



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería en Medioambiente

Ingeniería Ambiental

**Evaluación técnica y económica de un sistema de reúso y
tratamiento de aguas servidas provenientes de PTAS Loma Larga
ESVAL S.A.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: Hernán Nazer Blaset

PROFESORA GUÍA: Romina Álvarez Alarcón

VALPARAÍSO, 2022

Resumen

El escenario de escasez hídrica al cual se ha enfrentado Chile en la última década ha generado numerosos problemas, en donde la falta de precipitaciones, una reducción en el agua de embalses y una mala gestión del recurso, entre otras cosas, ha obligado al estado a tomar medidas extremas como son el racionamiento del agua o la declaración de zonas de escasez hídrica en donde gran parte de la población ha sido afectada. Se ha comenzado a idear planes de emergencia para aumentar la disponibilidad y uso eficiente del recurso, profesionales, estudiantes y tesis han comenzado a idear fórmulas para lograr aumentar la oferta de agua y así disminuir el estrés hídrico que sufren las cuencas. El presente trabajo de título busca precisamente aportar en esto mediante la evaluación de un sistema de tratamiento de aguas servidas, las cuales son vertidas en una planta de emisario submarino, con el objetivo de no perder el recurso hídrico vertiéndolo al mar, al producir agua con las condiciones requeridas para satisfacer parte de la demanda que requieren los cultivos de uva en la comuna de Casablanca. Para esto se dispuso a identificar el caudal de agua entrante a la planta de tratamiento Loma Larga, el cual fue seleccionado en función las necesidades hídricas por parte de los viñedos y limitaciones de espacio (por parte de la planta) obteniendo un caudal de 300 L/s. Luego se realizó una evaluación de cuatro tecnologías de tratamiento terciario bajo criterios técnicos, económicos, ambientales y normativos, describiendo sus características, ventajas y desventajas, área de uso y requerimientos de calidad establecidos por la NCh1333/75, en donde se determinó que la mejor opción era una membrana de ultrafiltración, definiendo el sistema como un biorreactor de membrana sumergido (MBR) que combina un tratamiento secundario y con un filtro de membrana abriendo paso a un tratamiento terciario. Con la tecnología seleccionada y la caracterización de las aguas servidas obtenida se dispuso a realizar el diseño del sistema MBR, el sistema comienza con un pretratamiento mediante rejillas de desbaste y mecanizadas, junto a unidades desgrasadora y desarenadora para luego pasar al reactor MBR de 2000 m³, que permite tratar 300 L/s de aguas servidas, en donde se elimina el 96,15% de la DBO, también permite retener prácticamente el 100% de los sólidos suspendidos, además de poseer una eficiencia de producción del 99,2%, dejando el agua apta para el riego bajo la Norma NCh1333/78. Este proyecto tendría un costo neto de inversión estimado en 87 mil UF y costos de operación y mantención evaluados en 234 mil UF al año.

Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer de todo corazón a mi Madre, que por su esfuerzo he llegado hasta aquí. También agradecer a mi Padre, que sin su ayuda el recorrido hasta hoy hubiese sido aún más difícil. Agradezco los profesores que, si lograron enriquecer mi conocimiento y apoyaron en el transcurso de mi carrera, a mi profesora guía Romina Álvarez Alarcón por estar siempre presente cuando requería de su apoyo. A aquellos externos a la universidad que brindaron soluciones alternativas y opiniones de como abordar mi trabajo de título. Por último, deseo agradecer a toda mi familia, a mis hermanos, amigos de la carrera, amigos de la infancia, que fueron los que me acompañaron en este proceso universitario.

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Situación Global crisis hídrica.....	1
1.2. Situación Nacional crisis hídrica	1
1.3. Comuna de Casablanca	2
1.3.1. Vocación vinífera	3
1.3.2. Situación hídrica en la comuna de Casablanca.....	3
1.4. Servicio Sanitario en Chile.....	4
1.5 Servicio Sanitario en la Región de Valparaíso	5
1.6. Aguas Servidas y sus características	5
1.7. Sistemas de Tratamiento de aguas servidas	7
1.7.1. Pretratamiento	7
1.7.2. Tratamiento primario	8
1.7.3. Tratamiento secundario o biológicos.....	8
1.7.4. Tratamiento avanzado o terciario.....	8
1.8. Tecnologías de tratamiento de aguas servidas.....	8
1.8.1. Tecnologías de Membrana	9
1.9. Planta Loma Larga	14
1.10. Reúso de las aguas servidas tratadas	15
1.11. Requerimientos de calidad de agua para riego.....	15
1.12. Normativa aplicable al reúso de aguas	17
2. Problema	18
3. Objetivos.....	19
3.1. Objetivo general	19
3.2. Objetivos específicos.....	19
4. Metodología.....	20
4.1. Caracterización teórica del agua entrante a PTAS Loma Larga y estimación de la demanda por parte de los cultivos.....	20
4.2. Evaluación y selección del sistema de tratamiento.....	21
4.3. Diseño técnico conceptual para el sistema de reutilización y tratamiento de aguas servidas PTAS Loma Larga.....	23
4.3.1. Diagrama de bloques.....	23
4.3.2. Cálculo de diseño conceptual sistema de reutilización.....	23
4.3.3. Selección de los equipos.....	23
4.4. Estimación de los costos de implementación.....	23

4.4.1. Costos de inversión (CAPEX).....	23
4.4.2. Costos Operacionales (OPEX).....	24
5. Resultados.....	25
5.1. Caracterización teórica del agua entrante a PTAS Loma Larga y estimación de la demanda por parte de los cultivos.....	25
5.1.1. Caracterización de las aguas servidas domésticas mediante análisis bibliográfico.	25
5.1.2. Estimación de la demanda como consumo de agua para el riego y determinación de la oferta.	26
5.2. Evaluación y selección del sistema de tratamiento terciario.	29
5.2.1. Tecnologías de filtración por membranas.....	29
5.2.2. Planta de Tratamientos Loma Larga ESVAL S.A.	32
5.2.3. Norma Chilena 1333/78	33
5.2.4. Evaluación y selección de tratamiento terciario.....	34
5.3. Diseño técnico conceptual para el sistema de tratamiento de las aguas servidas PTAS Loma Larga.....	36
5.3.1. Consideraciones iniciales de diseño.	38
5.3.2. Elección de la membrana.....	39
5.3.3 Procedimiento de diseño de un biorreactor de membrana.	40
5.4 Estimación de los costos de implementación y operación.	55
5.4.1 Costes de Inversión	55
5.4.2. Costos de Operación y Mantenimiento	56
6. Discusión.....	58
7. Conclusión.....	61
8. Bibliografía.....	63
9. Anexos	67

Índice de Figuras

Figura 1.1. Localización de la comuna, en contexto de la región de Valparaíso (Municipalidad de Casablanca, 2022).	3
Figura 1.2. Características de las aguas servidas (GIBA, 2022)	6
Figura 1.3. Diagrama de bloques general de los tratamientos de aguas servidas (Cristancho & Noy, 2016).....	7
Figura 1.4. Proceso de un sistema de lodos activados (Valdivielso, 2022).....	9
Figura 1.5. Diagrama conceptual de un sistema de separación por membrana (P1>P2) (González, 2007).	10
Figura 1.6. Filtración tangencial (González, 2007).	10
Figura 1.7. Filtración en línea (González, 2007).....	11
Figura 1.8. Membrana de tipo espiral (González, 2007).....	12
Figura 1.9. Membrana de tipo fibra hueca (González, 2007).....	13
Figura 1.10. Membrana tubular (González, 2007).....	13
Figura 1.11. Membrana Placa Plana (González, 2007).....	13
Figura 5.1. Tamaño de poro de los distintos tipos de filtración (Carrera, 2021).	32
Figura 5.2. Área aproximada de PTAS Loma Larga ESVAL S.A. (Google Earth, 2022)...32	
Figura 5.3. Esquema comparativo de impacto del sistema MBR en una PTAS convencional. (Carrera, 2021).....	35
Figura 5.4. Diagrama de bloques sistema de tratamiento.	36
Figura 5.5. Diagrama conceptual del sistema de reutilización de aguas servidas domésticas	37
Figura 5.6. Esquema de un biorreactor de membrana sumergida (González, 2007)	37
Figura 5.7. Diagrama de flujo de un MBR sumergido (Alcarria, 2005).....	38
Figura 5.8. Membrana marca Vocee (Alibaba.com, 2022).	39
Figura 5.9. Secuencia de formación de un reactor de membrana (Alcarria, 2005).	40
Figura 5.10. Dimensiones de un módulo y un cassette.	42
Figura 5.11. Dimensiones del tanque utilizado y área total de cassettes.....	43

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Cobertura de agua potable áreas concesionadas por region (SISS, 2021).	4
Tabla 1.2. Cobertura de alcantarillado y tratamiento de aguas servidas áreas concesionadas por region (SISS, 2021).....	5
Tabla 1.3. Concentraciones típicas encontradas en aguas servidas de algunos parámetros (GIBA, 2022).....	6
Tabla 1.4 diferencias de los diferentes tipos de módulos (Alcarria, 2005)	14
Tabla 4.1. Criterios de selección de sistema de tratamiento terciario (elaboración propia).	21
Tabla 4.2. puntuación establecida para criterios de evaluación (elaboración propia).	22
Tabla 5.1. Parámetros presentes en aguas servidas domésticas (adaptado de Metcalf & Eddy, 2003).	25
Tabla 5.2. Concentraciones medidas en PTAS Loma Larga adaptado junto a datos bibliográficos (SISS, 2022. Metcalf & Eddy, 2003)	26
Tabla 5.3. Catastro de vides (ha) – Región de Valparaíso (ODEPA, 2021).....	27
Tabla 5.4. Caudal de entrada a PTAS Loma Larga año 2010 y proyección año 2020 (SISS, 2010)	28
Tabla 5.5. Ventajas y desventajas de una microfiltración (Carbotecnia, 2022).....	29
Tabla 5.6. Ventajas y desventajas de una ultrafiltración (Fibras & Normas S.A, 2022)	30
Tabla 5.7. Ventajas y desventajas de una nanofiltración (Fibras & Normas S.A, 2022) ...	30
Tabla 5.8. Ventajas y desventajas de una osmosis inversa (Waterstation, 2022)	31
Tabla 5.9. Concentraciones máximas permitidas adaptado de la NCh1333/75.....	33
Tabla 5.10. Restricciones de uso de agua para riego según SAR y CE (U. de Chile, 2005).	34
Tabla 5.11. Clasificación de agua para riego según su salinidad NCh1333/75.	34
Tabla 5.12. Resultados de evaluación tecnologías de membrana bajo distintos aspectos.	34
Tabla 5.13. Definición de símbolos utilizados en la Figura 5.8 (Alcarria, 2005).....	38
Tabla 5.14. Dimensiones de módulo de membrana y cassettes (Alibaba.com, 2022).	40
Tabla 5.15. Parámetros de diseño de un MBR.....	41
Tabla 5.16. Iteración valores de diseño, potencia de aireación verano.	50
Tabla 5.17. Iteración valores de diseño, parámetros biocinéticos, verano.....	50
Tabla 5.18. Valores de coeficiente K_{T3} (González, 2006)	53
Tabla 5.19. Costo neto del reactor biológico	55
Tabla 5.20. Costo neto unidad de membrana	56
Tabla 5.21. Costes de capital directos e indirectos	56
Tabla 5.22. Costos por consumo eléctrico anual.....	56
Tabla 5.23. Costos por remplazo de membrana	Error! Bookmark not defined.

1. Introducción

El siguiente trabajo presenta el desarrollo de la evaluación técnica y económica de un sistema de reúso de aguas servidas tratadas de la planta Loma larga de ESVAL, con el objetivo de destinarlas al sector agrícola en la comuna de Casablanca. El estudio en cuestión podrá ser utilizado para posteriores evaluaciones de proyectos de este tipo y se encuentra dentro del marco del trabajo para optar al título de Ingeniero Ambiental.

