimmer y gas de blanketing, con un 68% de participación sobre el total, motivo por el cual ha sido presupuestado directamente con un proveedor en cada ítem

Por otra parte, debido a que los costos indirectos requieren un esfuerzo mucho mayor, no son itemizados para este estadio del proyecto. Sin embargo, para continuar contemplándose, se decide estimarlos mediante un factor de escalabilidad vinculado al costo directo, asumido en **2.5** por recomendación de expertos de FracEnergy. Esto nos dejaría con un Costo Total de inversión estimado en **USD \$8,364,906** y con un tope máximo de **USD \$10,874,378** y un mínimo de **USD \$6,691,925** (tabla 7.1)

El costo operativo se divide en costos directos, los cuales se asocian al personal que trabaja en la planta, los insumos químicos necesarios, el consumo energético de los equipos, y otros costos indirectos, relacionados con el mantenimiento periódico, como la limpieza de tanques o la intervención en equipos de bombeo, y la logística requerida para dichos productos. (tabla 7.2)

Tabla 7.2: Costo de operación y mantenimiento de la planta de agua de producción.

RUBRO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO U. (USD)	COSTO ÍTEM (USD)
1	PERSONAL OPERATIVO				
	Operarios planta (6)	horas/año	12096	\$15	\$181.440
2	INSUMOS QUÍMICOS				
	Hipoclorito de sodio	tn/año	27,0	\$217	\$5.852
	Cloruro Férrico (coagulante)	tn/año	26,5	\$400	\$10.600
	poliacrilamida (floculante)	bolsas/año	10	\$1.400	\$14.000
	Hidróxido de Sodio / Cal	bolsas/año	3650	\$11	\$38.477
3	CONSUMO ENERGÉTICO				
	Consumo bombas centrífugas (4HP)	MWh/año	26	\$40	\$1.046
	Consumo bombas desplazamiento positivo (30HP)	MWh/año	197	\$40	\$7.880
	Consumo agitadores	MWh/año	5,16	\$40	\$206
4	Costos indirectos				
	Logística y mantenimiento	% CAPEX	2%	-	\$176.970
TOTAL					\$436.472

La inversión se estima en **USD \$436,472** por año. Si bien es una cifra considerable, demuestra una gran reducción frente al costo operativo de ser retirado por camiones atmosféricos.

Tabla 7.1: Itemizado del tratamiento de agua de producción

Rubro	Estado	Origen	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (USD)	Total Rubro	% Participación
1	Externo	Nacional	REPARACIÓN DEL BARRIDO	m2	1290	\$4.11	\$5,314	2.88%
	Externo	Nacional	Ex. needed for conduits, fasteners & anchors		216.5	\$25.8	\$5,524	
	Externo	Nacional	Elaboración de borrador de contrato de servicios	m3	469	\$15.0	\$6,980	
	Externo	Nacional	Trabajo de la mano para el corte de las conexiones de los cables	m3	27	\$17.9	\$7,794	
	Nacional	Nacional	Trabajo de la mano para el corte de las conexiones de los cables	m2	10.0	\$11.2	\$112.0	
2	Contributivo	Internacional	INFRAESTRUCTURA DE CABLES	unidad	1	\$21,000	\$21,000	6.04%
	Contributivo	Internacional	Medio de sistema instrumentado de control	unidad	1	\$21,000	\$21,000	
	Contributivo	Nacional	Medio de sistema instrumentado de seguridad	unidad	1	\$21,000	\$21,000	
	Contributivo	Nacional	Trabajo del electrico y cable	%	50%	\$29	\$9,824	
	Externo	Nacional	Otro componente a electricos (Empresas, fletes y otros, etc.)	%	50%	-	\$9,730	
3	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	m	126	\$32	\$5,674	3.42%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 40x31.75 PVC/PREF	unidad	20	\$64	\$1,280	
	Externo	Nacional	Cable 309" - Size 40x31.75 Aseno inoxidable recubrido	unidad	5	\$97	\$484	
	Contributivo	Internacional	Interrupcion (Válvula Globo (GV) 31.75"	unidad	2	\$61.15	\$122.30	
	Contributivo	Nacional	Interrupcion (Válvula Globo (GV) 31.75"	m	18	\$32	\$576	
4	Contributivo	Nacional	UNEP/PA-MI/CP/PA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN	unidad	1	\$14,449	\$14,449	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$64	\$64	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	8	\$204	\$1,632	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Válvula Globo (GV) 11"	unidad	1	\$5,268	\$5,268	
5	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	12	\$7	\$84	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
6	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
7	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
8	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
9	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
10	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
11	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
12	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
13	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
14	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
15	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
16	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
17	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
18	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
19	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
20	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
21	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
22	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
23	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
24	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
25	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
26	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
27	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
28	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
29	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
30	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
31	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
32	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
33	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
34	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
35	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
36	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1	\$28	\$28	0.46%
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Válvula Esfera (SV) 31.75 PVC/PREF	unidad	1	\$28	\$28	
	Contributivo	Nacional	Ducts, Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	2	\$28	\$56	
	Contributivo	Nacional	Cable 309" - Size 10x11.75 PVC/PREF	unidad	4	\$28	\$112	
37	Contributivo	Nacional	SERVIDER Y CONEXION	unidad	1			

7.2. Planta de tratamiento de aguas residuales

El proyecto de diseño de la planta de tratamientos de aguas residuales es de mucha menor magnitud; por ese motivo el costo de inversión inicial y el costo operativo es mucho menor.

El costo directo de toda la instalación, la cual considera materiales y equipos, asciende a USD \$80,283. En este caso, dado que se decide construir una nave industrial que contenga ciertos elementos, el 58% del costo se explica por esta edificación.

El factor de escalabilidad producto de los costos indirectos para este proyecto también se estima en **2.5** por pertenecer a un rubro similar, motivo por el cual el costo total, considerando directos e indirectos. En base a esta aproximación, el costo final del proyecto sería de **USD \$200,706**, con un mínimo de **USD \$140,494** y un máximo de **USD \$301,060** (tabla 7.3).

Por otra parte, los costos operativos **mensuales** son explicados mayoritariamente por el requerimiento del personal operativo requerido (tabla 7.4).

Tabla 7.4: Costo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales

RUBRO	ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (USD)	COSTO ÍTEM (USD)
1		PERSONAL OPERATIVO				
	1,1	Operarios planta	horas/mes	504	\$ 12	\$ 6.048
2		INSUMOS QUÍMICOS				
	2,1	Cloro	20L/mes	1,65	\$ 18	\$ 30
3		CONSUMO ELÉCTRICO				
	3,1	Bomba sumergible (1,5 HP)	MWh/mes	0,8055	\$ 40	\$ 32
	3,2	Soplador repicky (3 HP)	MWh/mes	1,611	\$ 40	\$ 64
4		MANTENIMIENTO				
	4,1	Mantenimiento	% CAPEX	0,2%	-	\$ 335
TOTAL						\$6.509

Tabla 7.3: CAPEX DEL PROYECTO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES DEL CAMPAMENTO

RUBRO	ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (USD)	COSTO ÍTEM (USD)
1		PREPARACIÓN DEL TERRENO				
		Limpieza y nivelación del terreno	m2	100	\$ 4	\$ 409
		Excavación para conductos y unidades	m3	56	\$ 26	\$ 1.439
		Estructura de hormigón de contención secundaria	m3	22,5	\$ 178	\$ 3.999
2		INSTALACIONES ELÉCTRICAS				
		Tablero de Distribución	unidad	2	\$ 248	\$ 497
		Disyuntores diferenciales	unidad	8	\$127	\$ 1.016
		Cableado	metros	50	\$10	\$ 511
		Conexión y puesta a tierra	%	50%	-	\$ 1.012
3		SISTEMA DE CONDUCCIÓN				
		Válvula Globo 1 1/4" PVC	unidad	2	\$ 272	\$ 543
		Válvula Globo 1 1/4" PVC	unidad	7	\$ 28	\$ 199
		Válvula Globo Ac. Inoxidable 3/4 2230 05 Genebre	unidad	1	\$ 138	\$ 138
		Válvula Exclusa Valflore 3/4"	unidad	2	\$ 16	\$ 32
		Ducto - Sch 10 3/4" PVC	metros	10	\$41,7	\$ 417
		Codo 90° - Sch 10 3/4" PVC	unidad	2	\$ 62	\$ 125
		Ducto - Sch 10 1 1/4" PVC	metros	30	\$ 59,5	\$ 1.785
		Codo 90° - Sch 10 1 1/4" PVC	unidad	2	\$ 89	\$ 179
4		SISTEMA DE BOMBEO				
		Soplador Repicky R200	unidad	2	\$ 1.238	\$ 2.476
		Bomba Desagote Cloacal Trituradora Motorarg Drt 1100 1 Hp	unidad	2	\$ 567	\$ 1.135
5		REJAS Y VERTEDERO				
		Canasto de rejas	unidad	1	\$ 900	\$ 900
		Vertedero de acero inoxidable	m2	2	\$ 93	\$ 187
		Estructura Canalizada (hormigón)	m3	2	\$ 178	\$ 355
6		ECUALIZADOR				
		Estructura de hormigón	m3	7	\$ 178	\$ 1.246
		Difusor de burbuja gruesa Repicky CB-300	unidad	9	\$ 30	\$ 270
7		SEDIMENTACIÓN				
		Vertederos de acero inoxidable	m2	2,5	\$ 93	\$ 233
		Baffles de acero inoxidable	m2	2,5	\$ 93	\$ 233
		Estructura de hormigón	m3	7,2	\$ 178	\$ 1.270
8		REACTOR DE LODOS ACTIVOS				
		Estructura de hormigón	m3	8,4	\$ 178	\$ 1.491
		Difusores de burbuja fina Repicky RG-300	unidad	8	\$ 30	\$ 240
9		SEDIMENTADOR SECUNDARIO				
		Estructura de hormigón	m3	5,0	\$ 178	\$ 884
10		DESINFECCIÓN				
		Dosificador de desinfectante	Unidad	2	\$ 188	\$ 375
		Estructura de hormigón	m3	1,6	\$ 178	\$ 282
11		RECINTO				
		Nave industrial	m2	104	\$ 450	\$ 46.800
12		DESCARGA				
		Tanque de acumulación para riego	unidad	1	9605,62	9605,6
TOTAL DIRECTO					\$80.283	
COSTOS INDIRECTOS Y NO INDUSTRIALES					Factor de escalabilidad	
Considera: Logística, cuota del personal operativo y supervisor, cuotas de la empresas constructoras, procesos de auditoria, incorporación de insumos para la construcción, gestión de almacenes y otras instalaciones transitorias, los costos de ingeniería de detalle, servicios al personal, impuestos, e imprevistos.					2,5	
TOTAL					\$200.706	
TOTAL (Inferior)					\$140.494	
TOTAL (Superior)					\$301.060	

8. Planos

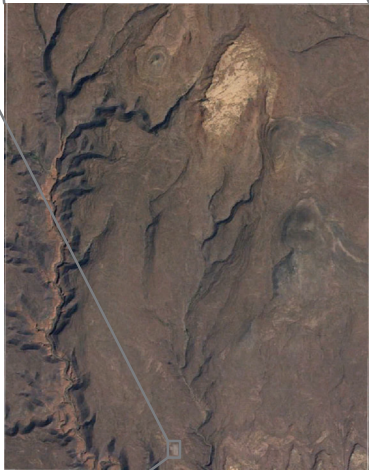
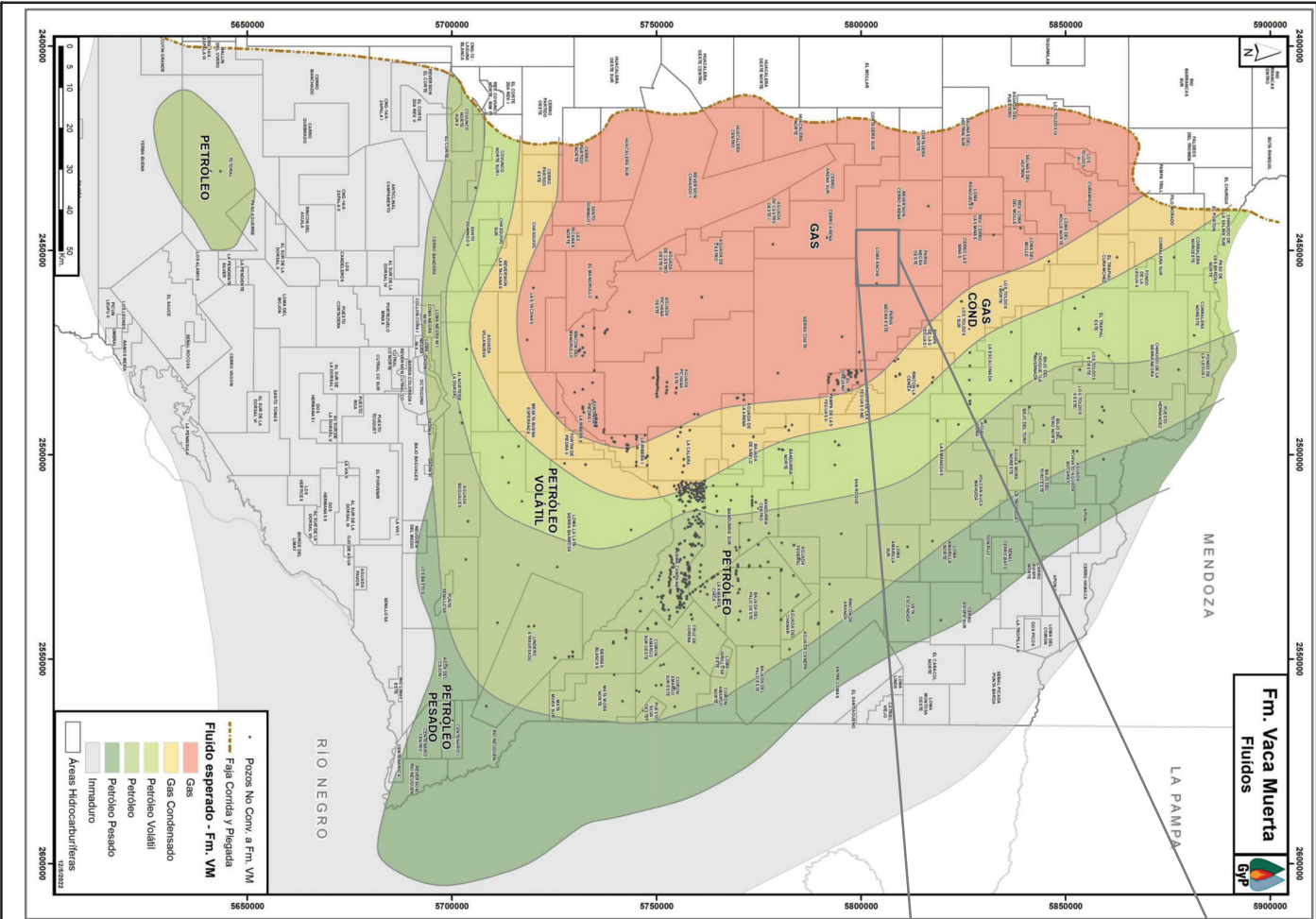
En este capítulo se muestran los planos confeccionados mediante AutoCAD a partir de los cálculos realizados en el capítulo 5 y 6 (Memoria descriptiva y de cálculo del sistema de tratamiento seleccionado).