1.1. Situación Global crisis hídrica

El agua es un elemento trascendental para el desarrollo de la vida. Si bien el planeta está compuesto por un 70% de agua, este recurso no se encuentra distribuido de manera uniforme, preocupando a los gobiernos de todo el mundo, ya que tan solo el 3,5% es agua dulce y el 0,025% es potable (BBVA, 2021). La situación mundial del agua empeora día a día debido al cambio climático, el crecimiento de la población y otros factores.

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020 “El cambio climático afectará la disponibilidad, calidad y cantidad de agua para las necesidades humanas básicas, poniendo en peligro el disfrute efectivo del derecho humano al agua y saneamiento de, potencialmente, miles de millones de personas”. Los cambios hidrológicos, inducidos por el cambio climático, implican mayores riesgos para la sociedad, no solo alterando los procesos naturales hidrometeorológicos, sino también por riesgos a la producción de energía, alimentación, desarrollo económico y desigualdad social, entre otros (UNESCO, 2020).

Por otra parte, el rápido crecimiento de la población en los últimos 30 años. La población mundial ha aumentado de 4 mil millones a 7 mil millones de personas en solo 30 años y se espera que la población mundial aumente en 2.000 millones de personas en los próximos 30 años (Naciones Unidas, 2022). Esto significa que hay más personas que nunca las cuales necesitan y necesitarán recursos de agua limpia para sobrevivir y vivir una vida saludable.

Existen muchas razones que afectan en la disponibilidad de agua a nivel global, por lo que es fundamental buscar alternativas que permitan adaptarse a estos acontecimientos.

1.2. Situación Nacional crisis hídrica

Chile y principalmente la zona central del país, hace más de una década que se enfrentan a una mega sequía. Esto ocurrido por la falta permanente de precipitaciones, las altas temperaturas, constantes olas de calor, los efectos del cambio climático y efectos antrópicos, los cuales han afectado a las comunidades y ecosistemas, provocando escasez hídrica en muchas localidades del país, llegando incluso al punto de quedar prácticamente sin agua (Núñez, 2022). Según Ulrike Broschek líder de Escenarios Hídricos 2030, en la entrevista por parte del diario Concepción el 21 de marzo del 2021 “Un 76% de la superficie chilena está afectada por sequía, desertificación y suelo degradado”; mencionando que la totalidad de glaciares que han estudiado están en retroceso por el aumento de la temperatura, la cual se espera que se eleve entre 1 y 2,5

°C; que los 110 acuíferos del país se encuentran con una demanda superior a su recarga; que los caudales de agua han disminuido entre un 13% y 37% los últimos 30 años. Cifras provenientes de distintas fuentes como son la Dirección General de Agua o Sud-Austral (Diario Concepción, 2021). Existe un déficit de precipitaciones entre un 60% y un 80% en zonas centro norte y centro sur del país. Esta situación ha obligado al Ministerio de Obras Públicas a firmar 21 decretos de escasez hídrica que afectan a 184 de las 364 comunas del país lo que equivale a un 53,2% de la población, medida la cual permite redistribuir las aguas de los cauces para priorizar el consumo humano y autorizar la extracción de agua, mientras dure la emergencia (sin contar con los respectivos derechos). A su vez se ha declarado emergencia agrícola por déficit hídrico en 226 comunas por parte del Ministerio de agricultura, el cual permite entregar apoyo a aquellas zonas del país afectadas por esta baja disponibilidad del recurso (Gob.cl, 2022). Además, en distintas zonas del país han tenido que realizar medidas extremas como lo es el racionamiento de agua, donde Ulrike Broschek añade que “El racionamiento de agua no es algo nuevo, ya se está dando en varios lados, en distintas localidades de Coquimbo, Valparaíso y Maipo que son las zonas más afectadas por sequía, así como también ha aumentado mucho la entrega de agua en camiones aljibes en zonas rurales”, esto por la escasez hídrica y la poca ayuda que reciben algunas comunidades debido al inadecuado modelo de gestión del agua que todavía domina al país (Núñez, 2022).

En este contexto y como medida para afrontar las problemáticas y desafíos en el ámbito de la sequía, según lo descrito en la página oficial para obtener información del Gobierno de Chile (Gob.cl, 2022), se convocó en el año 2019 a una Mesa del Agua con el objetivo de trabajar en la definición de una estrategia hídrica basada en tres pilares:

- Resguardar el abastecimiento de agua, priorizando siempre el consumo humano.
- Asegurar la calidad del agua y proteger los ecosistemas.
- Modernización del marco legal e institucional.

En el año 2021 se creó un Plan de Emergencia Contra la sequía (Plan Sequia), el cual propone aumentar la disponibilidad de agua y mejorar la eficiencia en su uso, con el objetivo de asegurar el abastecimiento para el consumo humano y la producción de alimentos. Este plan este compuesto de cuatro ejes en donde se describen los lineamientos a seguir, los cuales son:

- Uso de agua desalada para suministrarla a la población con mayor escasez
- Tecnificación de riego para la producción de alimentos.
- Abastecer de agua potable a localidades rurales.
- Uso eficiente en ciudades.

1.3. Comuna de Casablanca

La comuna de Casablanca se ubica dentro de la región de Valparaíso, al sureste de la provincia de Valparaíso. Esta limita al norte con la comuna de Valparaíso y Quilpué, al sur con las comunas de El Quisco, Algarrobo y el Océano Pacífico. Santiago se encuentra ubicado a 68 km al noreste de esta comuna. La vía de acceso más importante a la comuna son la Ruta 68 (Santiago – Valparaíso) y la Ruta F-90 (Casablanca – Algarrobo) (Municipalidad Casablanca, 2022).



Figura 1.1. Localización de la comuna, en contexto de la región de Valparaíso (Municipalidad de Casablanca, 2022).

1.3.1. Vocación vinífera

La comuna de Casablanca ha alcanzado renombre mundial por su gran ruta del vino. El Valle de Casablanca se ha convertido en uno de los motores tanto del turismo como de la industria vitivinícola nacional. Ya que en esta zona se dan las condiciones ideales para el cultivo de variedades tintas, como Pinot Noir, Syrah y Carmenere, y de variedades blancas, como Sauvignon Blanc y Chardonnay (FCH, 2016). Esto comenzó en la década de 1970, con el descubrimiento de grandes acuíferos subterráneos, sumando el gran potencial de sus tierras y de su clima para la producción de uvas, generando un desarrollo explosivo de una industria vitivinícola que transformo el paisaje social y natural del valle, llegando incluso a ocupar laderas de las serranías cordilleranas (Conaf, 2022). La vocación vinífera que posee la comuna de Casablanca ha generado gran cantidad de hectáreas cultivadas por Vid. Estas son producidas por diversas bodegas y viñedos, siendo los más populares Veramonte, Casas del Bosque, Viña Catrala, Viña House, entre otras.

1.3.2. Situación hídrica en la comuna de Casablanca.

Según Fundación Chile (2016), la comuna es la que tiene mayor consumo hídrico de la provincia, teniendo una demanda total de 2,79 m³/s, la cual casi en su totalidad (90%) corresponde al sector agrícola. Si bien el desarrollo de este sector ha permitido tener mejores tecnologías para un riego más eficiente que en otras provincias agrícolas, su vocación vinífera genera gran cantidad de hectáreas cultivadas con viñedos, siendo especies con un alto consumo de agua (3.000 m³/ Ha aprox), representado cerca del 50% del consumo comunal. Es por esto, que el sobre consumo de agua sería uno de los problemas actuales, y se puede evidenciar ya que tres embalses se encuentran secos desde el 2010.

1.4. Servicio Sanitario en Chile

Los servicios sanitarios de agua potable, recolección y saneamiento de las aguas servidas, constituyen a un servicio público, ya que están dirigidos a la satisfacción de necesidades que interesan a toda la comunidad y que deben entregarse de manera regular, continua e igualitaria. Por su naturaleza de ser un servicio público, está sometido a un régimen de derecho público, lo que determina que se rigen por el principio de legalidad y de responsabilidad en dar cumplimiento de las obligaciones y la ejecución de los derechos propios, además de estar sujeto a controles de actuación por parte de la autoridad. Lo anterior está establecido en la ley general de servicios sanitarios en su artículo 1° numeral 1° donde considera a los servicios sanitarios que están destinados a producir y distribuir agua potable, recolectar y disponer aguas servidas, como servicios públicos. Lo cual se ve reforzado en el artículo 5° de la misma ley, donde se definen cada uno de los servicios sanitarios como públicos, además de establecer en el artículo 7° que su ejecución será realizada por una concesión. El régimen concesionario de los servicios públicos es una fórmula ideada por el legislador que permite a operadores públicos o privados, a mantener la titularidad sobre esta prestación por un tiempo indefinido, a menos que ocurra una causa legal. Por último, es el Estado el encargado de velar por el cumplimiento del marco regulatorio que rige a estas concesiones, tomando un rol regulador, fiscalizador y sancionando en su caso, a través de una superintendencia (SISS) (Peralta, 2020). Esta Institución ha elaborado informes anuales de cobertura sanitaria para informar las estadísticas básicas referidas a número de clientes y coberturas de los servicios sanitarios de Agua Potable, Alcantarillado y Tratamiento de aguas servidas prestados por las Empresas Concesionarias en sus áreas de concesión urbanas, en donde indican que para el año 2021 la cobertura de agua potable fue de 99,94%, de alcantarillado de un 97,4% y la de tratamiento de aguas servidas de 99,98%, lo que se detalla en la Tabla 1.1 y 1.2 (SISS, 2021). En cuanto al saneamiento en zonas rurales se estima que la cobertura de alcantarillado en el mundo rural no supera el 25% al año 2018 (MOP,2020). Sin embargo, el 6 de noviembre del 2020 entro en vigencia la nueva ley de Servicios Sanitario-Rurales donde sus objetivos son Proveer una institucionalidad y normativa jurídica propia del sector de agua potable y saneamiento rural e Incorporar el Saneamiento Rural a través de esta institucionalidad con un referente técnico competente (SISS, 2022).

Tabla 1.1. Cobertura de agua potable áreas concesionadas por Región (SISS, 2021).

Región	Población estimada dentro del TO	Total de inmuebles residenciales	Clientes residenciales de agua potable	Población abastecida AP dentro del TO	Cobertura agua potable dentro del TO
Arica y Parinacota	221.990	62.713	62.713	221.990	100,0%
Tarapacá	353.373	97.451	97.451	353.373	100,0%
Antofagasta	623.971	175.068	175.068	623.971	100,0%
Atacama	255.697	90.052	90.052	255.697	100,0%
Coquimbo	619.421	235.288	235.180	619.129	100,0%
Valparaíso	1.600.075	659.706	655.961	1.591.921	99,4%
Metropolitana	7.683.623	2.352.515	2.352.507	7.683.595	100,0%
O'Higgins	621.757	247.556	247.533	621.704	100,0%
Maule	696.239	265.882	265.788	695.966	100,0%
Ñuble	291.185	115.402	115.391	291.156	100,0%
Bío Bío	1.349.660	495.064	495.045	1.349.606	100,0%
Araucanía	570.184	223.249	223.188	570.108	100,0%
De los Ríos	244.097	81.499	81.497	244.091	100,0%
Los Lagos	566.758	194.269	194.258	566.736	100,0%
Aysén	79.159	26.357	26.357	79.159	100,0%
Magallanes	156.251	52.724	52.724	156.251	100,0%
Total país	15.933.440	5.374.795	5.370.713	15.924.452	99,94%

Tabla 1.2. Cobertura de alcantarillado y tratamiento de aguas servidas áreas concesionadas por Región (SISS, 2021).

Región	Total clientes residenciales de alcantarillado	Población saneada alcantarillado	Cobertura de alcantarillado dentro del TO	Inmuebles cuyas aguas servidas recolectadas reciben tratamiento	Población cuyas aguas servidas recolectadas recibe tratamiento	Cobertura tratamiento de aguas servidas dentro del TO
Arica y Parinacota	62.247	220.341	99,3%	62.247	220.341	100,0%
Tarapacá	94.380	347.659	96,8%	94.380	347.659	100,0%
Antofagasta	174.723	622.677	99,8%	174.723	622.677	100,0%
Atacama	87.674	249.487	97,4%	87.674	249.487	100,0%
Coquimbo	227.990	604.080	96,9%	227.990	604.080	100,0%
Valparaíso	602.255	1.496.600	91,3%	602.255	1.496.600	100,0%
Metropolitana	2.326.784	7.598.887	98,9%	2.326.711	7.598.815	100,0%
O'Higgins	220.293	562.451	89,0%	220.293	562.451	100,0%
Maule	257.511	680.239	96,9%	256.664	677.904	99,7%
Ñuble	110.474	279.798	95,7%	110.474	279.798	100,0%
Bío Bío	474.647	1.295.838	95,9%	474.647	1.295.838	100,0%
Araucanía	213.415	550.374	95,6%	213.415	550.374	100,0%
De los Ríos	77.308	231.830	94,9%	77.308	231.830	100,0%
Los Lagos	188.152	549.318	96,9%	188.152	549.318	100,0%
Aysén	25.495	76.837	96,7%	25.495	76.837	100,0%
Magallanes	52.038	154.214	98,7%	52.038	154.214	100,0%
Total país	5.195.386	15.520.630	97,41%	5.194.466	15.518.223	99,98%

1.5 Servicio Sanitario en la Región de Valparaíso

Esval S.A es una empresa perteneciente al sector sanitario de Chile, la cual opera bajo concesiones sanitarias, es decir, derechos para explotar los servicios de agua potable, tratamiento y saneamiento de aguas servidas en la Región de Valparaíso. Atienden a más de 5 millones de clientes beneficiando a 17 millones de personas en casi 400 localidades, de estos un 95% pertenece al segmento residencial, un 5% al rubro comercial y menos del 1% al rubro industrial. La actividad de las empresas del sector sanitario debe ser eficiente y quien se encarga de regular y fiscalizar para que esto ocurra, es la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), la cual garantiza a la población que la prestación de servicios en cuanto a calidad, cantidad y precio corresponda al ofrecido y que el agua una vez utilizada sea tratada y dispuesta de acuerdo con el desarrollo sustentable (ESVAL S.A, 2022).

1.6. Aguas Servidas y sus características

Corresponden a la combinación de descargas domésticas, industriales, actividades varias y aguas de lluvia, que se han utilizado por una comunidad y que contiene los materiales añadidos para su uso (Albarrán, 2017). Los principales tipos son:

- Aguas residuales urbanas: Las aguas residuales domésticas o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial.
- Aguas residuales domésticas: Las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.

- Aguas residuales industriales: Todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.

En su conjunto, las aguas servidas se componen de un 99% de agua y un 1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos. Por lo general, son una mezcla de compleja de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, donde sus características están asociadas a sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Albarrán, 2017), tal como se muestra en la Figura 1.2 a continuación.

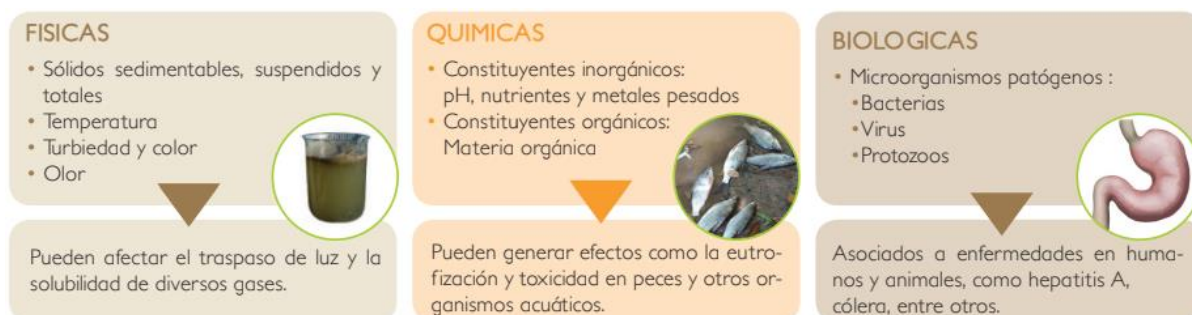


Figura 1.2. Características de las aguas servidas (GIBA, 2022)

Dentro de las características físicas se encuentran los Sólidos Suspendidos Totales (SST), que se componen de sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos sedimentables. Afectan negativamente ocasionando depósitos de lodos y demanda de oxígeno, generando condiciones anaerobias produciendo olores desagradables.

En cuanto a las características químicas se pueden distinguir los constituyentes orgánicos como grasas y aceites, hidratos de carbono o agentes tensoactivos, los cuales corresponderían a la materia orgánica, existiendo una fracción biodegradable y otra no biodegradable. Su concentración estará determinada por la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO). También se distinguen los constituyentes inorgánicos como es el pH (cuyos rangos varían comúnmente entre 6,5 y 8,5), y otros como la alcalinidad, nutrientes y metales pesados (Pire, 2019).

Las características biológicas de las aguas servidas son de gran importancia, ya que están relacionadas principalmente a la presencia de microorganismos capaces de provocar enfermedades a humanos y animales. En las aguas servidas se presentan bacterias que habitan generalmente en el intestino de animales y personas (bacterias entéricas) y su presencia se analiza mediante indicadores de coliformes (Albarrán, 2017). A continuación, en la Tabla 1.3 se presenta las concentraciones típicas encontradas en aguas servidas para algunos parámetros.

Tabla 1.3. Concentraciones típicas encontradas en aguas servidas de algunos parámetros (GIBA, 2022).

Parámetros		Tipo de asentamiento	
		Urbano	Rural
Físicos	SST (mg/L)	120 - 450	-
	SSV (mg/L)	95 - 315	-
Químicos	DBO ₅ (mg/L)	110 - 804	200 - 470
	NH ₄ ⁺ (mg/L)	12 - 50	6 - 66,3
Biológicos	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	1·10 ³ - 1,8·10 ⁸	1·10 ⁶ - 1·10 ¹⁰

1.7. Sistemas de Tratamiento de aguas servidas

Una vez utilizada el agua potable para fines domésticos, industriales u otro tipo de actividad, se transforma en aguas servidas. Las redes interiores de cada hogar o establecimiento descargan las aguas servidas en la última cámara de la propiedad, estas se conectan a su vez con la red pública del prestador del servicio, red de conducciones compuesta por colectores y otros elementos como cámaras de inspección, plantas elevadoras, etc. Por medio de esta red se transportan las aguas servidas hasta las plantas de tratamiento de aguas servidas (ESVAL S.A, 2022).

David Peralta en su libro “El Régimen de las Aguas Servidas Tratadas en Chile” menciona que “Un sistema de tratamiento de aguas residuales, es la organización programada y diseñada de procesos y sus elementos de soporte, formando un dispositivo provisorio o definitivo, fijo o portátil, a escala mayor o menor, destinado a tratar aguas residuales de una cierta calidad en su origen para alcanzar una calidad mejorada al final”. A continuación, en la Figura 1.3 se muestra el diagrama de bloques general de los tratamientos de aguas servidas

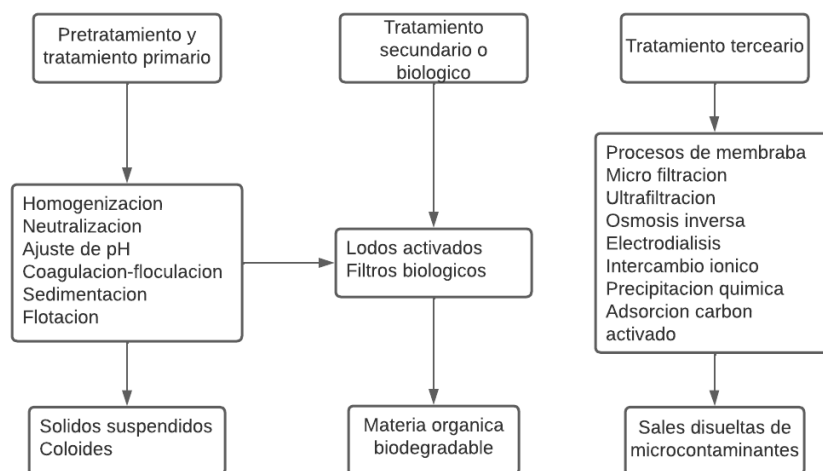


Figura 1.3. Diagrama de bloques general de los tratamientos de aguas servidas (Cristancho & Noy, 2016)

1.7.1. Pretratamiento

Los sistemas de tratamiento generalmente parten con una unidad de pretratamiento, el cual consiste generalmente en un sistema de desbaste donde se eliminan, en primera instancia, sólidos gruesos y finos, como papeles, palos, restos de comida, pelos, entre otros, que son transportados por el sistema de alcantarillado y que no son parte de las aguas servidas normales. Esto permite no solo limpiar las aguas servidas, sino que también permite que no sean afectadas las unidades y equipos posteriores y así asegurar su funcionamiento (Peralta, 2020).

1.7.2. Tratamiento primario

Este tipo de tratamiento se refiere a la remoción parcial de sólidos suspendidos, material orgánico y organismos patógenos, generalmente mediante sedimentación, flotación, coagulación, floculación y filtración, dando al agua condiciones favorables para el tratamiento secundario (Acuatecnica S.A.S, 2018)

1.7.3. Tratamiento secundario o biológicos

Los tratamientos secundarios son procesos biológicos, donde se retira la materia orgánica presente en las aguas por medio de la degradación por bacterias. que se mantienen en suspensión en el agua o bien se adhieren a un soporte sólido formando una capa de crecimiento. Luego de este proceso, el residuo o lodo es separado del agua por decantación. Estos corresponden a tratamientos aerobios, anaerobios, mixtos y facultativos. (Acuatecnica S.A.S, 2019). También existen sistemas que luego de ser pretratadas las aguas, son evacuadas mediante emisarios submarinos mar adentro, sin ocasionar daños al medio ambiente ni a las personas.

1.7.4. Tratamiento avanzado o terciario.

Finalmente se realiza el tratamiento terciario, cuya finalidad es eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como, por ejemplo, los nutrientes, fósforo y nitrógeno, son tratamientos específicos y costosos, que se usan cuando se requiere un efluente final de mayor calidad que la obtenida con los tratamientos convencionales. Antes de descargar las aguas residuales al ambiente se realiza un proceso de desinfección, y es para eliminar microorganismos que pueden representar un peligro para la salud. Esto se logra utilizando gas cloro, luz UV o aplicación de ozono (Troconis, 2010). Estos corresponden a procesos de membrana como microfiltración, ultrafiltración, osmosis inversa o también tratamientos iónicos.

1.8. Tecnologías de tratamiento de aguas servidas.

En Chile se cuenta con al menos 6 tipos de sistemas de tratamiento de distintas tecnologías, utilizadas para el tratamiento de las aguas servidas. Estos se pueden clasificar como convencionales, no convencionales y emisarios submarinos. Tecnologías convencionales, son aquellas que involucran mecanizado y se dividen a su vez en si el cultivo de biomasa se encuentra suspendido o adherido a un medio de soporte. Estas pueden ser Cultivo suspendido como Lodos Activados (en todas sus modalidades) abarcando el 59% del total de tecnologías, o sistemas de Lagunas Aireadas con un 20%. En cambio, los sistemas no convencionales no involucran mecanizado, pero requieren grandes extensiones de terreno. Estas pueden ser sistemas basados en lagunas de estabilización abarcando un 3% o en menor medida, biofiltros, lombrifiltros y humedales construidos. Finalmente, los emisarios submarinos, abarcando un 12%, disponen las aguas servidas de las zonas saneadas en un lugar del Océano, realizan el tratamiento mediante una autodepuración natural sin producir daño al ecosistema acuático y al litoral costero (SISS, 2022).

A continuación, se explicará de manera general la tecnología convencional más utilizada a nivel nacional.