Los planos desarrollados en este informe plasman la ingeniería básica del proyecto. Los mismos contienen la mínima información requerida para la realización de la ingeniería de detalle y constructiva de la planta, tales como la filosofía de operación e instrumentación básica del flujo más importante de proceso (agua de producción y agua residual del campamento) y el dimensionamiento básico de las unidades.

Las referencias a los sistemas de instrumentación básicos deben utilizarse como guía general para la conformación del diagrama de tuberías e instrumentación completa de la planta (P&ID por sus siglas en inglés) incluyendo así los sistemas secundarios de la misma (tales como, el lavado de los filtros, la dosificación de químicos, y los controles de la línea de desagote de hidrocarburos con destino a la planta de crudo). De esta forma, se conformaría la ingeniería de detalle. Se recomienda la realización de estudios de seguridad de procesos con metodología HAZOP o similares, para evaluar la efectividad de las barreras de seguridad del sistema.

Por otra parte, las dimensiones incorporadas, así como las cotas de nivel (asumiéndose una geometría plana) de todos los equipos representan las condiciones mínimas para el desarrollo de la ingeniería constructiva, los cuales deben incorporar, entre muchas otras cosas, estudios de suelo y cimentación, estudios hidrogeológicos, agrimensura, perfiles topográficos del área. En base a esta información, la disposición física de cada unidad podrá verse afectada.

Producto de las revisiones de ingeniería de detalle y constructiva, podrían existir variaciones en su disposición física, materiales utilizados, e inclusive ampliarse el sistema de conducción de la planta.

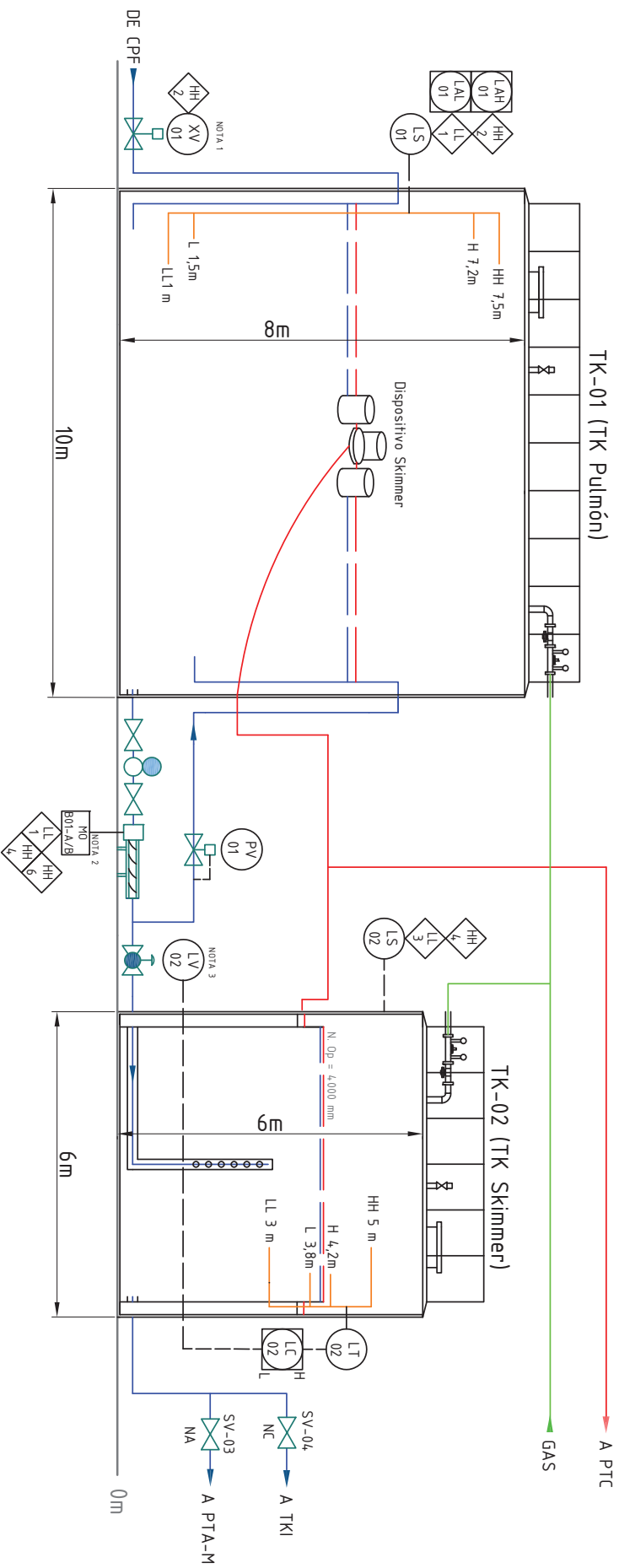


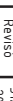
300 metros

Coordenadas:
37° 54' 54" S
69° 28' 38" W

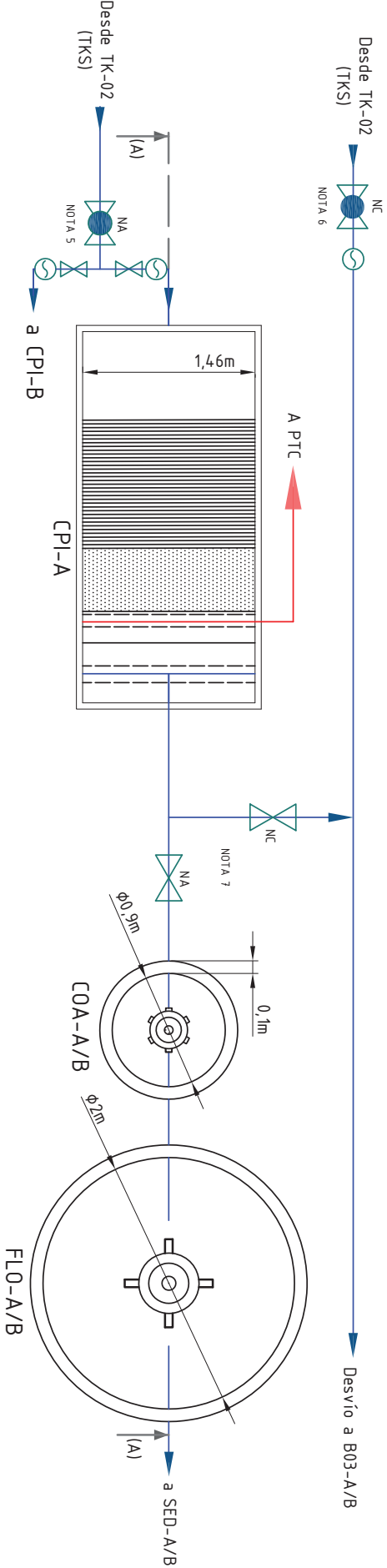
	Fecha	Nombre	Planta de Tratamiento de Agua de Producción Loma Gruesa
Revisó	31/03 2025	NPH	
Aprobó	07/04 2025	AEV WHA	
Escala 1:2500	UBICACIÓN DEL PROYECTO (CPF y PTA)		
Plano N° 1			
			
Alumno Nicolás Holovaski			
Carrera Ingeniería Ambiental			

VISTA EN CORTE - TKP Y TKS

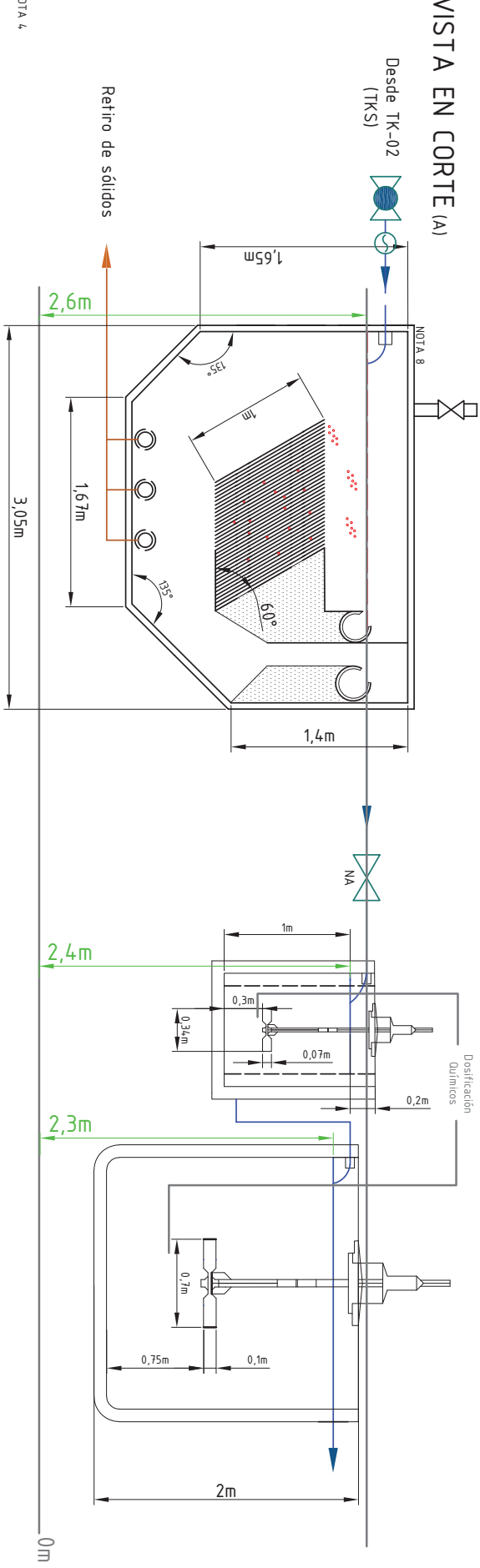


COMENTARIOS		REFERENCIAS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
NOTA 1 - La válvula XV 01 de posición normal, abierta acciona su cierre por señal de alto nivel en TK-01 (Interlock HH 2).	H	Alto Nivel	PV	Válvula autopilotada		ACTUADOR		BOMBA		LÍNEA AGUA	Fecha	Nombre	 Universidad Nacional de San Martín																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	HH	Muy Alto Nivel	LV	Válvula de Nivel		INSTRUMENTO		FIGURA 8		LÍNEA CRUDO	Revisó	31/03 2025		NPB	Planta de Tratamiento de Agua de Producción Loma Gruesa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	NOTA 2 - Los motores de las bombas B01-A/B reciben señal de apagado por bajo nivel en TK-01 (Interlock LL 1) o bien por muy alto nivel aguas abajo (Interlocks HH4, y HH6)	L	Bajo Nivel	LS	Interrupción de nivel		CONEXIÓN A PLC		VÁLVULA GLOBO		GAS (BLANKETING)	Apróbo		07/04 2025		AEV	WHA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		LL	Muy Bajo Nivel	LC	Controlador de nivel		ENCLAVAMIENTO		VÁLVULA EXCLUSIVA		SEÑAL ELÉCTRICA	Escala		1,75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
		NOTA 3 - La válvula LV 02 es una válvula del tipo reguladora de nivel, la cual se encuentra controlada por sistema instrumentado en base a la información de nivel en TK-02	XV	Válvula de cierre	LT	Transmisor de nivel								TANQUES API 650 TK-01 y TK-02		Plano N°	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										</

VISTA EN PLANTA



VISTA EN CORTE (A)



NOTA 4

COMENTARIOS

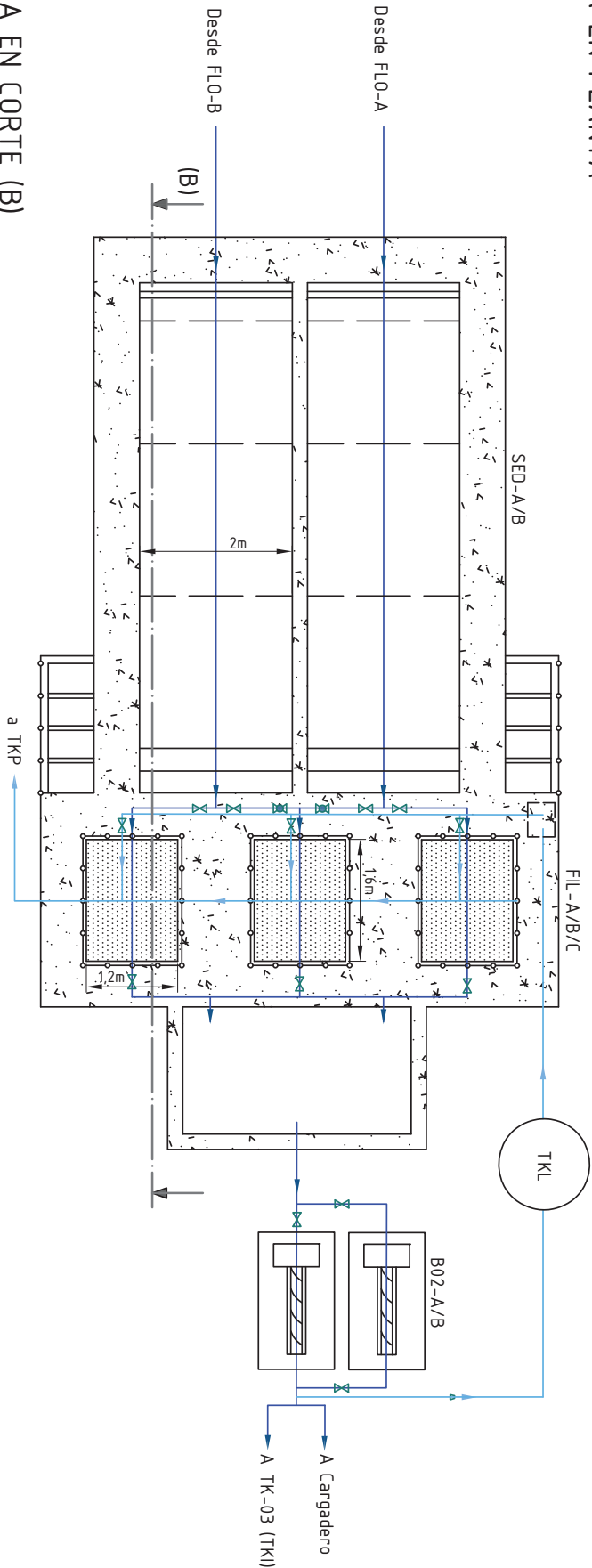
NOTA 4 - Vista en corte y vista en planta de uno de los dos trenes de tratamiento, existiendo dos de ellos iguales.
NOTA 5 - Valvula manual a la entrada, accionada por operador el cual revisa en campo el nivel de agua aguas abajo.
NOTA 6 - Permite realizar un *blending* desde el líquido a la salida del TK-02 y la corriente de la PTA-M en el TK-03 (normal cerrado).
NOTA 7 - By-Pass desde el CPI directo a TK-03.
NOTA 8 - Diseño preliminar, las dimensiones y configuración interna del equipo son propiedad intelectual del fabricante.