- Lodos activados

Son sistemas de tratamiento secundarios que permiten degradar efectivamente la materia orgánica biodegradable presente en las aguas servidas y de los sólidos en suspensión. Es la tecnología más utilizada en el país y ha logrado cumplir en mayor medida con las exigencias de calidad establecidas en el Decreto MINSEGPRES N° 90/00. Se sustenta en un proceso de tratamiento de tipo aeróbico con cultivo suspendido en donde la materia orgánica que es aportada por las aguas servidas es reducida por la acción de bacterias heterótrofas (Albarrán, 2017). Está compuesto por: un reactor o tanque de aireación, en donde se encuentran los microorganismos suspendidos y aireados, fuente de aireación la cual permite airear y transferir el oxígeno al sistema, un tanque de sedimentación el cual permite separar los sólidos biológicos del agua tratada, un sistema de tuberías y bombas para recircular los sólidos biológicos al reactor, y finalmente una tubería de desecho “purga” donde se eliminan los lodos biológicos que quedan en exceso. Luego de los tratamientos iniciales el agua residual entra al reactor mezclándose con los microorganismos formando “licor mezclado”. A este se le suministra aire manteniendo condiciones aeróbicas al proceso. Luego el licor mezclado se introduce al sedimentador donde se separa el agua tratada de los microorganismos y productos de su degradación. Parte de la biomasa que fue separada es retornada al reactor para mantener una concentración deseada de microorganismos en el licor mezclado, mientras que el exceso es purgado (Valdivielso, 2022). A continuación, se presenta de manera grafica el proceso de un sistema de lodos activados.

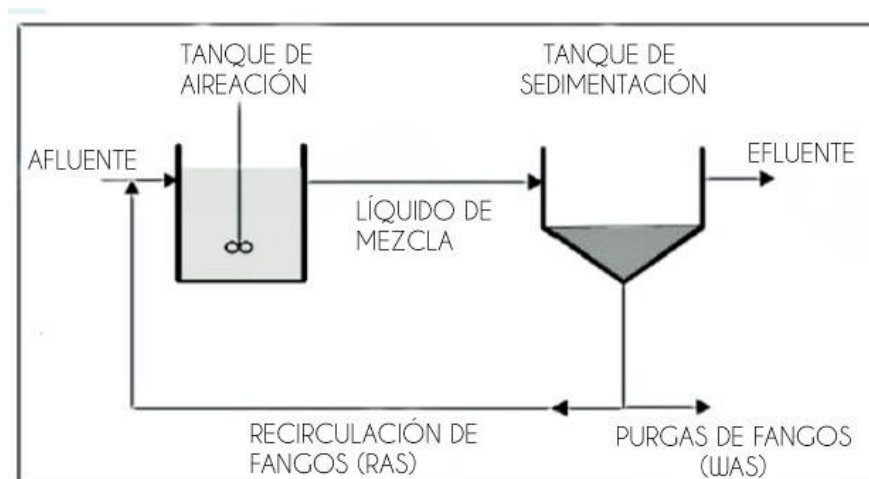


Figura 1.4. Proceso de un sistema de lodos activados (Valdivielso, 2022).

1.8.1. Tecnologías de Membrana

Una membrana puede considerarse como un material semipermeable a través del cual un tipo de sustancia puede pasar más fácilmente que otra, siendo así la base de un

proceso de separación. Este proceso selectivo permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente de alta calidad (Figura 1.5). Es un tratamiento que posee diversas aplicaciones, producción de alimentos, producción de agua potable y el caso de la ingeniería ambiental, entre otras actividades, se utiliza en el tratamiento de aguas residuales para su reutilización. Dicho tratamiento se ha visto el incremento de su uso anual, siendo una posible solución a la problemática mundial por escasez del agua (González, 2007).

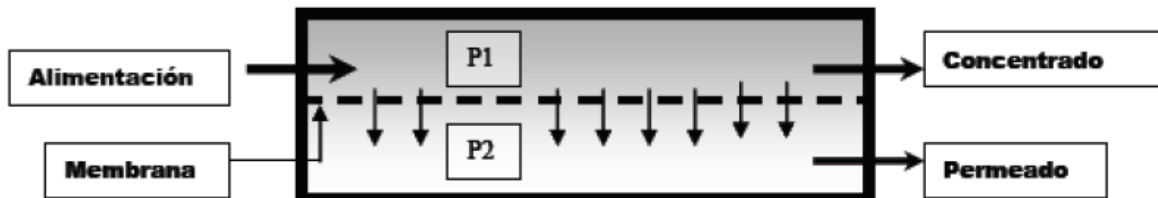


Figura 1.5. Diagrama conceptual de un sistema de separación por membrana ($P1 > P2$) (González, 2007).

Las formas de operar con las membranas se pueden dividir principalmente en filtración tangencial y filtración en línea, ambas se caracterizan por el paso de una corriente de alimentación que separa el concentrado del permeado pero que se diferencia en que la primera se hace circular tangencialmente quedando los contaminantes en la superficie evitando el ensuciamiento de la membrana y la segunda, tiene una alimentación del efluente en línea, reteniéndose las partículas en el interior de las membranas obteniendo una corriente depurada (González, 2007).

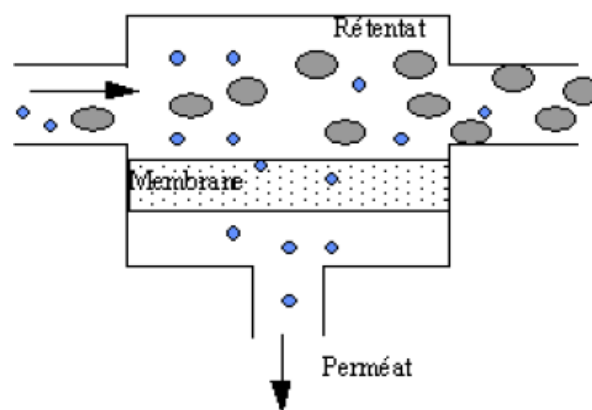


Figura 1.6. Filtración tangencial (González, 2007).

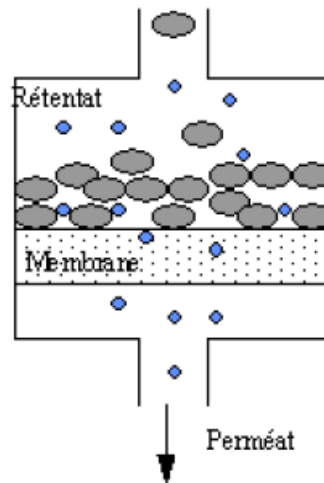


Figura 1.7. Filtración en línea (González, 2007).

Se van a distinguir dos tipos de membranas, unas para separar sólidos en suspensión y otras para separar sólidos disueltos. Las que permiten separar los sólidos suspendidos son las más básicas (porosidades más grandes presiones más bajas) correspondientes a microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF), en cambio las que eliminan sólidos disueltos son más complejas (porosidades muy pequeñas y altas presiones) correspondientes a nanofiltración (NF) y a osmosis inversa (OI).

- Microfiltración (MF).

La separación por membrana micrométrica es un sistema de tratamiento terciario, contiene poros de aproximadamente 0,03 a 10 μm , retiene pesos moleculares mayores a 100.000 dalton y usa presiones de influente relativamente bajas (100 a 400 kPa). Es capaz de remover material particulado como arena, arcilla, Giardia, Cryptosporidium, algas y algunas especies bacterianas. No retiene virus, pero tiene cierta capacidad de remoción de compuestos orgánicos reduciendo el potencial de descomposición de la membrana. Existen variados tipos de membrana como la espiral, tubular y de fibra capilar hueca, siendo las últimas dos, las más usadas porque permiten un lavado automático de la membrana (Leal, 2022).

- Ultrafiltración (UF).

La ultrafiltración es un sistema que puede ser utilizado como tratamiento terciario, contiene membranas de poro aproximadamente de 0,002 y 0,1 μm . Este tamaño de poro permite retener moléculas con pesos moleculares mayores a 10.000 dalton y se opera a presiones que oscilan entre 200 kPa y 700 kPa. Es capaz de impedir el paso de bacterias y la mayoría de los virus. La mayor parte del material coloidal, especies de alto peso molecular, material particulado, especies orgánicas e inorgánicas son retenidos en estas membranas. Las membranas para ultrafiltración se fabrican en forma tubular o de hojas planas con las que se elaboran los filtros (Leal, 2022).

- Nanofiltración (NF).

Las membranas de nanofiltración son un sistema que puede ser utilizado como tratamiento terciario, contiene membranas de poro menores a las anteriores, de 0,001 μm . Es capaz de retener moléculas de peso molecular mayor a 1.000 dalton. Trabaja a presiones sensiblemente mayores que las anteriores, oscilando entre los 600 kPa y 1.000 kPa. Pueden remover virtualmente todo tipo de bacterias, virus, quistes y material disuelto húmico. Debido a que remueve una gran cantidad de sustancias disueltas en el agua, como carbonatos y bicarbonatos, el agua toma características corrosivas una vez tratada por este proceso por lo que se le aplica adición de algún álcali para compensarlo (Leal, 2022).

- Osmosis inversa (OI).

Es un sistema que puede ser utilizado como tratamiento terciario, el cual se basa en el uso de membranas semipermeables que permite el paso de agua, mas no de iones disueltos. Su membrana posee poros menores a 1 nm. El agua es sometida a una alta presión que la obliga a pasar a través de la membrana, provocando que todas las sales disueltas permanezcan en una solución que se concentra de sales, motivo por el cual se le llama salmuera. Es capaz de remover cualquier contaminante orgánico o inorgánico del agua, sin embargo, posee altos costos y el manejo de la salmuera puede convertirse en un problema debido a que dichos contaminantes se concentran en ella (Leal, 2022).

En lo que se refiere a la configuración de las membranas, que es lo que define como están agrupadas y permite el conocer el comportamiento del fluido en el proceso de separación por filtración, existen cuatro tipos principales que corresponden a:

- Enrolladas en espiral

consiste en dos capas de membranas (situadas en un tejido colector de permeados), que envuelven a un desagüe de permeado en posición central,

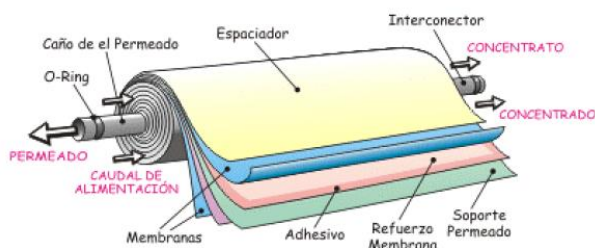


Figura 1.8. Membrana de tipo espiral (González, 2007).

- Fibra hueca

Consiste en una membrana compuesta por fibras que se encuentran reunidas en un haz, donde el flujo de alimentación tiene lugar por dentro de las fibras (configuración dentro hacia afuera).

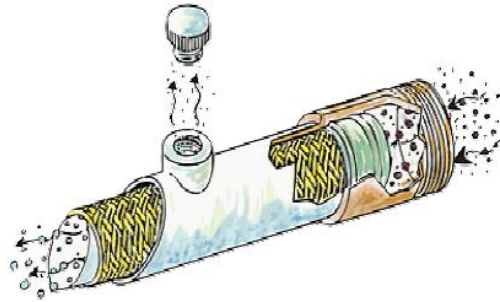


Figura 1.9. Membrana de tipo fibra hueca (González, 2007).

- Tubular

Membrana que no es autosuficiente y está situada dentro de un tubo hecho de un material especial que la sostiene.

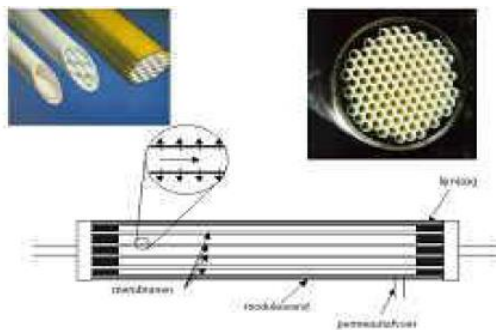


Figura 1.10. Membrana tubular (González, 2007).

- Placa plana.

Corresponde a membranas que se sitúan en dos placas adyacentes separadas entre sí por un separador.

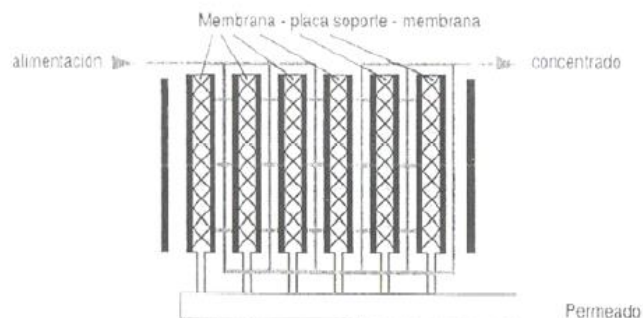


Figura 1.11. Membrana Placa Plana (González, 2007).

A continuación, se muestra en la Tabla 1.4 se muestran las diferencias de los diferentes tipos de módulos

Tabla 1.4 diferencias de los diferentes tipos de módulos (Alcarria, 2005)

CARACTERÍSTICA	PLACA PLANA	ARROLLAMIENTO ESPIRAL	TUBULAR	FIBRA HUECA
DENSIDAD COMPACTA	+	++	-	+++
DEMANDA DE ENERGÍA	+++	+	-	++
CAÍDA DE PRESIÓN	-	++	+++	++
VOLUMEN EXTRAÍDO	+	+	-	++
CALIDAD PRETRATAMIENTO	+	-	+++	++
ELIMINACIÓN SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	++	-	+++	+
COSTE DEL MÓDULO	+	+++	-	+++
FACILIDAD LIMPIEZA:				
In situ	+	-	++	-
de barrido	-	-	-	+++
(-) Clara desventaja (+++) Clara ventaja				

1.9. Planta Loma Larga

La planta de tratamiento Loma Larga de ESVAL corresponde a la planta de pretratamiento y Emisario submarino, la cual se encuentra emplazada en la quebrada Las Animas, en el primer sector de Playa Ancha en la comuna de Valparaíso, a unos 3,5 kilómetros del centro de la ciudad aproximadamente (Cornejo, 2017). Esta tiene por objetivo cubrir las necesidades de tratamiento de las aguas servidas domésticas de la ciudad de Valparaíso, primer sector Playa ancha y localidades de Villa Alemana, Quilpué, Viña del Mar y Reñaca, donde el efluente generado previo a su descarga por el emisario submarino al mar deberá cumplir con los límites máximos establecidos en el Decreto MINSEGPRES N° 90/00 (SISS, 2010).

Según la resolución del SISS, las operaciones unitarias que componen la planta de tratamiento de aguas servidas son:

- Rejas gruesas
- Medición de caudal al ingreso de la planta de pretratamiento
- Tratamiento preliminar: rejas mecanizadas de 7 mm de peso, tanque desarenador y desengrasador.
- Equipo de tratamiento de olores para los gases generados en el pretratamiento, el cual consta de un estanque reforzado de fibra de vidrio con lecho de carbón activado.

- Emisario submarino: diámetro 1,2 metros, largo 542 metros, material de polietileno de alta densidad (HDPE), Zona de Protección Litoral de 50 metros.

1.10. Reúso de las aguas servidas tratadas

El uso de las aguas servidas tratadas es un tema relativamente reciente en Chile. En el año 2012 el país alcanzó la cobertura prácticamente del 100% del tratamiento de estas aguas, esto más los efectos del cambio climático, entre otros, que han generado un escenario de escasez hídrica. Son de las principales razones por la cual se están buscando cómo incorporar esta nueva oferta en la demanda hídrica (AIDIS, 2016).

El reúso de aguas servidas tratadas consiste en la utilización del agua que es recuperada desde el efluente de un sistema de tratamiento de aguas servidas, con el fin de darles un uso distinto y beneficioso. Esta nueva oferta entra al sistema como fuente alternativa de agua para una variedad de aplicaciones. Según Albarrán (2017), el reúso se puede clasificar en “industrial, como aguas de enfriamiento, de calderas y del proceso industrial en sí; urbano, para riego de plazas, centros de golf, suministro para bomberos, sistemas de control de material particulado en la construcción, suministro para aseo y limpieza; potable indirecta, el que se da cuando se descarga efluente tratado a un cuerpo de agua que es aprovechado por otra planta de tratamiento; y potable directa, del cual solo existen registros en África”.

La experiencia internacional, muestra que algunos países ya están consumiendo estas aguas con resultados probados y exitosos, como es el caso de Estados Unidos y Arabia Saudita, que son los países con mayor volumen de aguas residuales reutilizadas. En tanto, si se considera el volumen per cápita, los que lideran son Qatar, Israel y Kuwait (FCH, 2016).

Chile en el año 2015, del 100% de las aguas tratadas en ESVAL, el 26% se realiza a través de algunas plantas de lodos activados, generando 33,3 MM m³/año de aguas servidas tratadas. Mientras que el 74%, corresponde al efluente descontaminado por las plantas de emisarios submarinos, generando 95,6 MM m³/año (AIDIS, 2016). Que según Fundación Chile (2020), si se reutilizara el total de las aguas que son vertidas por emisarios submarinos en Chile, podría contribuir en reducir en poco más del 10% la brecha hídrica que serían 82,6 m³/seg, según cifras informada por la DGA.

1.11. Requerimientos de calidad de agua para riego.

Según la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ing. Civil de la Universidad de Chile (2005), “La calidad físico y química del agua de riego está determinada no sólo por la cantidad total de sales presentes en el agua sino también por el tipo de sales, las que pueden permanecer en el suelo una vez que el agua se evapora o pueden ser captadas por los cultivos”. Donde Según Metcalf & Eddy (1998), “La presencia de sales afecta a el crecimiento de las plantas por 3 mecanismos: (1) efectos osmóticos, provocado por la concentración total de sales en el agua del suelo; (2) toxicidad de iones específicos, provocado por la concentración de un ion determinado; (3) dispersión de las partículas de suelo, provocado por la presencia importante de sodio y por una baja salinidad”. Por lo tanto, los principales problemas en suelos derivados de

una calidad deficiente de agua son la salinidad, toxicidad de iones específicos y disminución de la tasa de infiltración, además de problemas varios (pH, nutrientes, bacteriológicos, entre otros).

- Salinidad

Ocurrido por las sales solubles que son transportadas por el agua, donde su problema radica cuando estas se acumulan en la zona de la raíz. Los cultivos son afectados negativamente con una alta salinidad en el agua, reduciendo la disponibilidad de agua – suelo o perjudicando el crecimiento y el desarrollo de la raíz (U. de Chile, 2005). La energía necesaria que deben consumir las plantas para ajustar la concentración de sales en el interior del tejido vegetal (ajuste osmótico) para obtener agua del suelo, será mayor al existir altas concentraciones de sales en el suelo. Por lo tanto, existe menos energía disponible para el crecimiento de la planta. La salinidad se determina midiendo la conductividad eléctrica (mmho/cm o dS/m), la cual es a su vez una medida indirecta de su concentración de sólidos disueltos totales (mg/l) (Metcalf & Eddy, 1998).

- Tasa de infiltración

Altas concentraciones de sodio en el suelo son responsables de un deterioro de las condiciones físicas de este, formando incrustaciones disminuyendo la tasa de infiltración del agua, provocando acumulaciones de agua al reducirse la permeabilidad del suelo. Esta baja velocidad de infiltración puede provocar que no sea posible suministrar a los cultivos la cantidad de agua necesaria para el crecimiento óptimo (Metcalf & Eddy, 1998). Para predecir problemas de infiltración, se utiliza la tasa de adsorción de sodio (RAS o SAR), es un cálculo a partir de las concentraciones de sodio, magnesio y calcio que estima la tendencia del agua de propiciar la compactación y apelmazamiento del suelo, donde las concentraciones de cationes se expresan meq/l. Los iones divalentes como el calcio (Ca^{+2}) y Magnesio (Mg^{+2}) aportan a formar una consistencia estructural firme en el suelo, lo que significa una porosidad capaz de dar paso a la infiltración del agua de riego y a la aireación manteniendo un ambiente aerobio. Un agua de riego con una concentración alta con relación a la de calcio y magnesio intercambia estos iones por otros monovalentes de sodio lo que debilita la estructura microscópica del suelo (Microlab S.A, 2022).

$$SAR = \frac{Na}{\frac{\sqrt{Ca + Mg}}{2}}$$

A un valor determinado de la tasa de adsorción de sodio, la infiltración aumenta en el incremento de la salinidad, y decrece con el descenso de esta. Por lo tanto, al evaluar problemas de permeabilidad, el SAR se debe evaluar juntamente con el valor de la conductividad eléctrica del agua de riego (Metcalf & Eddy, 1998).

- Toxicidad de iones específicos

Las problemáticas de toxicidad son provocadas si ciertos iones del agua son captados por la planta y acumulados hasta alcanzar concentraciones suficientemente altas como para producir daño o reducción de rendimiento de los cultivos (U. de Chile, 2005). Según Metcalf & Eddy (1998), los iones presentes en el agua residual que provocan mayores problemas son el sodio, el cloro y el boro

1.12. Normativa aplicable al reúso de aguas

En temas de reúso Chile está lejos de países con mayor experiencia como Israel, Singapur, Estado Unidos y Australia, respecto a normativas que fomenten y establezcan estándares adecuados para su implementación, con un rol clave por parte del estado en la habilitación de proyectos. Si bien la normativa nacional actual no restringe el reúso en su totalidad, tampoco la fomenta, porque no hay una institucionalidad clara para los procesos de reutilización (FCH, 2016). Con respecto a si existe alguna definición normativa necesaria para implementar el reúso, Fundación Chile (2016) en su diagnóstico del potencial de reúso de aguas residuales en la región de Valparaíso comenta que “Desde la perspectiva del marco sanitario, esto es, la Ley General de Servicios Sanitarios, el reúso de las aguas residuales no constituye un objeto de la concesión y, en estricto rigor, no se relaciona con las actividades de su objeto. Por tal razón, no cuenta con un tratamiento de orden normativo, como tampoco se ha dado una interpretación respecto de ella. Las únicas disposiciones atingentes en el marco jurídico sectorial son las que definen el fenómeno jurídico que se produce por el abandono de las aguas residuales en los cursos de agua y la obligación que pesa sobre el prestador de indicar el punto de las descargas de esas aguas residuales en el curso receptor”.

Si bien, el año 2008 hubo un primer paso hacia esta temática, con la aprobación de la Ley 21.075 que regula la recolección, reutilización y disposición final de aguas grises, la definición de estos tipos de aguas excluye las aguas negras, por ende, queda fuera el usar aguas servidas domésticas tratadas. También está la Norma Chilena NCh3582 donde especifica los requerimientos de calidad del agua, muestreo y métodos de análisis para la reutilización de aguas residuales de origen doméstico en el riego de áreas verdes, sin incluir el riego de productos comestibles. (Sustentable S.A, 2020). Sin embargo, la Norma Chilena NCh1333 establece los requisitos de calidad del agua para diferentes usos, donde se encuentran los parámetros físicos, químicos y biológicos, para destinar las aguas para riego (NCh1333, 1978).