REFERENCIAS

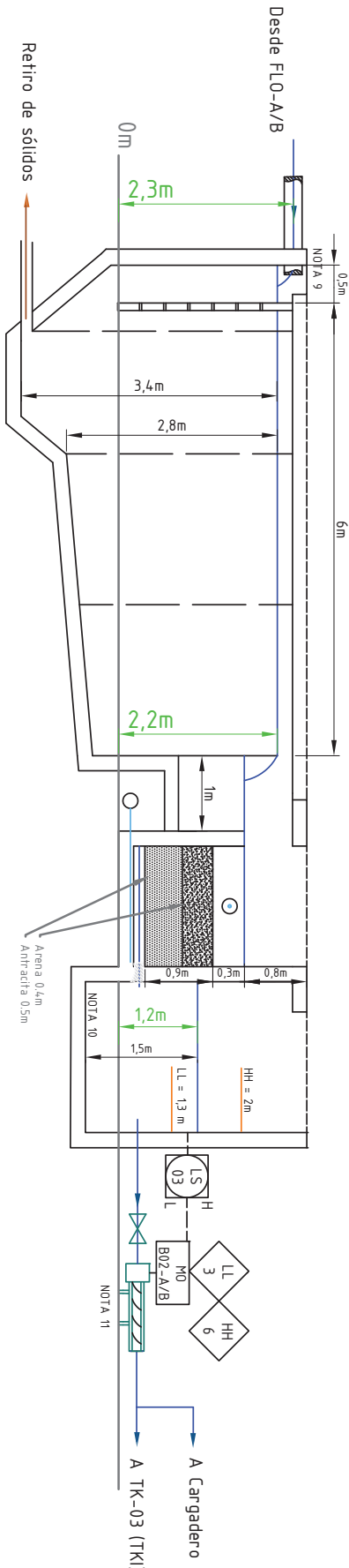
H	Alto Nivel	PV	Valvula autopirotada		BOMBA	
HH	Muy Alto Nivel	LV	Valvula de Nivel		FIGURA 8	
L	Bajo Nivel	LS	Interruptor de nivel		VÁLVULA GLOBO	
LL	Muy Bajo Nivel	LC	Controlador de nivel		VÁLVULA EXCLUSA	
XV	Valvula de tierra	LT	Transmisor de nivel		NC	Normal/cerrada
LA	Alarma de Nivel	MO	Motor de la bomba			

	Fecha	Nombre	Planta de Tratamiento de Agua de Producción Loma Gruesa	 Universidad Nacional de San Martín	
Revisó	31/03 2025	NPH			
Aprobó	07/04 2025	AEV WHA			
Escala	CPI, COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN				Alumno
1:30					Nicolas Holoveski
Plano N° 4				Carreira	
				Ingeniería Ambiental	

VISTA EN PLANTA



VISTA EN CORTE (B)



COMENTARIOS

NOTA 9 - Vista en corte de las unidades de sedimentación y filtración.

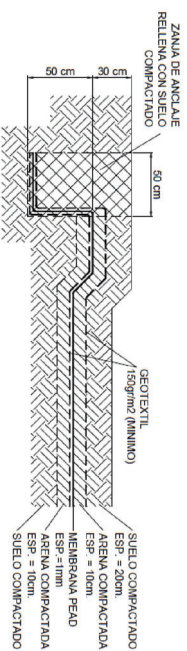
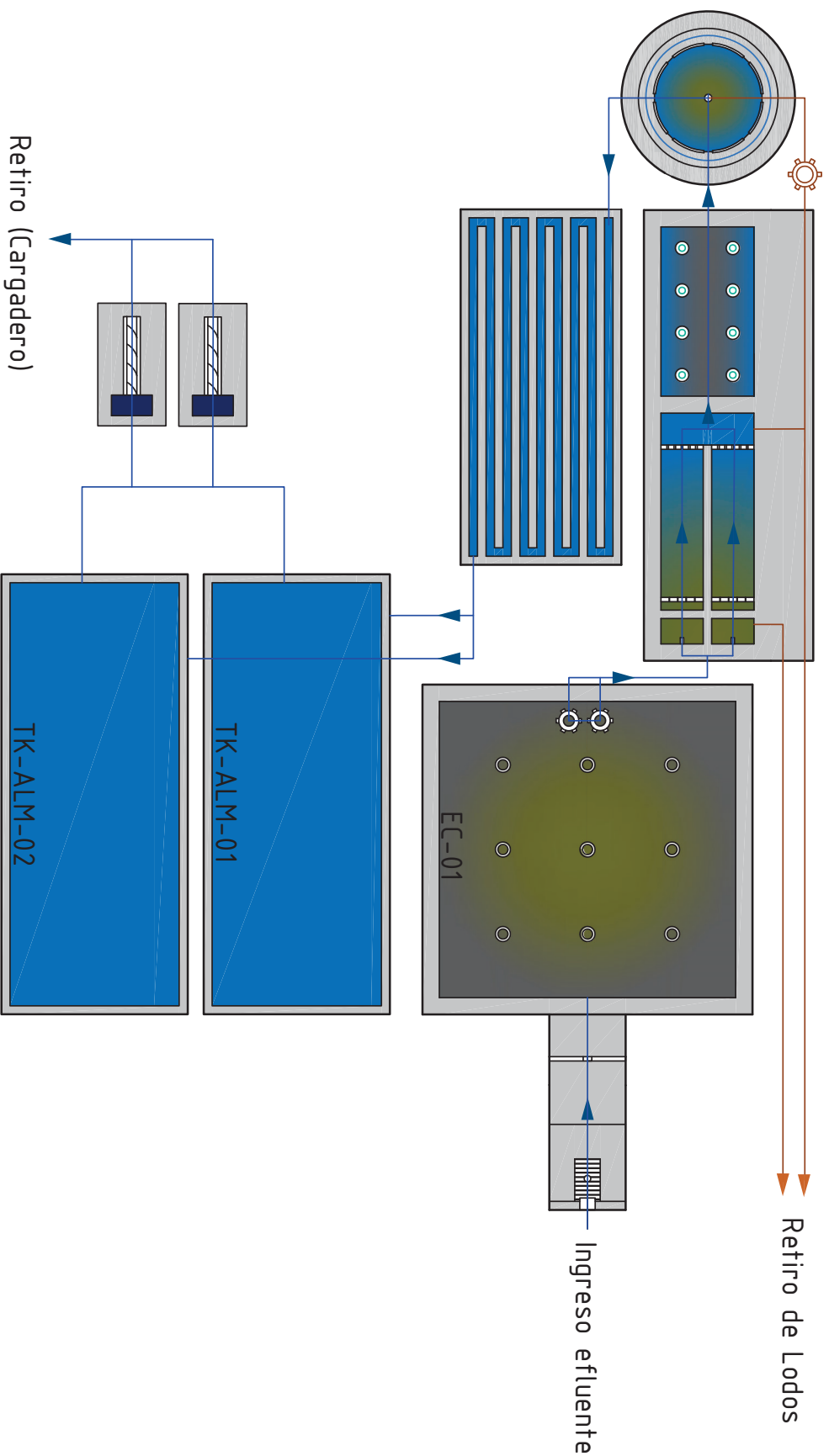
NOTA 10 - Sumidero de bombeo desde los filtros rápidos hacia la bomba que envía a cargadero (Autocargante). Permite mantener un volumen mayor al contenido de todos los filtros para manejo de contingencias.

NOTA 11 - Sistema accionado por alto o bajo nivel del sumidero (activa segunda bomba por alto nivel y apaga por bajo nivel), así como también por los enclavamientos aguas arriba y aguas abajo (Ver PAD 3 y 6).

REFERENCIAS

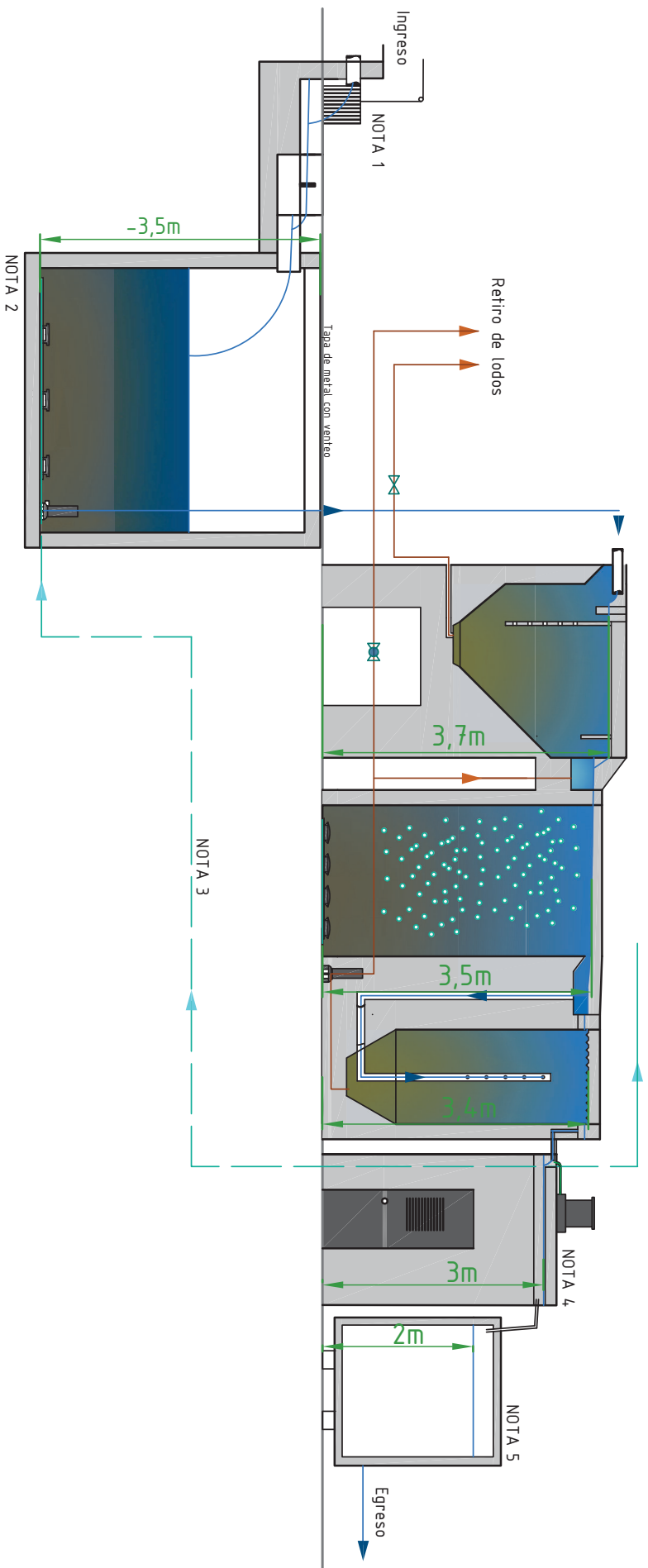
H	Alto Nivel	PV	Valvula autoprogramada	INSTRUMENTO	BOMBA	LÍNEA AGUA
HH	Muy Alto Nivel	LV	Valvula de Nivel	CONEXIÓN A PLC	FIGURA 8	SEÑAL ELÉCTRICA
L	Bajo Nivel	LS	Interruptor de nivel	ENCLAVAMIENTO	VÁLVULA GLOBO	PURGA SÓLIDOS
LL	Muy Bajo Nivel	LC	Controlador de nivel	NA Normal/abierta	VÁLVULA EXCLUSA	AGUA LAVADO
XV	Valvula de cierre	LT	Transmisor de nivel	NC Normal/cerrada	REDUCCIÓN DE SECCIÓN	CORTA DE NIVEL
LA	Alarma de Nivel	MO	Motor de la bomba			

Revisó	31/03 2025	Nombre	NPH	Planta de Tratamiento de Agua de Producción Loma Gruesa	Universidad Nacional de San Martín
Aprobó	07/04 2025	AEV	WHA		
Escala	1:60	SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN			
Plano N°	5	Alumno Nicolás Holovski			
					Carrera Ingeniería Ambiental



DETALLE TÍPICO DE PAQUETE DE IMPERMEABILIZACIÓN Y ANCLAJE

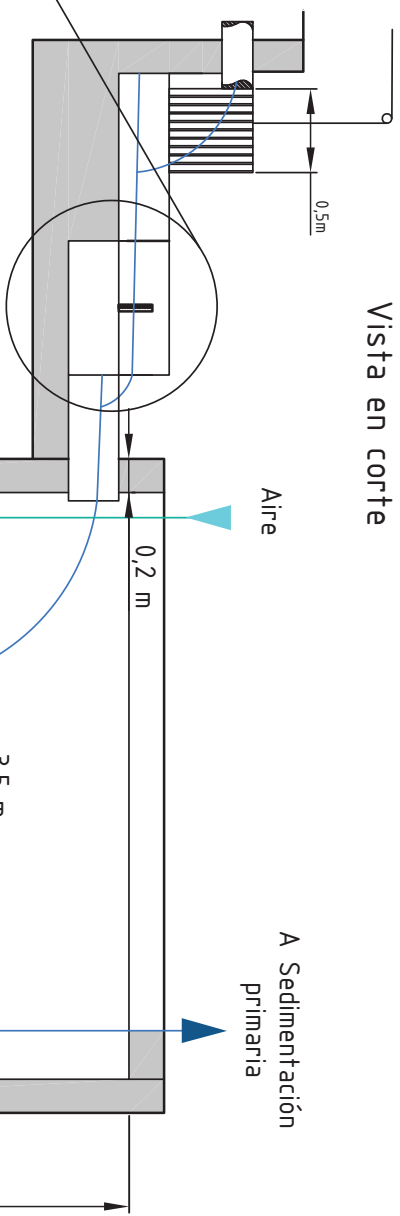
REFERENCIAS						
	LÍNEA AIRE		BOMBA	Revisó	31/03/2025	NPH
	LÍNEA AGUA		VÁLVULA GLOBO	Aprobó	07/06/2025	WHA
	PURGA SÓLIDOS		VÁLVULA EXCLUSIVA	Escala 1:50	LAYOUT DE PLANTA Y DISPOSICIÓN DE LAS UNIDADES	
	BOMBA			Plano N°7		
				Alumno Nicolás Holoveski		 Universidad Nacional de San Martín
				Carrera Ingeniería Ambiental		