2. Problema

Desde el año 2010 es que Chile pasa por una mega sequía, la cual se extiende desde la región de Coquimbo hasta la región de la Araucanía y esta situación ha ido empeorando. Existe un déficit de precipitaciones entre un 60% y 80%, la acumulación de nieve a disminuido en un 85%, los principales embalses cuentan con solo un 34% de su capacidad, etc. Por lo que urge obtener nuevas fuentes para poder satisfacer la demanda hídrica, y la reutilización de aguas servidas, con su correspondiente tratamiento, es una de estas fuentes. Como se mencionó anteriormente en la región de Valparaíso del 100% de las aguas tratadas por Esval, el 26% se realiza a través de sistemas de lodos activados, generando 33,3 MM m³/año de aguas servidas tratadas, mientras que el 74%, corresponde al efluente descontaminado por las plantas de emisarios submarinos, generando 95,6 MM m³/año. En este contexto de buscar nuevas fuentes, según lo mencionado por la DGA, se podría disminuir la brecha hídrica nacional entre un 8% y un 10% si se recuperaran y reutilizaran las aguas que son vertidas por emisarios submarinos. Esta problemática se sostiene aún más, tomando en cuenta el Plan Sequía diseñado por el gobierno en enero del 2022, el cual busca aumentar la disponibilidad de agua y mejorar la eficiencia de su uso, con el objetivo de asegurar el abastecimiento para el consumo humano y la producción de alimentos. En uno de los lineamientos descritos en este plan de emergencia, menciona que se prohibirán las descargas de aguas residuales vertidas al mar de emisarios submarinos con tratamiento primario, lo que obliga a las empresas sanitarias realizar un tratamiento secundario como mínimo. En base a los antecedentes descritos, el presente trabajo busca generar esta alternativa. Producir agua con las condiciones adecuadas establecidas por la Norma chilena NCh1333/1978 y destinarlas a la agricultura. Se decidió por el sector agrícola, ya que este posee la mayor demanda del consumo de agua consuntiva, alcanzando un 72,3% del total. Además de poder satisfacer el sobreconsumo de agua por el cual pasa la comuna de Casablanca y así evitar seguir aumentando el estrés hídrico de la cuenca del Valle de Casablanca.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar técnica y económicamente un sistema de tratamiento de aguas servidas para reúso, provenientes de la planta Loma Larga, para destinarlas a la agricultura en la comuna de Casablanca.

3.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar las aguas servidas domésticas entrantes a PTAS Loma Larga mediante literatura y estimación de la demanda como consumo para riego.
2. Evaluar las diferentes tecnologías de tratamiento de aguas servidas bajo criterios técnicos, económicos, normativos y ambientales.
3. Desarrollar la ingeniería conceptual del sistema de reutilización de aguas servidas tratadas en PTAS Loma Larga.
4. Estimar los costos de implementación.

4. Metodología

Antes de todo, hay que señalar que las tecnologías a evaluar corresponderán a tecnologías que permitan el tratamiento avanzado, esto debido a las exigencias que posee la Norma Chilena NCh1333/1978 y por lo establecido en el Plan Sequía donde presentan que se requerirá obligatoriamente de un tratamiento secundario. Que en estos procesos se generan lodos, lo que implicará tener equipos necesarios para tratar la línea de lodos, sin embargo, estos se encuentran fuera de los alcances de evaluación y análisis técnico-económico referidos en este trabajo de título.

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos en este trabajo de título, se desarrollarán variadas actividades, las cuales estarán destinadas a la obtención de información bibliográfica y posterior evaluación de tecnologías bajo criterios ambientales, normativos, técnicos y económicos, finalizado con el desarrollo de un análisis técnico y económico para la implementación de un sistema de reúso y tratamiento de las aguas servidas provenientes de la Planta Loma larga, con la finalidad de destinarlas al riego de cultivos del sector agrícola en la Comuna de Casablanca. A continuación, se detalla la metodología realizar para el cumplimiento de cada objetivo

4.1. Caracterización teórica del agua entrante a PTAS Loma Larga y estimación de la demanda por parte de los cultivos

- Caracterización del agua.

Para esta sección se efectuó una revisión bibliográfica de diferentes libros y documentos relacionados a la ingeniería de aguas residuales. Además, se tuvo un contacto directo con la Super Intendencia de Servicios Sanitarios, esto con el fin de identificar los parámetros físicos y químicos, junto a las concentraciones típicas provenientes de las aguas servidas domésticas.

- Estimación de la demanda como consumo de agua para el riego.

Se realizará una estimación del consumo de agua que se requerirá para el riego, lo que determinará la demanda de agua. En primer lugar, se dispondrá a identificar cuanto es el consumo de agua que poseen los viñedos por hectárea mediante literatura. Luego utilizando los catastros realizados por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) se identificará el área que ha sido cultivada con vides en la comuna de Casablanca. Finalmente se realizará un cálculo relacionando el consumo de agua por hectárea de los viñedos y el área total que se establecerá para abastecer con el agua producida. A continuación, se presenta la ecuación para calcular el volumen de agua requerido por hectáreas cultivadas por vid:

$$Demanda = CVid * N^{\circ}ha$$

(Ec. 4.1)

Donde,

$CVid$: consumo de agua por viñedos en $m^3/año/ha$ para mantener su potencial productivo equivalente a 1 año.

$N^{\circ}ha$: corresponde a la cantidad de hectáreas (ha).

Obtenida la demanda se dispondrá a explorar la información elaborada por la Super Intendencia de Servicios Sanitarios para a determinar el caudal medio de entrada a PTAS Loma Larga, el cual será ajustado en función de dicha demanda y al espacio disponible.

4.2. Evaluación y selección del sistema de tratamiento.

Se realizará una revisión bibliográfica a diferentes estudios, investigaciones, trabajos de título, manuales de operación y diseño, que presenten información de los diferentes tipos de sistema de tratamiento, observando las alternativas que se ajusten más a las necesidades de tratamiento.

Las tecnologías de tratamiento que se tienen pensado evaluar corresponderán a aquellas que permitan realizar un tratamiento avanzado, esto debido a las exigencias que posee la norma chilena NCh1333/78. Por ende, el sistema iniciará con un pretratamiento basado en rejillas de desbaste mecanizadas, tanque desarenador y desgrasador, lo que continuará con un tratamiento secundario por medio de lodos activados y finalmente un tratamiento terciario como ultrafiltración, nanofiltración, Osmosis inversa, o combinación con tratamiento biológico como un biorreactor de membrana. Posteriormente se detallarán cuáles son sus características y se seleccionará una tecnología tomando en cuenta criterios de evaluación.

Los criterios para seleccionar dicha tecnología de tratamiento terciario serán a través del área disponible para la instalación en el sector; el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma chilena NCh 1333/78; posibles impactos en su operación; aspectos económicos y técnicos.

A continuación, en la tabla 4.1 se identifican los criterios de selección de acuerdo con aspectos técnicos, económicos, ambientales y normativos.

Tabla 4.1. Criterios de selección de sistema de tratamiento terciario (elaboración propia).

Aspectos Técnicos	<ul style="list-style-type: none"> - Características de los equipos - Espacio disponible - Mano de obra
Aspectos Económicos	<ul style="list-style-type: none"> - Costos de equipos - Cantidad de recursos - Consumo energético
Aspectos Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> - Posibles impactos (positivos / negativos)
Aspectos Normativos	<ul style="list-style-type: none"> - NCh1333/78

A cada aspecto se le estableció un valor característico con el objetivo de medir su grado de cumplimiento. Estos valores se encuentran en un rango de 1 a 3 puntos, donde el resultado final estará dado por la siguiente ecuación:

$$Ev = Te + Ec + Am + 2 * Nor$$

(Ec. 4.2)

Donde,

Ev: corresponde al resultado de la evaluación (punto).

Te: puntuación dada al aspecto técnico (puntos).

Ec: puntuación dada al aspecto económico (puntos).

Am: puntuación dada al aspecto ambiental (puntos).

Nor: puntuación dada al aspecto normativo (puntos).

Al aspecto normativo de le multiplica por 2 debido a que este posee un grado de importancia mayor a los demás aspectos.

Tabla 4.2. puntuación establecida para criterios de evaluación (elaboración propia).

Aspecto	Puntuación
Técnicos	<p>1: Bajo grado de cumplimiento, el equipo no cumple con los requerimientos técnicos.</p> <p>2: Medio grado de cumplimiento, el equipo cumple medianamente con los requerimientos técnicos.</p> <p>3: Alto grado de cumplimiento, el equipo cumple con los requerimientos técnicos.</p>
Económicos	<p>1: Bajo grado de cumplimiento, el equipo requiere altos costos de inversión.</p> <p>2: Medio grado de cumplimiento, el equipo requiere medianos costos de inversión.</p> <p>3: Alto grado de cumplimiento, el equipo requiere bajos costos de inversión.</p>
Ambientales	<p>1: Bajo grado de cumplimiento, el equipo posee mayoritariamente impactos negativos.</p> <p>2: Medio grado de cumplimiento, el equipo posee tanto impactos negativos como positivos.</p> <p>3: Alto grado de cumplimiento, el equipo posee mayoritariamente impactos positivos.</p>
Normativos	<p>1: Bajo grado de cumplimiento, el equipo no cumple con los requerimientos normativos.</p> <p>2: Medio grado de cumplimiento, el equipo cumple medianamente con los requerimientos normativos.</p> <p>3: Alto grado de cumplimiento, el equipo cumple con los requerimientos normativos.</p>

4.3. Diseño técnico conceptual para el sistema de reutilización y tratamiento de aguas servidas PTAS Loma Larga.

El sistema de reutilización constará de un tratamiento de aguas servidas el cual se encargará de remover el mayor porcentaje de contaminantes y con estas condiciones podrá ser conducido por medio de tuberías al sistema de almacenamiento (Embalse en Casablanca), para finalmente ser distribuido a los compradores.

4.3.1. Diagrama de bloques.

Después de analizar los criterios para tener en cuenta para el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, es necesario seleccionar las operaciones unitarias y la combinación de estas que removerán el mayor porcentaje de la carga contaminante del vertimiento. Las operaciones unitarias por considerarse en el proceso incluyen: tamizado, filtración, sedimentación, homogeneización, tratamiento fisicoquímico (coagulación – floculación), biorreacción y aireación.

4.3.2. Cálculo de diseño conceptual sistema de reutilización.

- Cálculo de diseño del sistema de tratamiento.

Conociendo el flujo promedio de aguas entrantes, el volumen diario que el sistema recibirá y las características del afluente, se realizará el diseño conceptual del sistema de tratamiento, el cual utilizará como tratamiento avanzado la tecnología seleccionada en el objetivo anterior. Posterior al pretratamiento, se realizarán ecuaciones de diseño para el sistema de lodos activados y tratamiento terciario seleccionado con sus respectivos balances de masas.

4.3.3. Selección de los equipos.

Terminado el diseño conceptual se habrá obtenido las dimensiones y características de los equipos y elementos que serán requeridos para el funcionamiento del sistema de reutilización, por lo que se dispondrá a seleccionar dichos equipos, tuberías y accesorios, incluyendo insumos y materia prima, que serán necesarios.

4.4. Estimación de los costos de implementación.

Se calcularán los costos totales asociados al valor de los equipos necesarios para conformar el sistema completo de tratamiento de aguas servidas.

4.4.1. Costos de inversión (CAPEX).

Para realizar una estimación aproximada de costos de inversión iniciales, se debe tener en cuenta el valor individual de cada equipo instalado en la planta.

4.4.2. Costos Operacionales (OPEX).

Los costos de operación representan una gran parte de la viabilidad de la implementación de la propuesta, estos costos corresponden a insumos y materia prima, consumos en servicios en energía eléctrica y costos en la mano de obra requerida para la operación de estos equipos.

5. Resultados

5.1. Caracterización teórica del agua entrante a PTAS Loma Larga y estimación de la demanda por parte de los cultivos

5.1.1. Caracterización de las aguas servidas domésticas mediante análisis bibliográfico.

Las aguas domésticas corresponden a aquellas que son producto de la utilización del recurso en las diferentes actividades dentro del hogar (tinajas, lavadoras, lavaplatos, inodoros, entre otros). Estas actividades generan un nivel de contaminación al agua al identificarse presencia de materia orgánica, residuos vegetales, animales, desechos orgánicos, detergentes, jabones, grasas y aceites. También las aguas residuales contienen materia inorgánica como sólidos grandes y pequeños como telas, plásticos, entre otros elementos. Los factores que determinan su composición son el clima, estado del agua utilizada, productos que se utilizan para el aseo e higiene, etc. Estos contaminantes presentes en las aguas domésticas se clasifican en agentes químicos, físicos y microbiológicos, los cuales se presentan a continuación en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros presentes en aguas servidas domésticas (adaptado de Metcalf & Eddy, 2003).

Agentes	Parámetros
Químicos	<ul style="list-style-type: none"> • pH • Materia orgánica • DBO • Nutrientes • Grasas y aceites
Físicos	<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos totales • Temperatura • Olor • Turbidez
Microbiológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Virus • Bacterias • Protozoos

La caracterización de las aguas recibidas en PTAS Loma Larga es una adaptación realizada a través de lo descrito por Metcalf & Eddy, (2003) y mediante un contacto directo con la Superintendencia de Servicios Sanitario, donde se ingresó una solicitud en el sistema de atención ciudadana (SAC), cuya respuesta a esta solicitud se encuentra en el anexo 5. Se entregaron las concentraciones medidas desde el año 2017 hasta 2022, por lo que se determinó que las concentraciones a utilizar corresponderían a la media de cada parámetro dentro de este rango de años.

Tabla 5.2. Concentraciones medidas en PTAS Loma Larga adaptado junto a datos bibliográficos (SISS, 2022. Metcalf & Eddy, 2003)

Parámetro	Concentración media
Aceites y grasas*	15,6 (mg/L)
Aluminio*	0,335 (mg/L)
Arsénico*	0,0013 (mg/L)
Alcalinidad (como CaCO ₃)	100 (mg/L)
Boro	0,75 (mg/L)
Cadmio*	0,005 (mg/L)
Cianuro*	0,0183 (mg/L)
Cobre*	0,0458 (mg/L)
Coliformes fecales (CF)	1 x 10 ⁶ (NMP/100 ml)
Cromo total*	0,0308 (mg/L)
Cromo hexavalente*	0,02 (mg/L)
Demanda biológica de oxígeno a los cinco días (DBO ₅)	220 (mg/L)
Fosforo Total (PT) *	4,31 (mg/L)
Hidrocarburos totales*	5,048 (mg/L)
Manganeso*	0,0458 (mg/L)
Mercurio*	0,00075 (mg/L)
Molibdeno*	0,026 (mg/L)
Níquel*	0,0275 (mg/L)
Nitrógeno Total (NT)	60 mg/L
Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK) *	46,6 (mg/L)
pH*	7,6
Plomo*	0,028 (mg/L)
Poder espumógeno	5 mm
Solidos sedimentables*	1,73 (ml/L) 1h
Solidos suspendidos totales (SST) *	107,8 (mg/L)
Solidos suspendidos volátiles (VSS)	85,6 (mg/L)
Solidos suspendidos no volátiles (NVSS)	21,4 (mg/L)
Solidos disueltos totales	242 (mg/L)
Sulfuro*	0,183 (mg/L)
Temperatura *	18,8 °C
Zinc*	0,1 (mg/L)

*Aquellas concentraciones entregadas por la SISS

5.1.2. Estimación de la demanda como consumo de agua para el riego y determinación de la oferta.

Como se mencionó anteriormente la comuna de Casablanca posee vocación en el cultivo de vides para la producción de vinos. Si bien las especies de vid corresponden a cultivos de alto consumo, es importante contrastar y diferenciar entre las variedades de uva de mesa y las que son para elaboración de vino. En el cultivo de uvas de mesa importa el tamaño del fruto, por lo que se utilizan variedades que produzcan bayas carnosas, de pulpa dulce y jugosa, requiriendo mayores necesidades hídricas para mantener su potencial productivo (un año), necesidad que oscila entre los 7.000 y 10.000 m³/ha según la zona y suelo. En el caso de la industria vitivinícola se necesita mayor concentración de

nutrientes en la baya obteniendo frutos más pequeños, lo que implica una necesidad menor (pero no menos importante) de consumo de agua, cuya necesidad es de 3.000 m³/ha aproximadamente según el diagnóstico presentado por Fundación Chile (2016).

Luego de obtener un estimado del consumo hídrico anual, se revisó el catastro vitícola nacional creado por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) para el año 2020, con el objetivo de identificar y determinar la superficie a satisfacer. En dicho catastro se encuentra en detalle la superficie total plantada con vides de vinificación para cada región del país. A continuación, en la Tabla 5.4 se presentan las hectáreas cultivadas con vides de cepas blancas y tintas, en la Región de Valparaíso.

Tabla 5.3. Catastro de vides (ha) – Región de Valparaíso (ODEPA, 2021).

COMUNA	SUPERFICIE PLANTADA (ha)		TOTAL
	VINÍFERA BLANCA	VINÍFERA TINTA	
Algarrobo	0,7	0,4	1,10
Cabildo		4,59	4,59
Calle Larga		2,2	2,20
Cartagena	127,16	75,97	203,13
Casablanca	4297,95	1390,98	5.688,93
Catemu	2,02	43,97	45,99
Hijuelas	3,74	251,05	254,79
Limache	2	3,92	5,92
Llay-Llay		74,43	74,43
Los Andes			0,00
Nogales		6,99	6,99
Panquehue	6,41	219,41	225,82
Petorca	2	1,8	3,80
Puchuncaví		4,2	4,20
Putendo		5,59	5,59
Quillota	211,53	94,91	306,44
Quilpué	12,67	18,72	31,39
Rinconada		15,33	15,33
San Antonio	1285,12	651,56	1.936,68
San Esteban	30,81	95,03	125,84
San Felipe		200,33	200,33
Santa María	7,05	114,25	121,30
Santo Domingo	336,19	78,66	414,85
Zapallar	22,37	25,18	47,55
Total general	6.347,72	3.379,47	9.727,19

Como se puede observar en la tabla anterior, Casablanca es la comuna con más superficie plantada con vides viníferos, utilizando un área de 5.688,93 ha lo que equivale a un 58,48% del total plantado en la Región de Valparaíso. Por lo tanto, al utilizar la ecuación 4.1 se obtiene que la demanda total es:

$$Demanda = 3.000 \frac{m^3}{año * ha} * 5.600 ha = 16.800.000 \frac{m^3}{año}$$

Por ende, se requiere aproximadamente 16.800.000 m³/año para satisfacer la demanda total hídrica por los cultivos de vides viníferos. Sin embargo, debido que los tratamientos biológicos son proceso que se realizan en un determinado tiempo, la capacidad de almacenar dicha cantidad de agua es imposible tomando en cuenta las dimensiones que posee PTAS Loma Larga, (4000 m² aprox, definido más adelante), esto implica que se podrá satisfacer un porcentaje de la demanda total.

En cuanto a la planta de tratamiento Loma Larga, esta recibe las aguas servidas domésticas provenientes de la ciudad de Valparaíso y localidades de Villa Alemana, Quilpué, Viña del Mar y Reñaca. Sin embargo, el caudal de entrada a esta varía según la época del año, esto debido a que parte de su flujo es enviado directamente desde PTAS Dos Norte la cual recibe las aguas servidas domésticas de localidades de Villa Alemana, Quilpué, Reñaca y parte de Viña del Mar. Dicha planta de tratamiento en verano (periodo desde 2^{do} sábado de octubre hasta 2^{do} sábado de marzo del año siguiente), opera exclusivamente como estación elevadora de aguas servidas enviando el 100% del caudal hacia el emisario submarino de Loma Larga. Mientras que en invierno (periodo desde 2^{do} sábado de marzo hasta el 2^{do} sábado de octubre del mismo año), el sistema opera preferentemente utilizando el emisario submarino Dos Norte, cuya capacidad está limitada a 2600 L/s. Cuando se supera este caudal, las aguas en exceso se desvían hacia Loma Larga. Esto implicará en la práctica que la oferta de aguas a tratar disminuirá un porcentaje en épocas de invierno.

La obtención del caudal entrante a PTAS Loma Larga se realizó mediante la información entregada por la Super Intendencia de Servicios Sanitarios (SISS) en donde se indica el caudal máximo puntual (L/s) y el caudal medio (L/s) para el año 2010, además se proyectan estos datos de diseño para el año 2020. A continuación, en la Tabla 5.1 se indican los datos entregados por la SISS.

Tabla 5.4. Caudal de entrada a PTAS Loma Larga año 2010 y proyección año 2020 (SISS, 2010)

Parámetros de diseño	Datos actualizados a septiembre del 2010	Datos de diseño año 2020
Caudal máximo puntual (L/s)	4.167	6.000
Caudal medio (L/s)	2.044	4.630
Población tratamiento	800.000	2.000.000

Se puede observar que a esta planta de tratamiento ingresa un volumen considerable el cual variara según la estación en la que se encuentre. Tomando en cuenta el volumen obtenido para satisfacer el potencial productivo de los viñedos en la comuna de Casablanca de 16,8 MMm³/año y a posibles problemas de espacio, se estimó utilizar 0,3 m³/s de aguas residuales previamente tratadas, obteniendo así una producción aproximada de 9,4 MMm³/año permitiendo satisfacer parte de la demanda, además de contar con infraestructura hidráulica suficiente en la comuna al poseer embalses como es Lo Ovalle con una capacidad de 42 MMm³/año. En el anexo 6 se encuentra un ejemplo de cómo aumentarían las dimensiones de las instalaciones al tratar volúmenes mayores al definido.

5.2. Evaluación y selección del sistema de tratamiento terciario.

Esta evaluación se realizó para la determinación del tratamiento terciario que podría satisfacer los requerimientos normativos en función del uso al cual se le quiere dar (uso agrícola). En los siguientes apartados se expondrán las tecnologías a evaluar, características de la instalación actual en PTAS Loma Larga y la normativa NCh 1333/78. Finalmente, se analizarán los datos obtenidos y se evaluarán en función de aspectos técnicos, económicos, ambientales y normativos

5.2.1. Tecnologías de filtración por membranas

Las tecnologías de membranas corresponden a procesos de separación de partículas del agua impidiendo el paso de sustancias no deseadas. El fluido pasa a través de la membrana debido a la diferencia de presión entre un lado de la membrana y el otro. Estas pueden ser Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración y Osmosis Inversa, donde la principal diferencia que existen entre estas tecnologías es en relación con el tamaño de poro para cada tipo de filtración y la presión requerida en estos. La decisión de cual utilizar dependerá del tipo de sustancia que se desee filtrar.

- Microfiltración

Se le llama así a la filtración que se realiza dentro de una zona de porosidad comprendida entre 0,1 μm – 10 μm y trabaja con bajas presiones (máximo 1,7 Bar aprox), que permite la eliminación de sólidos en suspensión, partículas finas, coloides, algas y microorganismos, entre otros. A pesar de que los virus son más pequeños que los poros de la membrana, parte de estos quedan atrapados ya que algunos se encuentran acoplados a bacterias (Lenntech, 2022). Según Carbetocina (2022), la microfiltración tiene muchos campos de utilización, como son la esterilización en frío de bebidas, separación de bacterias del agua, tratamiento previo a osmosis inversa, tratamiento de efluentes, reutilización de aguas residuales, etc. Opera en modo flujo cruzado donde el líquido fluye perpendicularmente a la superficie de la membrana, lo que hace que las partículas atrapadas se acumulen en la superficie de la membrana y formen una torta de filtración.