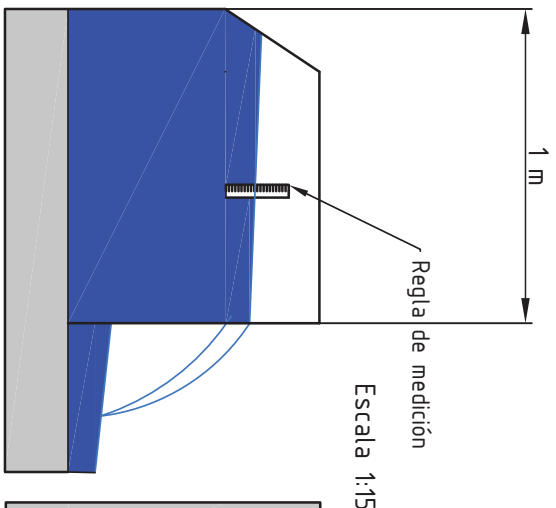
COMENTARIOS		REFERENCIAS						Fecha		Nombre		Tratamiento de aguas residuales provenientes del campamento y base del Proyecto Loma Gruesa		Alumno	
NOTA 1 - El ingreso se da por una canaletta principal de recolección, por gravedad, se rellenan los sólidos en un canasto rebalible.								31/03 2025		NPH				Universidad Nacional de San Martín	
NOTA 2 - Cámara de equalización, enterrada, con volumen preparado para mantener caudal constante aún en momentos de menor generación (fin de semana). Bombeo por bomba sumergible a 7,5 metros de altura con Q = 1,25 m³/h.								07/04 2025		WHA					
NOTA 3 - La posición final de la línea de aireación deberá ser definida en la ingeniería de detalle. No se recomienda su soterración.						BOMBA									
NOTA 4 - La cámara de contacto para la desinfección se propone ubicar elevada, para aprovechar la conducción por gravedad directa a los tanques de almacenamiento. Como la altura de la misma lo permite, se propone instalar una pequeña obra civil en su interior, que contenga un sitio de acopio y/o los compresores para el sistema de aireación (biológico y equalizador compartido).						VÁLVULA GLOBO									
NOTA 5 - Tanques de acopio de agua, del cual se descarga a camiones cisterna para utilizar el efluente tratado para riego de caminos.						VÁLVULA EXCLUSIVA									

Datos de la bomba:
Marca: MOTORARG
Modelo: DRT 1100 1 HP
Nivel mínimo 0,4 m
 $Q_{max} = 14 \text{ m}^3/\text{h}$
 $Q_{op} = 1,25 \text{ m}^3/\text{h}$
 $H_{op} = 7,5 \text{ m}$

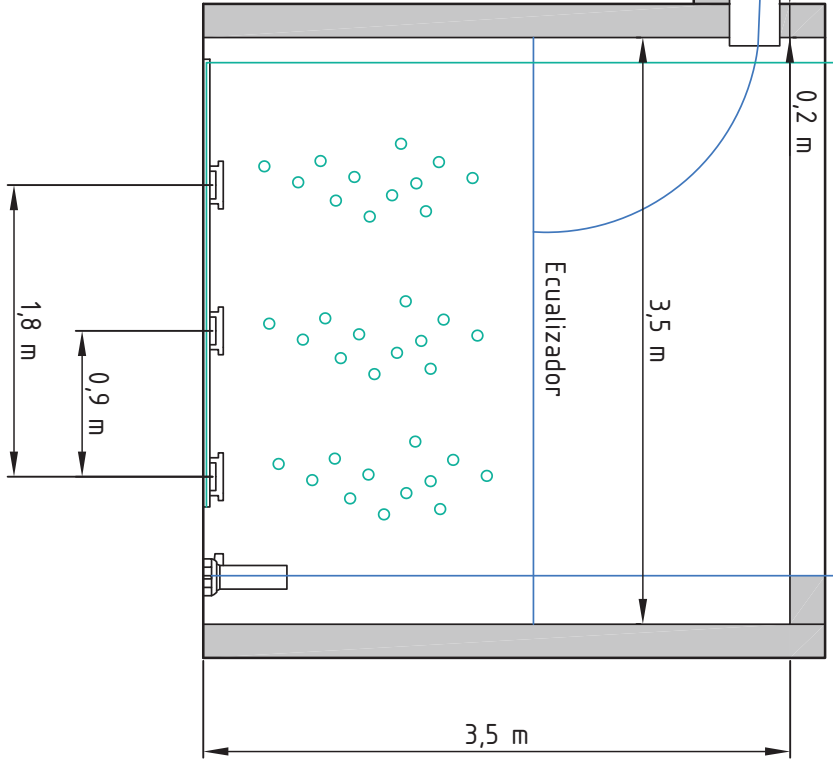
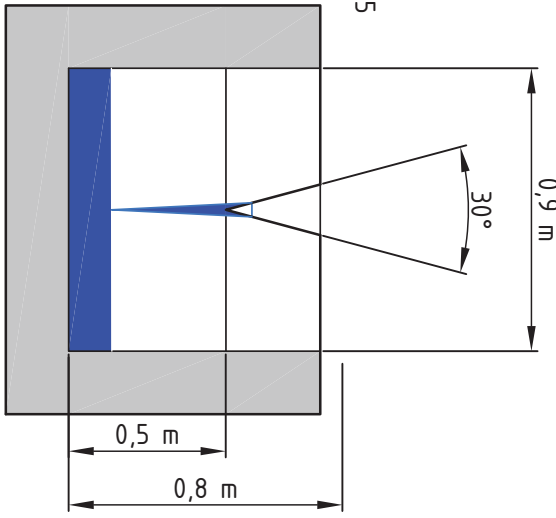
Vista en corte



Vista en corte



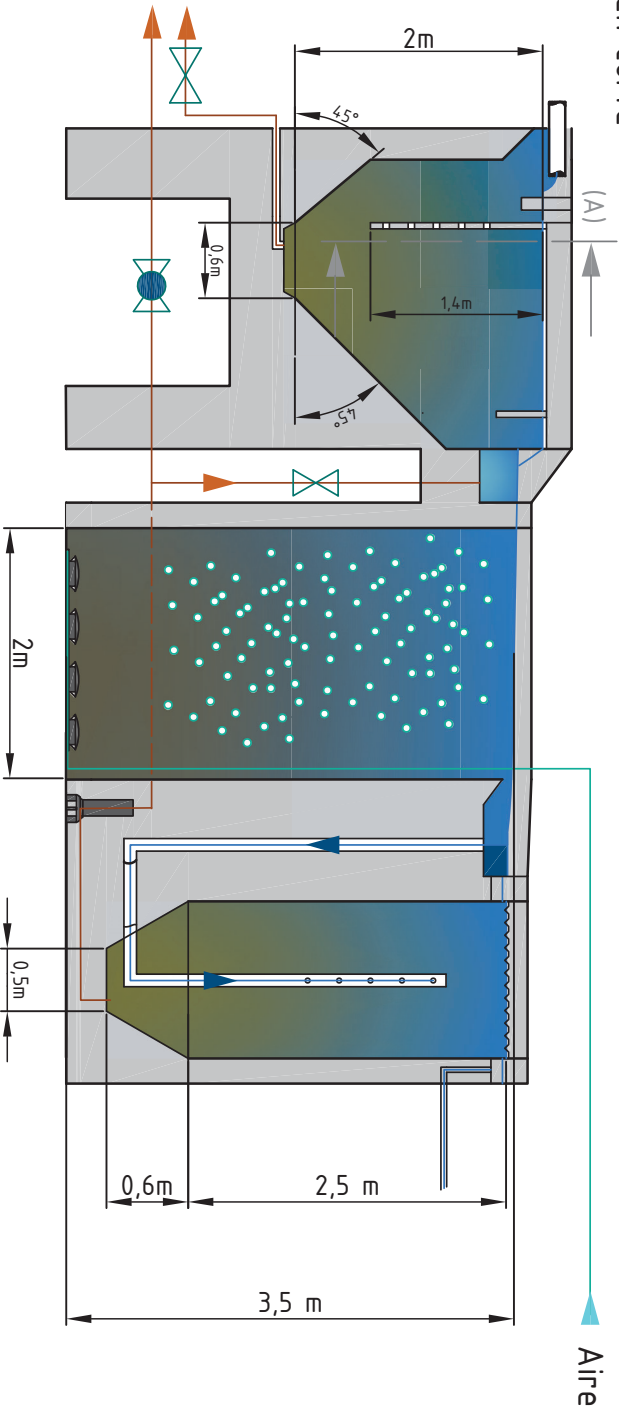
Vista frontal



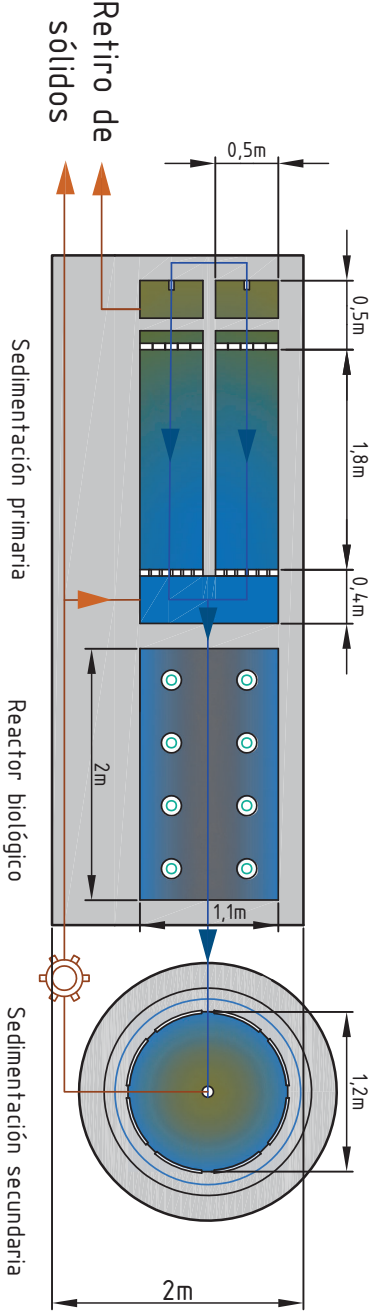
Vertedero de entrada

Fecha	Nombre	Tratamiento de aguas residuales provenientes del campamento y base del Proyecto Loma Gruesa	 Universidad Nacional de San Martín
Revisó	NPH		
Aprobó	WHA		
Escala	130		
DESASTE Y ECUALIZACIÓN		Alumno Nicolás Holoveski	
Plano N°9			Carrera Ingeniería Ambiental

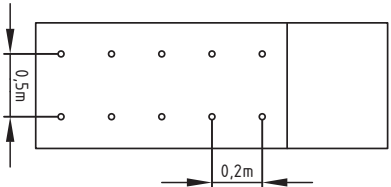
Vista en corte



Vista en planta



Corte (A)



Ingreso a sedimentación primaria

REFERENCIAS

- LÍNEA AIRE
- LÍNEA AGUA
- PURGA SÓLIDOS
- BOMBA
- VÁLVULA GLOBO
- VÁLVULA EXCLUSIVA

REFERENCIAS							
	LÍNEA AIRE		BOMBA	Fecha	Nombre	Tratamiento de aguas residuales provenientes del campamento y base del Proyecto Loma Gruesa	
	LÍNEA AGUA		VÁLVULA GLOBO	Revisó	NPH		
	PURGA SÓLIDOS		VÁLVULA EXCLUSA	Aprobó	07/04/2025		
				Escala	TRATAMIENTO PRIMARIO Y TRATAMIENTO SECUNDARIO		
				1:40			
				Plano N°10	Alumno Nicolás Holoveski		
				Carrera Ingeniería Ambiental			

9. Conclusiones generales

Vaca Muerta se ha consolidado como una cuasi política de Estado impulsada por sucesivas administraciones, con regímenes de incentivos que han atraído flujos de capitales privados y estatales desde sus inicios. Producto de estos años, el sector privado ha logrado un crecimiento que permitiría que el país pueda abastecerse energéticamente sin necesidad de importar, e incluso considerar proyectos exportadores. Con la apertura al mercado europeo, las empresas deberán cumplir con la Directiva de Información sobre Sostenibilidad Corporativa (CSRD), que establece estándares comunes de divulgación de impactos ambientales y sociales para garantizar la transparencia y la confianza de inversores y consumidores.

Todo esto se enmarca en el plano climático, donde ahora parece existir un viraje de la sociedad hacia una etapa de transición energética más prolongada, con una trayectoria que, en lo personal, considero más consistente con el *Announced Pledges Scenario* de la IEA. Este escenario subraya el papel del gas natural como vector de transición hacia una matriz de bajas emisiones, contribuyendo a los compromisos nacionales e internacionales de mitigación, aunque probablemente sin alcanzar el Net Zero en 2050 que plantea el Acuerdo de París. Más allá de que todos podemos coincidir en que es una lástima no lograr esa meta —lo cual nos obligará no solo a prevenir, sino también a evitar y mitigar los impactos del cambio climático—, creo que la Argentina podría adoptar el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas del Acuerdo de París. Debe reconocerse que las naciones en desarrollo —que no han tenido el mismo tiempo ni los mismos recursos para diversificar sus matrices energéticas— pueden aprovechar esta ventana para explotar sus recursos naturales y promover su crecimiento económico.

Este contexto global potencia la relevancia de los proyectos de gestión y reúso de aguas de producción, al alinear la competitividad del gas argentino con las exigencias de sostenibilidad imperantes en el mercado internacional.

Como se ha mencionado en el resumen ejecutivo, la justificación del proyecto, y el marco teórico del presente informe, la proyección de futuras crisis hídricas en la cuenca del Comahue, así como también la presión de accionistas e inversores y las posibles regulaciones a futuro en materia de hidrocarburos son desafíos que actualmente transita la industria, y soluciones enfocadas reducir el impacto ambiental permitirían un planeamiento más sostenible en el tiempo.

Dado que uno de los mayores desafíos que tiene la industria energética en Vaca Muerta es asegurar una correcta provisión de agua para sus actividades, el proyecto de tratamiento de agua de producción

planteado contempla alcanzar una calidad de agua de producción apta para su utilización en la conformación de fluidos de fractura hidráulica bajo la utilización de nuevos insumos químicos enfocados en obtener rendimientos aceptables en aguas de alta salinidad, bajando así la intensidad hídrica de la actividad.

El presente proyecto demuestra que, con un incremento de los costos de inversión inicial menor al 10% respecto a un tratamiento convencional consistente únicamente en tanques del tipo API 650 y separadores, es posible acondicionar una instalación que permita remover metales pesados tóxicos, hierro y sólidos y, de esta manera, obtener un efluente de una calidad suficiente que confiera posibilidades de re-uso para la fractura hidráulica, un proceso altamente demandante desde un punto de vista hídrico.

Es importante remarcar que, a día de hoy, esta no es una práctica común en la industria, principalmente por razones económicas. El *canon* de agua dulce que puede extraerse de los diferentes cauces fluviales, otorgado por la secretaría de ambiente y desarrollo sostenible en Neuquén para el caso del Río Neuquén, suele ser suficiente – y muy económico - para el correcto desarrollo de la industria; además, la calidad del agua de deshielo proveniente de dicha fuente es muy alta, facilitando la formulación de los fluidos necesarios, sin enaltecer demasiado el coste y haciendo más previsible la operación. De todas formas, también es cierto que la mayoría de proyectos desarrollados en base al No Convencional de Vaca Muerta se sitúan en cercanía a los ríos principales, en parte para abaratar los costos del bombeo. Además, es importante considerar que el escenario climático futuro de déficit hídrico que se prevé ocurrirá en la Cuenca Neuquina atenta con la sostenibilidad de esta práctica en el tiempo; con esa conceptualización, el proyecto prepara a la operación para este hipotético caso futuro.

En lo que respecta al proyecto de tratamiento de agua de producción, éste se sustenta en el desarrollo de tecnologías y mecanismos de tratamiento más estudiados y puestos en práctica; sin embargo, afloran otros tipos de tratamiento, como la electrocoagulación, los cuales podrían ser soluciones superadoras al tratamiento propuesto y motivo por el cual se propone la realización de pruebas a diferentes escalas para evaluar la factibilidad de adaptar las facilidades propuestas a dicho sistema. Si bien la bibliografía es limitada, sugiere que puede lograr grandes rendimientos e inclusive remover más sólidos disueltos, como la salinidad del agua. En ese espíritu, el tanque de floculación provee un tiempo de retención suficiente como para plantear la incorporación de ánodos y cátodos dentro de éste.

Por otro lado, el uso de aguas residuales para riego es una práctica común en la industria; así como también problemas relacionados con los olores derivados del tratamiento. Con un diseño aeróbico, el cual además permite confinar todo el tratamiento en un pequeño espacio, se podría reducir el impacto

provocado por los olores; Por otro lado, es importante considerar la ubicación en favor de la rosa de los vientos, evitando así que los posibles olores lleguen a la zona de campamento.

9.1. Conclusiones personales

Fue hace no mucho tiempo que decidí elegir un tema para mi proyecto final que se relacione con las temáticas que escucho en mi día a día. Empecé así un proceso que duró un poco más de lo que hubiese querido, pero que no me arrepiento de haberlo elegido.

Desarrollar este proyecto me enseñó muchas cosas; de entre todas, quiero mencionar tres de ellas. La primera, que gestionar el tiempo, cada vez más escaso, requiere una planificación por detrás muy meticulosa para lograr los objetivos que uno se propone; cuando uno no planifica bien, es más probable que ocurran retrasos. La segunda que, aun planificando bien, los imprevistos ocurren. Más allá de que eso puede traer complicaciones de diversa índole, lo importante es tratar de sacar algo positivo; varias partes de este proyecto tuvieron que ser repensadas y replanteadas desde la concepción inicial del mismo, pero a la larga creo que eso también aporta a la calidad de lo que uno hace y eso puede tener más valor que llegar a una fecha. La tercera, que la mayoría de las veces uno no puede hacer todo por su cuenta. Si bien soy el que elaboró este trabajo, hubiese sido imposible sin las mentes que dedicaron parte de su tiempo en brindarme información, hecho docencia, aconsejado y ayudado. Y para ello, es importantísimo construir vínculos.

Como reflexión final, habiendo tenido la suerte de conocer Vaca Muerta, entablando relaciones con profesionales a los cuales admiro mucho, e inclusive haber podido recorrer instalaciones como las del diseño propuesto, me encuentro con que siempre hay más para aprender, y eso puede ser un motor para mejorar como persona y profesional.

9.2. Agradecimientos

A mis papás, que me aguantaron en todas las que necesité y mucho más; sin ellos este trabajo no hubiese sido posible. A mis hermanos, que me acompañaron en sentimiento dado que han tenido la suerte, como yo también la tuve, de ser universitarios. Nuestras charlas siempre sirvieron para *bajar los pies a la tierra*.

A Nadia, la persona que más amo y que conocí gracias a la universidad: compartimos la misma carrera. Gracias a su apoyo incondicional, aguante y consejos, pude sacar muchas cosas adelante. También a su familia, que ha sido muy buena conmigo.

A mis compañeros de la facultad. Si menciono a todos me voy a olvidar de alguno y no quiero hacer sentir mal a nadie, pero no puedo no decirle gracias a Juani y Aldana (que no son ambientales como yo, pero sí que ambientaron varias cursadas del ciclo básico común) y también a mis colegas ambientales, con los que aprendí muchos años y espero mantenerme en contacto.

A la Universidad Nacional de San Martín y a todos sus docentes, quienes se dedicaron cuerpo y alma, día tras día y sin importar las horas, en formar a futuros profesionales. Realmente creo que es una institución de excelencia y estoy sumamente agradecido de haberla elegido como mi casa de estudios.

A mis colegas; mi tutor, Stephen, un profesional ambiental admirable y, para mí, un modelo a seguir; depositó confianza en mí desde el principio y por ello le estoy muy agradecido. Alberto, a quien también considero un mentor y, si bien no figura como tutor del proyecto, le debo a su continua docencia muchos de los conceptos sobre filosofía de operación de plantas reflejados en este trabajo (y por ello, pongo su firma en los planos). A Fede, por *bancarme* y valorarme, dándome todos los medios posibles para que pueda desarrollar este trabajo y recibirme.

Marcela, Yaín y Franco en Neuquén, Yamila en Chubut, quienes me dieron el primer vistazo al mundo de la gestión del agua de producción y mucho material del cual nutrirme. Juanca, el responsable de que haya conocido las particularidades relacionadas con el uso del agua de producción para las fracturas hidráulicas y al que le debo una gran parte de la idea de este proyecto. Juan y Ricardo, que me enseñaron cómo se estiman los costos de proyectos de calibres semejantes (o mucho más) a éste.

De todos aprendí y espero seguir aprendiendo con ellos (y muchos otros más).

10. Bibliografía

Manuales y Guías

- American Petroleum Institute. (1990). *API Recommended Practice 421: Design and Operation of Oil–Water Separators*. Washington, DC: API Publishing Services.
- American Petroleum Institute. (2020). *API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage* (13th ed.). Washington, DC: API Publishing Services.
- Heydari Gorji, A., & Kalat Jari, H. (2006). *Improve selection and sizing of storage tanks: Guidelines help engineers select the best tank design for plant applications*. SAZEH Consultants.
- ENOHSA. (2000). *Manual de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Buenos Aires, Argentina: Secretaría de Obras Públicas:
 - Criterio 5: Coagulación, precipitación y remoción de metales.

- Criterio 6: Remoción de hierro y manganeso.
- Criterio 7: Sedimentación.
- Fundamento VIII-4: Remoción de Fe y Mn.
- Fundamento VII: Sedimentación.
- ATV A131 (2003). Norma Alemana sobre diseño de sedimentación secundaria.
- AKROS Ingeniería (2003). Documento técnico sobre Ingeniería de Sedimentación Secundaria, Javier Nanning B.

Libros

- Grady, C. P. L., Daigger, G. T., Love, N. G., & Filipe, C. D. M. (2011). *Biological Wastewater Treatment* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Wesley-Eckenfelder, W. (1997). *Industrial Water Pollution Control* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.

Artículos Científicos (Papers)

- Argonne National Laboratory; Veil, J. A., & Puder, M. G. (2004). *A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas and Coal Bed Methane*.
- Ayub, S., et al. (2020). Removal of heavy metals (Cr, Cu, and Zn) from electroplating wastewater by electrocoagulation and adsorption processes.
- Bonapace, J. C. (2015). Water Management for Tight and Shale Reservoir: A Review of What Has Been Learned and What Should Be Considered for Development in Argentina.
- Fakhru'l et al. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Elsevier*. Recuperado de ScienceDirect.
- Jiménez, S., et al. (2017). State of the art of produced water treatment. *Journal of Environmental Management*. Recuperado de ScienceDirect.
- Khan et al. (2023). Efficacy of Electrocoagulation Treatment for the Abatement of Heavy Metals.
- Mohammad et al. (2019). Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Elsevier*. Recuperado de ScienceDirect.
- Nadella et al. (2020). Fit-for-purpose treatment of produced water with iron and polymeric flocculant for reuse in hydraulic fracturing. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31786393/>
- Abbas A. Al-Raad et al. (2019). Treatment of Saline Water Using Electrocoagulation with Combined Electrical Connection of Electrodes.

Documentos IAPG

- IAPG (2013). Gestión del Agua en la Exploración y Explotación de Reservorios No Convencionales en el Área de Influencia de la Cuenca Neuquina: PR IAPG-SC-11-2013-00.
- IAPG (2020). Gestión del Agua en la Exploración y Explotación de Reservorios No Convencionales: PR IAPG-SC-11-2013-01.
- IAPG (2022). Fluidos de fractura HVFR en Vaca Muerta: Desde el laboratorio hacia la optimización de los diseños de estimulación.
- IAPG (s.f.). *El ABECE de los hidrocarburos en Reservorios No Convencionales*.

Institucionales

- Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). (s.f.). *Transición Energética y Tecnología Nuclear: Las 9 Claves para la Transición*.
- Cuarto Informe Bienal de Actualización de la República Argentina a la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Recuperado de:
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2022/01/4to_informe_bienal_de_la_republica_argentina.pdf
- Gobierno de Argentina. (2015). *Acuerdo de París*. Recuperado de:
<https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/acuerdo-de-paris>
- International Energy Agency (IEA).

Tesis y Proyectos

- Camps, Y. (2019). *Adecuación de la Planta de Tratamiento de Agua – Yacimiento Piedra Atravesada de la Empresa Petrolía*. Universidad del Comahue.
- Candellero & Delgado. (s.f.). *Reutilización de Agua de Flowback en Fracturas No Convencionales*. Universidad del Comahue.
- Ciro. (2021). *Planta de Tratamiento de Crudo* [Proyecto Final de Grado]. ITBA

Otros documentos y materiales

- [El desarrollo histórico de las exploraciones petroleras en la Argentina](#). Ricciardi - UNLP
- [El petróleo en Neuquén: Cien años de historia](#). Ministerio de Energía y Recursos Naturales.
- Estudio de Impacto Ambiental - Perforación de pozo TPT LA-100x.
- Wikipedia. (s.f.). *Yacimiento petrolífero Vaca Muerta*. Recuperado de
https://es.wikipedia.org/wiki/Vaca_Muerta
- Webs: EarthSky.org, Production-Technology.org, Environment.govt.nz, Halliburton, DineroEnElTiempo.com, LMNeuquen.com
- Cátedra FIUBA, Ingeniería Sanitaria.

Material UNSAM consultado específicamente para la elaboración de este proyecto

- Cátedra UNSAM, Procesos Fisicoquímicos en Ingeniería Ambiental.
- Cátedra UNSAM, Diseño de Tratamientos Biológicos para Efluentes Líquidos.
- Cátedra UNSAM, Bioprocesos
- Cátedra UNSAM, Contaminación de Aguas y Suelos.
- Cátedra UNSAM, Fenómenos del Transporte.

11. Anexos

11.1. Análisis fisicoquímico Flowback



INFORME DE ENSAYO
EQ23-01143

Laboratorio
Neuquén 8300
Tel: 029

Neuquén, 17 de junio de 2023 Página 2 de 4

Identificación	Producto cliente: Agua Recibido: 02/06/2023	Muestreo cliente: 19/05/2023 11:50	LD	LC	Resultado	Unidad
Análisis	Método					
DBO	SM 5210 B y D - 24th Edition	-	5	<5		mg/L
Alcalinidad pH 4.5	Basado en SM 2320B - 23rd Edition	0.3	1	240		mg CaCO3/l
Amonio	ISO 11732:2005	0.02	0.06	<0.06		mg/L
Cloruros	Basado en SM 4500Cl-B - 23rd Edition	-	2	33926		mg/L
Conductividad a 25°C	SM 2510B - 23rd Edition	-	0.1	96880.0		uS/cm
Densidad a 20°C	ASTM D1429	-	-	1.051		g/cm3
DQO	SM 5220 D 23rd Edition	-	50	140		mg/L
Fosfatos	SM 4500-P B y E- 23rd Edition	0.15	0.5	58.9		mg/L
Hierro soluble	HACH 8146	0.03	0.1	35.6		mg/L
Boro Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	24.75		mg/L
Aluminio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	0.50		mg/L
Calcio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	5658.00		mg/L
Bario Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	27.25		mg/L
Hierro Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	47.50		mg/L
Potasio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.1	0.3	474.5		mg/L
Sodio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.03	0.1	7407.3		mg/L
Estroncio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	-	-	950.00		mg/L
Magnesio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.03	0.1	216.5		mg/L
Manganeso Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	4.90		mg/L
Cromo Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	<0.05		mg/L
Mercurio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.002	0.005	<0.005		mg/L
Cadmio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	<0.05		mg/L
Plomo Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	<0.05		mg/L
Arsénico Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.1	0.3	<0.3		mg/L
Níquel Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.03	0.1	0.6		mg/L
Vanadio Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.06	<0.06		mg/L
Cobre Total	Basado en SM 3120 A y B 23rd Edition	0.02	0.05	0.35		mg/L
pH a 25°C	SM 4500H.B - 23rd Edition	-	0.1	6.3		-
Resistividad	Cálculo	-	-	103.220		Ohmios/cm
Sólidos Totales Disueltos	SM 2540 C - 23rd Edition	-	10	68480		mg/L

11.2. Metodología de Identificación y Evaluación de Alternativas

La identificación de alternativas comienza con un relevamiento inicial de las diferentes opciones disponibles para la resolución de un problema o una necesidad vinculada a un proyecto. Para decisiones técnicas e industriales, una correcta identificación requiere una descripción detallada de la misma, en la cual se explique el mecanismo de funcionamiento de la alternativa, y puntos fuertes y débiles en base a aspectos técnicos, sociales, legales, económicos, ambientales, de la calidad, y otras particularidades que puedan surgir.

La evaluación de alternativas se realizará mediante un método multicriterio el cual comienza con un listado de criterios con un Peso o Ponderación (P) en base a las necesidades del proyecto (Tabla 11.2.1). En base a este listado, se califica cada alternativa en base al Cumplimiento (C) que dicha solución tiene sobre los mismos (Tabla 11.2.2). De la sumatoria de los productos de las variables Ponderación y Cumplimiento se obtiene la puntuación de cada alternativa, la cual será mayor a más viable la misma (Ecuación 11.1 y tabla 11.2.3).

tabla 11.2.1: Criterio de cumplimiento

Cumplimiento (C)
1 Satisface poco
2 Satisface medianamente
3 Satisface mucho

tabla 11.2.2: Criterio de peso

Peso (P)
1 Poco importante
2 Importancia media
3 Muy Importante

tabla 11.2.3: Comparativa de alternativas

Criterios	(P)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Criterio 1	P1	C1	C2	C3
Criterio 2	P2	C1	C2	C3
Criterio 3	P3	C1	C2	C3
Criterio 4	P4	C1	C2	C3
		EA	EB	EC

$$E = \sum P \times C \quad (\text{Ec. 11.1})$$

11.3. Volúmenes del Tanque Pulmón (TKP)

En la siguiente tabla 11.3.1 se pueden observar:

- Q_{entrada} : Ingreso de caudal diario al tanque pulmón.
- Q_{medio} : Egreso de caudal diario desde el tanque pulmón, calculado como el promedio de todos los datos de ingreso.
- V_{ar} : Volumen acumulado diario en base al caudal de entrada, para todo el período utilizado para el diseño.
- V_{am} : Volumen acumulado diario en base al caudal de salida, para todo el período utilizado para el diseño.
- Delta V: Diferencia entre V_{ar} y V_{am} ; los Delta V máximo y mínimo son utilizados para el cálculo del volumen mínimo del ecualizador.

Los datos de caudal de entrada fueron obtenidos en base a los datos de de inyección de agua producida, presentes en la base de datos pública de la secretaría de energía de la nación (Capítulo IV). Como base del análisis, se utilizaron los datos de un yacimiento operativo en Vaca Muerta (no mencionado en este informe) para el período de días informados en la misma, afectados por un ratio de conversión (4,5 veces menor).

Tabla 11.3.1: Datos utilizados para el cálculo del volumen neto del tanque pulmón.

Día	Q entrada m3/d	Qmed m3/d	Var m3	Vam m3	DELTA V m3
5/26/2024	1001,3	919,8	1001,3	919,8	81,4
5/27/2024	1011,7	919,8	2013,0	1839,7	173,3
5/28/2024	970,3	919,8	2983,3	2759,5	223,8
5/29/2024	975,5	919,8	3958,9	3679,4	279,5
5/30/2024	893,4	919,8	4852,2	4599,2	253,0
5/31/2024	901,9	919,8	5754,2	5519,1	235,1
6/1/2024	952,4	919,8	6706,6	6438,9	267,7
6/2/2024	948,2	919,8	7654,8	7358,8	296,0
6/3/2024	954,7	919,8	8609,4	8278,6	330,8
6/4/2024	940,6	919,8	9550,0	9198,5	351,5
6/5/2024	909,3	919,8	10459,3	10118,3	340,9
6/6/2024	899,5	919,8	11358,7	11038,2	320,5
6/7/2024	935,8	919,8	12294,5	11958,0	336,5
6/8/2024	916,3	919,8	13210,8	12877,9	332,9
6/9/2024	947,6	919,8	14158,4	13797,7	360,6
6/10/2024	930,5	919,8	15088,9	14717,6	371,3
6/11/2024	899,0	919,8	15987,9	15637,4	350,4
6/12/2024	912,1	919,8	16900,0	16557,3	342,7
6/13/2024	870,3	919,8	17770,3	17477,1	293,1
6/14/2024	840,6	919,8	18610,8	18397,0	213,9
6/15/2024	830,4	919,8	19441,2	19316,8	124,4
6/16/2024	845,8	919,8	20287,0	20236,7	50,4
6/17/2024	866,9	919,8	21153,9	21156,5	-2,6
6/18/2024	889,1	919,8	22043,0	22076,4	-33,3
6/19/2024	901,6	919,8	22944,6	22996,2	-51,6
6/20/2024	942,6	919,8	23887,2	23916,1	-28,8
6/21/2024	910,5	919,8	24797,7	24835,9	-38,2
6/22/2024	920,7	919,8	25718,4	25755,8	-37,4
6/23/2024	910,1	919,8	26628,5	26675,6	-47,1
6/24/2024	936,8	919,8	27565,3	27595,5	-30,2
6/25/2024	950,0	919,8	28515,3	28515,3	0,0

11.4. Memoria de cálculo para sistemas conducción e impulsión

El sistema de conducción de una planta tiene el objetivo de conducir el efluente por las diferentes etapas del tratamiento. Se conforma de un arreglo de cañerías y ductos, bombas impulsoras, y accesorios como válvulas, codos y acoples tipo T. En general, las tuberías deben seguir un perfil hidráulico particular que dependerá de la filosofía de diseño de la planta. Si aprovecha la energía potencial, será un flujo por gravedad; si el proceso requiere que se entregue energía, se considera un flujo a impulsión.

La conducción a gravedad aprovecha la altura hidrostática de cada unidad. Según la ecuación de Manning, la velocidad de flujo en una cañería por gravedad se calcula mediante la siguiente ecuación (Ec. 11.2).

$$v = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (\text{Ec. 11.2})$$

En donde:

- v es la velocidad del fluido en m/s.
- n es el coeficiente de Manning, que depende del material.
- R_h es el radio hidráulico, en metros.
- S es la pendiente expresada en grados sobre 100 (comúnmente se adoptan 5 grados, equivalente a 0,005).

El radio hidráulico dependerá del tipo de canal recolector; para una cañería circular completamente llena, es equivalente al perímetro de la tubería. Sin embargo, en una conducción a gravedad se consideran tuberías parcialmente llenas, pero con un porcentaje de aire dentro de las mismas (Figura 11.4.1).

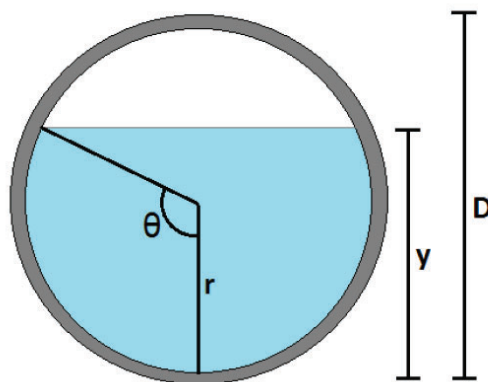


Figura 11.4.1: Tubería parcialmente llena (Fuente: Alonso, 2019)

El radio hidráulico (R_h) (Ec. 11.3) en una cañería parcialmente llena se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R_h = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin(\theta)}{\theta}\right) \cdot D \quad (\text{Ec. 11.3})$$

Asumiendo una altura de pelo de agua del 75% de la cañería, equivale a un ángulo de 120° respecto a la vertical, se obtiene que el R_h es aproximadamente 0,3 el diámetro.

Por otra parte, las conducciones a impulsión si consideran una tubería totalmente llena, por lo que la velocidad dependerá del caudal por sobre la sección (Ec. 11.4)

$$v = Q/A \quad (\text{Ec. 11.4})$$

Finalmente, también es relevante conocer las pérdidas de carga por fricción en las tuberías y accesorios, debido a que es en base a esos resultados que se analiza el requerimiento mínimo de las bombas del tipo centrífugas. La pérdida de fricción por cañerías y accesorios puede calcularse mediante la fórmula de Darcy-Weisbach (Ec. 11.5)

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + K_{acc} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 11.5})$$

En donde:

- h_f es la pérdida de carga expresada en metros.
- K_{acc} es la constante de pérdida del accesorio (figura 11.4.2).

Accesorio	K	L_{eq}/D
Válvula del globo, totalmente abierta	7.5	350
Válvula de cuña, totalmente abierta	3.8	170
Válvula de compuerta, totalmente abierta	0.15	7
Válvula de compuerta, abierta 3/4	0.85	40
Válvula de compuerta, abierta 1/2	4.4	200
Válvula de compuerta, abierta 1/4	20	900
Codo a 90°, estándar	0.7	32
Codo a 90°, de radio corto	0.9	41
Codo a 90°, de radio largo	0.4	20
Codo a 45°, estándar	0.35	15
Tubo en T, conducto con salida lateral	1.5	67
Tubo en T, conducto recto	0.4	20
	1.6	75

Figura 11.4.2: Constantes de accesorios tipo.

- v es la velocidad del fluido en m/s.
- g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 .
- L es el largo de la tubería en metros.

- D es el diámetro de la tubería en metros.
- f es el factor de Fanning.

El factor de Fanning es una constante que considera parámetros propios del tipo de conducción; es decir, depende de la rugosidad de las paredes de la cañería, y el régimen de flujo, que puede ser laminar o turbulento según la velocidad y la viscosidad del fluido. El número de Reynolds, definido en la ecuación 5.10 del capítulo de diseño de [Separador de Placa](#), se vuelve a enunciar:

$$Re = \frac{D_h \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

En la siguiente figura se pueden observar los distintos valores del factor de Fanning en función del régimen de flujo y el tipo de cañería utilizado (figura 11.4.3)

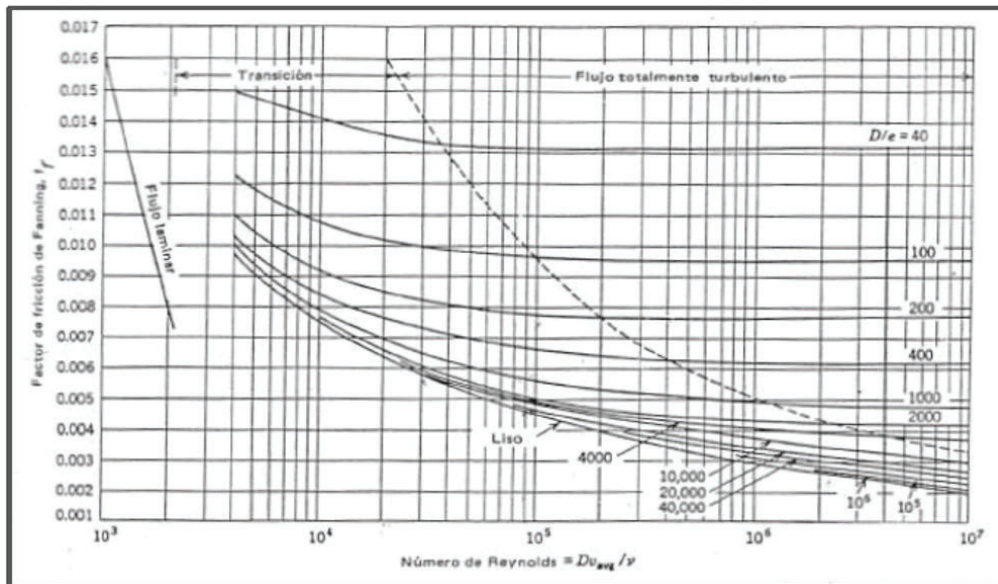


Figura 11.4.3: Factor de fanning en función del número de Reynolds para diferentes tipos de cañerías

Para regímenes laminares, se calcula como $16/Re$. Para regímenes turbulentos, existen distintas expresiones de cálculo empíricas del factor de *fanning* en función del número de Reynolds. Para tuberías lisas, se puede calcular mediante la expresión de Blasius (Ec. 11.6)

$$f_{fanning} = \frac{0.0791}{Re^{1/4}} \quad 2 \cdot 10^3 < Re < 10^5 \quad (\text{Ec. 11.6})$$

En general, todo diseño comienza adoptando una velocidad del fluido dentro de la cañería para cada tipo de flujo, y luego se busca despejar el diámetro mínimo requerido; en base a este, se busca el

diámetro comercial más cercano y se revalida el rango de velocidad seleccionado. En la siguiente tabla 11.4.1, se expresan las velocidades recomendadas para cada tipo de impulsión.

Tabla 11.4.1: Criterios de velocidad de diseño para diferentes tipos de conducción

Servicio	Velocidad recomendada
Línea Impulsada	1 a 3 m/s
Línea a Gravedad	0,3 a 2 m/s

Finalmente, para conocer las alturas desarrolladas por cada bomba instalada, se utiliza la ecuación de Bernoulli, la cual representa un balance de energía mecánica, expresada en metros (Ec. 11.7).

$$\frac{v_A^2}{2.g} + \frac{P_A}{\rho.g} + h_A + h_{bomba} - h_f = \frac{v_B^2}{2.g} + \frac{P_B}{\rho.g} + h_B \quad (\text{Ec. 11.7})$$

Esta ecuación dice que la diferencia de energía del fluido entre el punto A y B está dada por las diferencias de altura (h_A vs. h_B), presión ($\frac{P}{\rho.g}$), velocidad ($\frac{v^2}{2.g}$), y las pérdidas de energía por fricción (h_f), la cual debe ser compensada por la energía que entrega la bomba (h_{bomba}). Para facilitar los cálculos, se considera la energía en la altura del pelo de agua de todas las unidades de la planta, por lo que la presión es siempre cercana a la atmosférica, y la velocidad es nula. De esta forma, la expresión de altura para la bomba se reduce a la siguiente (Ec. 11.8)

$$h_{bomba} = h_B - h_A + h_f \quad (\text{Ec. 11.8})$$

11.5. Misceláneos

Tabla 11.5.1: Capacidades nominales estándar de tanques cilíndricos (API 650). Fuente: Improve selection and sizing of storage tanks (A. Heydari Gorji et. al; October 2006).

100 | OCTOBER 2006 HYDROCARBON PROCESSING

TABLE 3. Nominal capacities of standard vertical cylindrical tanks, m³

Height, m	Diameter, m																						
	3	4	6	8	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
1	7	12	28	50	78	122	176	240	314	397	490	593	706	855	1,017	1,194	1,385	1,590	1,809	2,042	2,290	2,551	2,827
2	14	25	56	100	157	245	353	481	628	795	981	1,187	1,413	1,710	2,035	2,389	2,770	3,180	3,619	4,085	4,580	5,103	5,654
3	21	37	84	150	235	358	530	721	942	1,192	1,472	1,781	2,120	2,565	3,053	3,583	4,156	4,771	5,428	6,128	6,870	7,655	8,482
4	28	50	113	201	314	490	706	962	1,256	1,590	1,963	2,375	2,827	3,421	4,071	4,778	5,541	6,361	7,238	8,171	9,160	10,207	11,309
5	35	62	141	251	392	613	883	1,202	1,570	1,988	2,454	2,969	3,534	4,276	5,089	5,972	6,927	7,952	9,047	10,214	11,451	12,758	14,137
6	42	75	169	301	471	736	1,060	1,443	1,884	2,385	2,945	3,563	4,241	5,131	6,107	7,167	8,312	9,542	10,857	12,256	13,741	15,310	16,964
7	87	197	351	549	859	1,237	1,683	2,199	2,783	3,436	4,157	4,948	5,987	7,125	8,362	9,698	11,133	12,666	14,299	16,031	17,882	19,792	
8	100	226	402	628	981	1,413	1,924	2,513	3,180	3,926	4,751	5,654	6,842	8,142	9,556	11,083	12,723	14,476	16,342	18,321	20,414	22,619	
9	254	452	706	1,104	1,590	2,164	2,827	3,578	4,417	5,345	6,361	7,697	9,160	10,751	12,468	14,313	16,285	18,385	20,611	22,965	25,446		
10	282	502	785	1,227	1,767	2,405	3,141	3,976	4,908	5,939	7,068	8,552	10,178	11,945	13,854	15,904	18,095	20,428	22,902	25,517	28,274		
11	552	863	1,349	1,943	2,645	3,455	4,373	5,399	6,533	7,775	9,409	11,196	13,140	15,239	17,494	19,905	22,470	25,192	28,069	31,101			
12	603	942	1,472	2,120	2,886	3,769	4,771	5,890	7,127	8,482	10,263	12,214	14,335	16,625	19,085	21,714	24,513	27,482	30,621	33,929			
13	1,021	1,595	2,297	3,126	4,084	5,168	6,381	7,721	9,189	11,118	13,232	15,529	18,010	20,675	23,524	26,556	29,772	33,172	36,756				
14	1,099	1,718	2,474	3,367	4,398	5,566	6,872	8,315	9,896	11,974	14,250	16,724	19,395	22,266	25,333	28,599	32,063	35,724	39,584				
15	1,178	1,840	2,650	3,607	4,712	5,964	7,363	8,909	10,602	12,829	15,268	17,918	20,781	23,856	27,140	30,642	34,353	38,278	42,411				
16	1,256	1,963	2,827	3,848	5,026	6,361	7,853	9,503	11,309	13,684	16,285	19,113	22,167	25,448	28,952	32,685	36,643	40,828	45,238				
17	2,086	3,004	4,088	5,340	6,759	8,344	10,097	12,016	14,540	17,303	20,308	23,552	27,037	30,762	34,727	38,933	43,379	48,066					
18	2,208	3,180	4,329	5,654	7,156	8,835	10,691	12,723	15,395	18,321	21,502	24,937	28,627	32,571	36,770	41,223	45,931	50,893					
19	2,331	3,357	4,570	5,969	7,554	9,326	11,285	13,430	16,250	19,339	22,697	25,323	30,218	34,381	38,813	43,514	48,480	53,721					
20	2,454	3,534	4,810	6,283	7,952	9,817	11,879	14,137	17,105	20,357	23,891	27,708	31,808	36,191	40,850	45,804	51,035	56,548					
21	3,711	5,051	6,597	8,349	10,308	12,473	14,844	17,961	21,375	25,086	29,094	33,399	38,000	42,899	48,094	53,585	59,378						
22	3,887	5,291	6,911	8,747	10,799	13,067	15,550	18,816	22,393	25,280	30,479	34,989	39,810	44,941	50,364	55,138	62,203						
23	4,064	5,532	7,225	9,144	11,290	13,661	16,257	19,671	23,411	27,475	31,865	36,579	41,619	46,984	52,573	58,690	65,030						
24	4,241	5,772	7,539	9,542	11,780	14,254	16,964	20,527	24,428	28,670	33,250	38,170	43,429	49,027	54,955	61,242	67,858						
25	4,417	6,013	7,853	9,940	12,271	14,848	17,671	21,382	25,446	29,864	34,636	39,760	45,239	51,070	57,256	62,793	70,685						

STORAGE TANKS

Métodos para la remoción del Fe y el Mn						
Tratamiento de potabilización	Características del agua	Corrección de pH	Reacciones químicas	Instalación requerida	Insumos Químicos-Biológicos	Observaciones
aeración-filtración	Fe sin concentraciones apreciables de materia orgánica	eleva el pH entre 7 y 8, antes del aerador	oxidación por el oxígeno del aire	aerador, cámara de detención-filtro arena o arena y antracita	cal o soda cáustica para el aumento del pH	el aerador puede ser de bandejas con cualquier relleno que maximice el contacto gas líquido
aeración-oxidación-filtración	Fe y Mn sin concentraciones apreciables de materia orgánica	eleva el pH entre 7 y 8 para el Fe; y por encima de 9 para el Mn	oxidación por el oxígeno del aire, lo remanente se oxida con un oxidante fuerte	aerador, cámara de detención, agregado de oxidante-filtración directa	cal o soda cáustica para el aumento del pH, oxidantes fuertes (cloro, permanganato de potasio, ozono, dióxido de cloro)	puede suceder que se necesiten dos pasos: oxidación del Fe y en segunda etapa el Mn, ya que tienen distinto pH óptimo de oxidación
aeración-oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración	Fe y/o Mn con concentraciones de materia orgánica, color o turbiedad	eleva el pH entre 7 y 8 antes de aerar y por encima de 9 para el Mn		aerador, cámara de detención, sedimentador, filtro de arena, o arena y antracita	cal o soda cáustica para aumento de pH, coagulantes	el Fe puede estar en forma de complejo con la materia orgánica
Proceso cal-soda, sedimentación-filtración	Agua dura sin oxígeno con Fe y manganeso disueltos	la cal eleva el pH y el Fe precipita en forma de bicarbonato ferroso	no hay reacción de oxidación	Alimentador de cal, depósitos cerrados de mezclas, sedimentador, filtro	cal carbonato de sodio	se elimina el Fe disuelto en forma conjunta con la dureza.
biooxidación por bacterias específicas del hierro y el manganeso	agua de pozo con concentraciones de Fe y Mn pH < 7.2 Eh = 100 a 400 mV. rH > 14	las bacterias catalizan la precipitación química del hierro y el manganeso por el oxígeno del aire	hay reacción de oxidación (es más rápida y el floc biológico precipitado es más fuerte (posibilidad de aumento de velocidad de filtración))	biofiltro - filtro directo de arena ascendente (necesidad de rotar a un sistema físico-químico en caso de inhibición)	Necesidad de inóculo (bacterias) especialmente del Mn (tiempo de puesta en régimen largo)	Cuando el Fe y el Mn vienen juntos puede suceder que se deban eliminar en etapas, primero el Fe y luego el Mn
tratamiento con polifosfatos	aguas con concentraciones de hierro o manganeso o la combinación de ambos menores a 1 mg/l.	no requiere	los polifosfatos estabilizan y mantienen dispersos a estos metales manteniéndolos en solución	equipo dosificador de polifosfatos	polifosfatos (El total de los fosfatos aplicados no debe exceder 10 mg/l como PO ₄)	no se recomienda si el agua tratada es luego sometida a un proceso de calentamiento.
procesos de intercambio iónico	aguas que contengan menos de 0,30 mg/l de hierro o manganeso o combinación de ambos	no requiere	El hierro del agua cruda es intercambiado por sodio en un medio intercambiador de iones	reactor de intercambio iónico con resina específica.	se necesita regenerar la resina mediante una solución rica en sodio	no es aceptable cuando el agua cruda o el agua de lavado contienen oxígeno disuelto.

Tabla 1. Cuadro orientativo para la selección de los métodos de tratamiento para la remoción de Fe y Mn

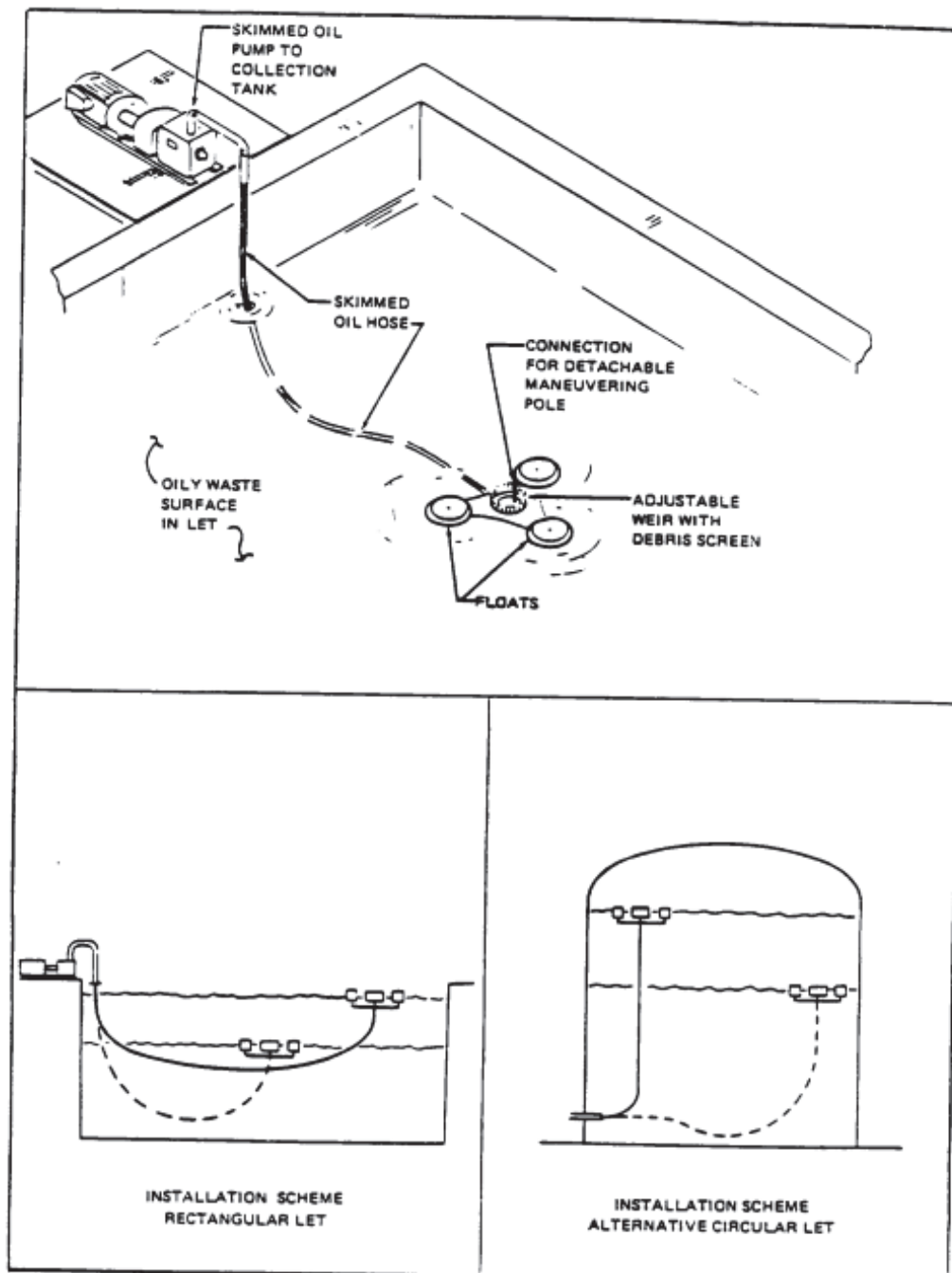


FIGURE 17
Floating Weir Type Skimmer Installation

TABLE I. SOLUBILITY OF OXYGEN IN WATER EXPOSED TO WATER SATURATED AIR AT 760 mm Hg PRESSURE					
Temp. °C	Solubility mg/L	Temp. °C	Solubility mg/L	Temp. °C	Solubility mg/L
0	14.62	16	9.87	32	7.31
1	14.22	17	9.67	33	7.18
2	13.83	18	9.47	34	7.07
3	13.46	19	9.28	35	6.95
4	13.11	20	9.09	36	6.84
5	12.77	21	8.92	37	6.73
6	12.45	22	8.74	38	6.62
7	12.14	23	8.58	39	6.52
8	11.84	24	8.42	40	6.41
9	11.56	25	8.26	41	6.31
10	11.29	26	8.11	42	6.21
11	11.03	27	7.97	43	6.12
12	10.78	28	7.83	44	6.02
13	10.54	29	7.69	45	5.93
14	10.31	30	7.56	46	5.84
15	10.08	31	7.43	47	5.74

TABLE II. CALIBRATION VALUES FOR VARIOUS ATMOSPHERIC PRESSURES AND ALTITUDES.

Tabla de calibración de la solubilidad del oxígeno en función de la temperatura

TABLE II. CALIBRATION VALUES FOR VARIOUS ATMOSPHERIC PRESSURES AND ALTITUDES.					
Pressure Inches Hg	mm Hg	kPa	Altitude Ft.	m	Calibration Value (%)
30.23	768	102.3	-276	-84	101
29.92	760	101.3	0	0	100
29.61	752	100.3	278	85	99
29.33	745	99.3	558	170	98
29.02	737	98.3	841	256	97
28.74	730	97.3	1126	343	96
28.43	722	96.3	1413	431	95
28.11	714	95.2	1703	519	94
27.83	707	94.2	1995	608	93
27.52	699	93.2	2290	698	92
27.24	692	92.2	2587	789	91
26.93	684	91.2	2887	880	90
26.61	676	90.2	3190	972	89
26.34	669	89.2	3496	1066	88
26.02	661	88.2	3804	1160	87
25.75	654	87.1	4115	1254	86
25.43	646	86.1	4430	1350	85
25.12	638	85.1	4747	1447	84
24.84	631	84.1	5067	1544	83
24.53	623	83.1	5391	1643	82
24.25	616	82.1	5717	1743	81
23.94	608	81.1	6047	1843	80
23.62	600	80.0	6381	1945	79
23.35	593	79.0	6717	2047	78
23.03	585	78.0	7058	2151	77
22.76	578	77.0	7401	2256	76
22.44	570	76.0	7749	2362	75
22.13	562	75.0	8100	2469	74
21.85	555	74.0	8455	2577	73
21.54	547	73.0	8815	2687	72
21.26	540	71.9	9178	2797	71
20.94	532	70.9	9545	2909	70
20.63	524	69.9	9917	3023	69
20.35	517	68.9	10293	3137	68
20.04	509	67.9	10673	3253	67
19.76	502	66.9	11058	3371	66

Tabla de calibración de presión en función de la altura

Difusor de burbuja fina RG-300		Difusor de burbuja gruesa CB-300	
Rango de caudal:	2 a 8 Nm ³ /hora	Rango de caudal:	3 a 25 Nm ³ /hora
Caudal de diseño:	5 Nm ³ /hora	Caudal de diseño:	10 Nm ³ /hora
Pérdida de carga:	20 mbar para 2 Nm ³ /hora 40 mbar para 5 Nm ³ /hora 70 mbar para 8 Nm ³ /hora	Pérdida de carga:	20 mbar para 3 Nm ³ /hora 40 mbar para 10 Nm ³ /hora 70 mbar para 25 Nm ³ /hora
Densidad:	1 a 6 difusores/m ²	Densidad:	0,5 a 3 difusores/m ²
SOTE:	15,4 gr. (5,5%) a 22,4 gr. (8%) por m ³ /h de aire y por m de profundidad.	SOTE:	5,1 gr. (1,8%) a 7,4 gr. (2,6%) por m ³ /h de aire y por m de profundidad.
Eficiencia de transferencia de O ₂ :	2,5 – 6 Kg. O ₂ /Kwh	Eficiencia de transferencia de O ₂ :	0,8 – 2 Kg. O ₂ /Kwh

Difusores de burbuja gruesa y fina

Los valores indicados con una tolerancia de +/- 5 %, tanto de caudal de succión como de potencia del cabezal sin accesorios, corresponden a descarga a presión atmosférica normal P= 1013 mbar y temperatura de admisión del aire T = 20°C. Para otros gases y/o condiciones operativas, incluyendo necesidades simultáneas de presión y vacío, consultar.

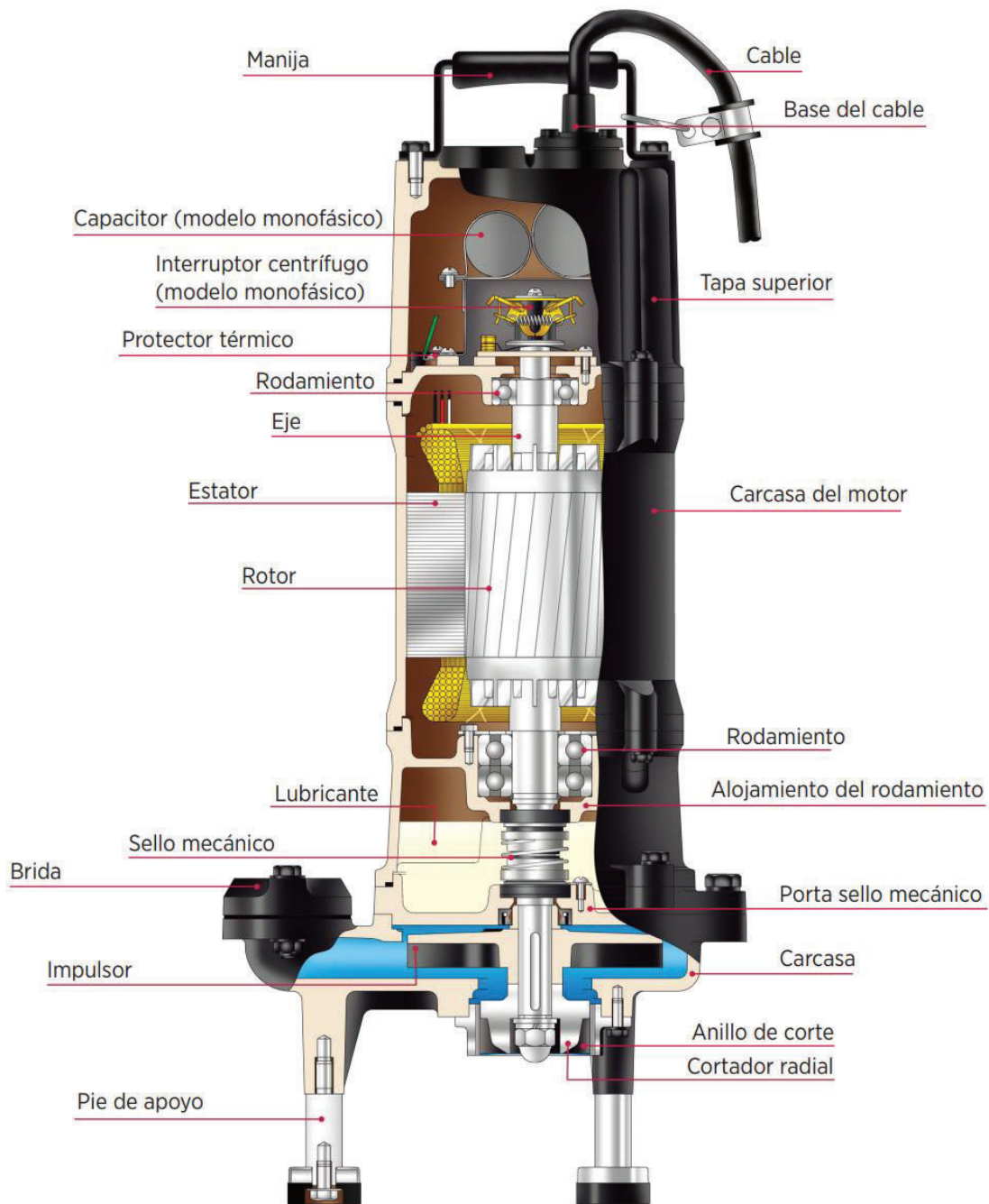
$\Delta p(\text{mbar})$		100		200		300		400		500	
Modelo	RPM	Q m ³ /h	P HP	Q m ³ /h	P HP	Q m ³ /h	P HP	Q m ³ /h	P HP	Q m ³ /h	P HP
R100	1450	29	0,4	20	0,5	12	0,7				
	2250	53	0,6	45	0,8	37	1,1				
	2900	73	0,7	64	1,1	57	1,4				
	4500	122	1,1	113	1,7	105	2,1	97	2,6		
R200	1450	62	0,6	47	0,9	34	1,3				
	2250	110	0,9	96	1,4	82	1,9				
	2900	150	1,2	136	1,9	122	2,4	108	3,104		
	4500	248	1,7	233	2,9	219	3,8	205	5		
R300	1450	87	0,6	70	1,1	53	1,5				
	2250	154	0,9	136	1,7	119	2,3	101	3,0		
	2900	207	1,2	190	2,1	173	3,0	155	3,9		
	4500	340	1,8	322	3,3	306	4,7	288	6,0		
R500	1450	140	1,0	118	1,7	104	2,3				
	2250	240	1,5	210	2,6	197	3,7	169,75	4,7		
	2900	319	1,9	298	3,4	277	4,6	256	5,9		
	4500	518	3,0	496	5,2	476	7,1	454	9,2		
R600	1450	181	1,2	147	2,2	115	3,0				
	2250	315	1,8	281	3,4	249	4,7	215	6,1		
	2900	425	2,4	391	4,3	359	6,0	325	7,9		
	4500	686	3,7	660	6,7	628	9,3	594	12,1		
R1000	1450	294	2,0	266	3,4	240	4,6	212	5,8		
	2250	484	3,1	456	5,3	430	7,1	403	9,1		
	2900	638	4,0	611	6,8	585	9,1	557	11,7		
	4300	972	6,0	944	9,8	919	13,6	892	17,4	858	21,1
R1200	1450	429	2,5	396	4,5	365	6,2	322	8,1		
	2250	669	4,0	666	7	635	9,6	602	12,4		
	2900	919	5,0	886	9	854	12,4	822	16,0	784	19,7
	4300	1459	7,9	1426	14	1395	19,2	1362	24,8		



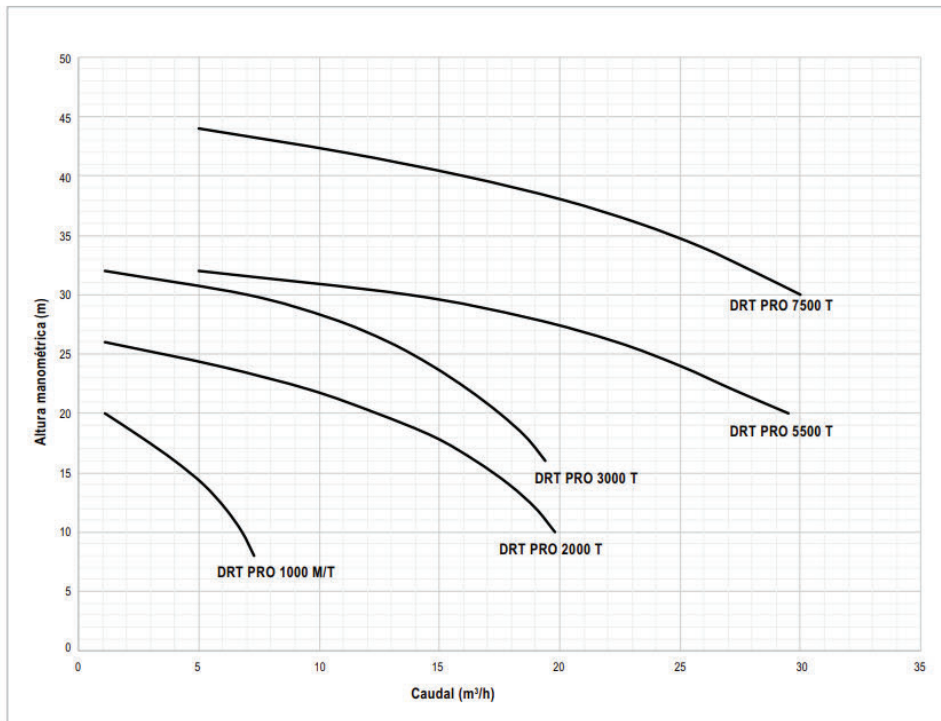
Recomendamos verificar con Repicky o su representante, el motor adecuado para las condiciones de operación solicitadas, ya sean de presión o vacío.

Diferentes modelos de sopladores

DESPIECE



CURVAS DE RENDIMIENTO



PRESTACIONES - 50Hz

MODELOS	HP	ALTURA MANOMETRICA (metros)																		
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44
DRT PRO 1000 M	1,3	7,3	6,8	6,1	5,2	4	2,6	1,1												
DRT PRO 1000 T	1,3	7,3	6,8	6,1	5,2	4	2,6	1,1											Caudal m³/h	
DRT PRO 2000 T	3		19,8	19	17,9	16,5	14,8	12,4	9,6	5,8	1,1									
DRT PRO 3000 T	5					19,4	18,6	17,5	16,2	14,7	12,9	10,5	7	1,1						
DRT PRO 5000 T	7,5							29,5	27,2	25	22,37	18,8	13,7	5						
DRT PRO 7500 T	10												30	28	25,9	23,3	20,1	16	11	5

MODELOS	Descarga	Tensión (V)	Polos	Velocidad Rpm	Consumo (A)	Capacitor (µf)	Caudal máx (m³/h)	Altura máx. (m)	Nivel mín. agua uso continuo	
									Sin anclaje	Con anclaje
DRT PRO 1000 M	1 1/4"	220V - 50Hz	2	2820	6,6	13	7,8	20,5	498	460
DRT PRO 1000 T	1 1/4"	3x380V - 50Hz	2	2820	2,4	---	7,8	20,5	473	435
DRT PRO 2000 T	2"	3x380V - 50Hz	2	2880	5,6	---	19,8	25	521	553
DRT PRO 3000 T	2"	3x380V - 50Hz	2	2850	8,2	---	19,8	31,5	541	573
DRT PRO 5000 T	2"	3x380V - 50Hz	2	2890	11,7	---	33	33	612	627
DRT PRO 7500 T	2"	3x380V - 50Hz	2	2900	15,7	---	33	46	612	627

MOTORARG S.A. se reserva el derecho a cambiar y/o modificar los valores del presente folleto sin previo aviso. Estos valores son orientativos.



Mariano 3489
Ezeiza
P1001BIF, BUENOS AIRES
Tel: 11 43677000
SRL

N° COTIZACIÓN

O
520.051.670

	Sres.: 911 Dirección: Dpto. de Contabilidad Calle 1000 Argentina Teléfono: +54 11 43677000 CUIT: 20-00000000-0	FECHA
	De nuestra consideración: Por la presente hacemos llegar a ustedes la cotización solicitada. Los precios están expresados en Peso Argentino. (Precios y condiciones válido hasta el 01/04/2025)	18/03/2025

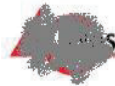
Artículo	Descripción	Cantidad Unidades	Precio Unitario	Importe	Tipo de IVA
SK1000AIPL	Skimmer con Flotadores Rebatibles de Acero Inoxidable	1	\$8.285.276,04	\$8.285.276,04	IVA 21%
CU1006C2	Tanque IBC de 1000 litros con tapa cerrada	1	\$592.435,20	\$592.435,20	IVA 21%
					
EPL4100	Plataforma de contención ECOPLATFORM para 4 Tanques IBC - 2660 x 2660 x 500h mm	1	\$10.511.948,62	\$10.511.948,62	IVA 21%
					



PRESUPUESTO

CLIENTE :

Fecha : 27/3/2025
Nombre: Atte.- Nicolas



ISO 9001
BUREAU VERITAS
Certification



Forma de Pago : 30 dias f/f Tipo de Cambio dólar Billete del Banco Nacion

Plazo de entrega : 15 días hábiles aprox

Forma de entrega : ~~Entrega en el cliente, desde el Cliente, en su propia planta~~

Cant	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT	TOTAL
1	Tanque Cilindrico Vertical de 1000 Lts Ø1200 mm	USD 417,00	USD 417,00
1	Tanque cilindrico vertical de 10.000 Lts Ø2500 mm	USD 1.865,00	USD 1.865,00
1	Tapa y oring de 500 mm		
1	Codo para venteo de Ø 2" (ventilacion)		
1	Cupla de polietileno de 1"½ de descarga bsp hembra		
	Color : Natural translucido		
	Uso : Agua salina		

SUBTOTAL	USD 2.282,00
IVA del 21%	21%
IVA	USD 479,22
TOTAL	USD 2.761,22

De: PUB:Rodrigo Gastelu <aerotan@aerotan.com.ar>
Enviado el: lunes, 17 de marzo de 2025 9:08
Para: HOLOVESKI Nicolás
Asunto: RE: Consulta desde Aerotan.com.ar

Attention: This email was sent from someone outside the Company. Do not click links or open attachments unless you recognize the sender and know the content is safe.

Buen día Nicolas,

Esperemos poder ayudarte con el trabajo final! Te paso valores orientativos que se aproximan a los valores de mercado.

Tanque 1: USD720.000 + IVA
Tanque 2: USD690.000 + IVA
Tanque 3: USD450.000 + IVA

Suerte en tu presentación.

Saludos

Rodrigo Gastelu
www.aerotan.com.ar

De: PUB:Fernando pereyra <fernando.pefow@gmail.com>
Enviado el: lunes, 10 de marzo de 2025 15:09
Para: HOLOVESKI Nicolás
CC: Maximiliano.esposito@pefowsa.com.ar
Asunto: Re: Contacto Web – Nacional

Buenas tardes Nicolás

Hay muchas variantes para el tipo de equipamientos que estás solicitando.
Te paso cotización del formato de reguladores más chico que fabricamos.
Este conjunto puede cubrir un caudal de salida de producto de hasta 40 m3/h.

Código M1-722 / S-25
u\$d 3.800

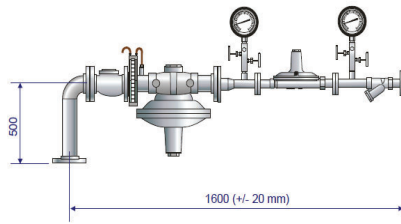
Adjunto una hoja de datos del equipo cotizado.

Saludos.

Fernando Pereyra
Departamento de ventas
Pefow Equipamientos S.Á.
Tres Arroyos 6281 - Wilde - Pcia. Bs. As.
Tel: (011) 4207-7870
e-mail: fernando.pereyra@pefowsa.com.ar
<https://linktr.ee/pefow.equipamientos>
<http://youtu.be/EEZBYEi7jdo>.

MODULO REGULADOR

MODULO M1-722-S25-G



Datos		TK-XX	
Tag			
Modelo		M1-S	
Código		M1-722-S25-G	
Materiales			
1	Caños	ACERO AL CARBONO	
2	Bridas	ACERO AL CARBONO	
3	Filtro "Y"	ACERO AL CARBONO	
4	Válvulas de bloqueo y purga	ACERO AL CARBONO	
5	Manómetros cuadrante Ø 4"	AISI 304 con baño de glicerina	
6	Manómetro de c. agua 0-200 mm	ALUMINIO	
Condiciones de operación			
7	Presión de entrada	5	Kg/cm2g
8	Presión Máx. en TK	+ 50	mm c. agua
9	Presión Min. en TK	+ 15	mm c. agua
10	Temperatura	Ambiente	°C
11	Gas de Blanketing	GAS NATURAL	
12	Caudal solicitado		m3/hora
13	Caudal disponible	22	m3/hora
Conexiones			
14	Conexión de entrada	Ø ½"	ANSI B 16,5 # 150 RF
15	Conexión de salida	Ø 1"	ANSI B 16,5 # 150 RF

PEFOW EQUIPAMIENTOS S.A.