Tabla 5.5. Ventajas y desventajas de una microfiltración (Carbotecnia, 2022)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Baja presión de operación requerida. • Bajo consumo de energía en unidades semi-inactivas en comparación con la nanofiltración o la ósmosis inversa. • Prácticamente no se requieren operaciones manuales y son prácticamente sencillas. • Costo moderado de inversión y operación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidad a los productos químicos oxidantes (como altas concentraciones de peróxidos y persulfatos nítricos, sulfúricos) • Las partículas duras y afiladas > 0.1 mm pueden causar daños y, por lo tanto, requieren prefiltración de poro más abierto; • El diafragma fallará si se vuelve a enjuagar con una presión superior a 1 bar

- Ultrafiltración

Por lo descrito por Fibras y Normas de Colombia S.A.S (2022), es un tipo de filtración por membrana, que permite la retención y eliminación de sólidos suspendidos (por medio de presión hidrostática), como partículas, coloides, quistes virus, bacterias, endotoxinas, entre otros. Esto permite generar agua de alta pureza con baja densidad de sedimentos). Las membranas de UF se clasifican por el peso de corte molecular que es igual al peso molecular de la molécula más pequeña que pueden retener sus poros al 90%, y que oscila entre 1.000 y 500.000 Dalton, es decir, moléculas y macromoléculas (Zarza, 2022). Trabaja con porosidades que parten de 0.1 μm hasta menos de 0,05 μm y a bajas presiones, que oscilan entre los 0.5 – 5 Bar aprox (Solis, et al. 2017).

Tabla 5.6. Ventajas y desventajas de una ultrafiltración (Fibras & Normas S.A, 2022)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Manejo sencillo y posible automatización • Las diferencias de presión requeridas son bastante bajas, ya que apenas existen diferencias osmóticas. (Ahorro energético) • Vida útil extensa de membrana por sistemas de retro lavado • Compactibilidad debido al mínimo requerimiento de espacio 	<ul style="list-style-type: none"> • Genera entre un 30% y 60% de rechazo, según el agua tratada que debe disponerse o tratarse • Disminución lenta del flux de filtración con el tiempo • Costos relativamente elevados por renovación de membranas

- Nanofiltración

Proceso de filtración de agua, que se realiza a través de una nano membrana semipermeable bajo una determinada presión, que dependiendo del tamaño de la molécula es que logran atravesar la membrana. Se utiliza en aguas de bajo sólidos disueltos totales, aplicándose en la eliminación de agentes contaminantes, sustancias orgánicas y iones polivalentes, desinfectando el agua potable y suavizándola para el consumo humano (Fibras y normas, 2022). Trabaja con porosidades menores a 0.01 μm y presiones entre los 4 y 20 Bar aprox. Esta tecnología es utilizada principalmente en la purificación del agua para consumo humano. En la tabla 5.7 se encuentran algunas ventajas y desventajas que posee este tipo procesos.

Tabla 5.7. Ventajas y desventajas de una nanofiltración (Fibras & Normas S.A, 2022)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Manejo sencillo y posible automatización • Remueve la dureza como también reduce parcial y simultáneamente el sodio en el agua • Posee tasas de flujo más alta que la Ósmosis Inversa pero menores que la ultrafiltración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Remueve parcialmente los sólidos disueltos totales • Costos muy elevados de inversión y operación • La presión elevada a la que se maneja el agua genera altos costos de energía • Alta resistencia hidráulica

- Osmosis Inversa

Trabaja con porosidades menores a 0,001 μm y a altas presiones (10 – 80 bar), obligando a pasar el agua por la membrana, todas las sales disueltas permanecen en una solución que se concentra de sales, motivo por el cual se le conoce como salmuera. Esta tecnología posee diferentes aplicaciones en rubros como la minería, la ganadería, agricultura, energía, y en varios países del mundo es utilizada para producir agua potable desalando las aguas extraídas de los océanos. En la Tabla 5.8 se identifican algunas de las ventajas y desventajas que poseen este tipo de tecnologías las cuales son necesarias para la evaluación.

Tabla 5.8. Ventajas y desventajas de una osmosis inversa (Waterstation, 2022)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Permite eliminar del 95 al 99% de las sales disueltas • Es sumamente efectivo porque logra la remoción de todos los agentes sólidos contaminantes hasta en un 99% • Manejo sencillo, puede ser ejecutado por personal cualificado 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de altas presiones lo que conlleva a un alto consumo energético • Requiere de prefiltraciones (como una ultrafiltración) para no dañar y alargar la vida útil de la membrana • Muy elevado costo de inversión y operación • La relación de agua rechazada vs agua utilizable puede variar de 2 litro de agua rechazada a 1 litro de agua utilizable hasta 12 litros de rechazo y 1 litro utilizable • Aumentan la acidez del agua por lo que es necesario usar un agente alcalino para equilibrar • Es necesario control y disposición del agua de rechazo por su alto contenido en sodio (salmuera)

A continuación, en la figura 5.1 se detalla el tamaño de poro y la presión utilizada para cada tecnología y aquellas sustancias que son capaces de filtrar.

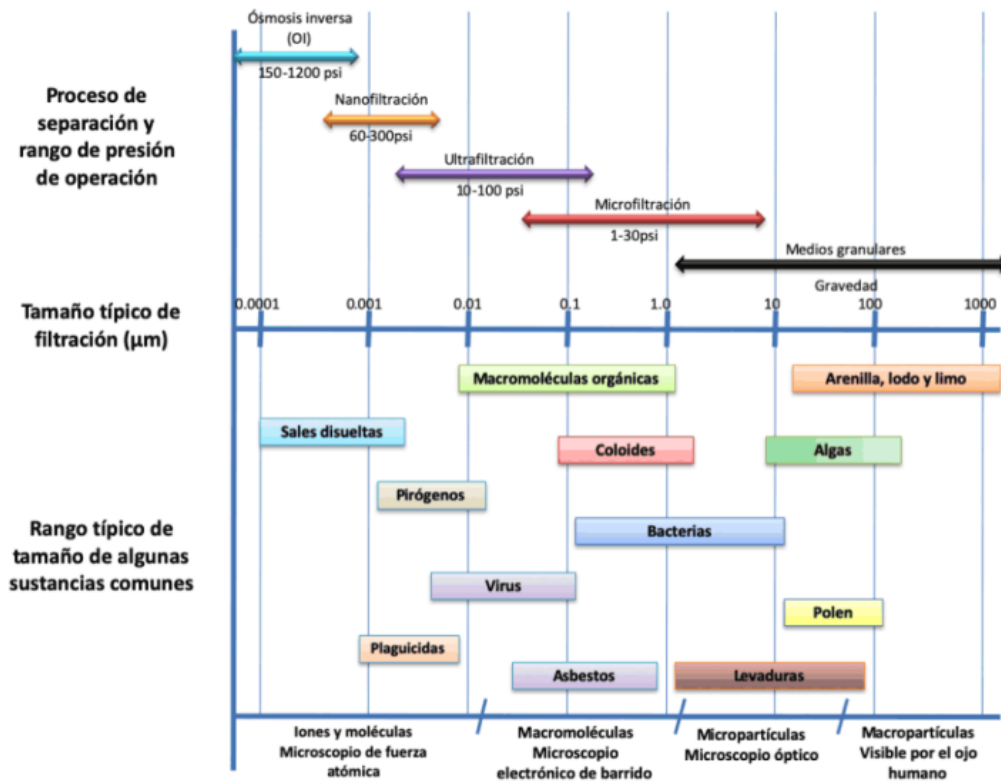


Figura 5.1. Tamaño de poro de los distintos tipos de filtración (Carrera, 2021).

5.2.2. Planta de Tratamientos Loma Larga ESVAL S.A.

Como se mencionó en Capítulo 1 de este trabajo de título, la planta de tratamiento Loma Larga se encuentra ubicada en la quebrada Las Ánimas, en el primer sector de Playa Ancha. En la Figura 5.2 se muestra un aproximado del área que posee la instalación, que según la información entregada por Google Earth correspondería a un área de 4000 m² aprox.



Figura 5.2. Área aproximada de PTAS Loma Larga ESVAL S.A. (Google Earth, 2022).

La resolución de la SISS (2010), menciona que esta planta cuenta con rejas gruesas; medidores de caudales; tratamiento preliminar que consta de rejas mecanizadas de 7 mm de paso, un tanque desarenador y desengrasador; equipo de olores para los gases que son generados en el pretratamiento, que consta de un estanque reforzado de fibra de vidrio con lecho de carbón activado y finalmente con un emisario submarino de 1,2 metros de diámetro, un largo de 542 metros, fabricado de polietileno de alta densidad.

Para la evaluación del tratamiento terciario, se asume que estas operaciones serán parte del sistema de tratamiento y que el área determinada será la limitante de espacio para la selección de equipos.

5.2.3. Norma Chilena 1333/78

La NCh1333 fija un criterio de calidad del agua de acuerdo con requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según el uso determinado (consumo humano, bebida para animales, riego, recreación y estética o vida acuática). En este caso se presentarán los requerimientos de calidad de agua para riego, como pH, elementos químicos, razón de adsorción de sodio, conductividad específica – sólidos disueltos totales, pesticidas y requisitos bacteriológicos.

Tabla 5.9. Concentraciones máximas permitidas adaptado de la NCh1333/75.

Parámetro	Límite máximo	Unidad
pH	5,5 – 9,0	mg/L
Aluminio	5,00	mg/L
Arsénico	0,10	mg/L
Boro	0,75	mg/L
Cadmio	0,01	mg/L
Cianuro	0,20	mg/L
Cloruro	200,00	mg/L
Cobre	0,20	mg/L
Cromo	0,10	mg/L
Manganeso	0,20	mg/L
Mercurio	0,001	mg/L
Níquel	0,20	mg/L
Plomo	5,00	mg/L
Sodio porcentual	35	%
Sulfato	250,00	mg/L
Zinc	2,00	mg/L
*Coliformes fecales	≤ 1 000 coliformes fecales / 100 ml	ml

En el caso de tasa de adsorción de sodio, según lo escrito en la norma, la autoridad competente debe establecerla en cada caso específico. Sin embargo, en literatura se detalla una tabla donde se comparan la tasa de adsorción (SAR) de sodio con la conductividad eléctrica (CE).

Tabla 5.10. Restricciones de uso de agua para riego según SAR y CE (U. de Chile, 2005).

Parámetro		Grado de restricción en uso			
		Ninguno	Débil a moderado	Severo	
SAR	0-3	Conductividad eléctrica (dS/m)	> 0,7	0,7-0,2	< 0,2
	3-6		> 1,2	1,2-0,3	< 0,3
	6-12		> 1,9	1,9-0,5	< 0,5
	12-20		> 2,9	2,9-1,3	< 1,3
	20-40		> 5,0	5,0-2,9	< 2,9

En la Tabla 5.11 se da una clasificación de aguas para riego de acuerdo con sus condiciones de salinidad, en base a las características de conductividad específica y concentración de sólidos disueltos totales.

Tabla 5.11. Clasificación de agua para riego según su salinidad NCh1333/75.

Clasificación	Conductividad específica, CE, μ mhos/cm a 25°C	Sólidos disueltos totales, mg/L a 105°C
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	$c \leq 750$	$s \leq 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < c \leq 1\ 500$	$500 < s \leq 1\ 000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	$1\ 500 < c \leq 3\ 000$	$1\ 000 < s \leq 2\ 000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3\ 000 < c \leq 7\ 500$	$2\ 000 < s \leq 5\ 000$

En cuanto a pesticidas, la normativa menciona que la autoridad competente se debe pronunciar en cada caso específico con relación a herbicidas. En el caso de insecticidas no se le considera que tenga efectos perniciosos en agua para riego.

5.2.4. Evaluación y selección de tratamiento terciario.

Utilizando la información recolectada se puede tener una idea de que equipo será el más adecuado. Para esto se utilizó la ecuación 4.2, determinando la tecnología que pueda poseer las cualidades necesarias para obtener un agua para riego satisfaciendo los requerimientos normativos. En la Tabla 5.12 se encuentran las tecnologías evaluadas con sus respectivas puntuaciones.

Tabla 5.12. Resultados de evaluación tecnologías de membrana bajo distintos aspectos.

Aspecto / Tecnología	Técnico	Económico	Ambiental	Normativo	Total
Microfiltración	2	3	2	3	13
Ultrafiltración	3	2	3	3	14
Nanofiltración	1	1	2	2	8
Osmosis Inversa	1	1	2	1	6

Con esto se identifica que la mejor tecnología a utilizar es una ultrafiltración, ya que posee un poro el cual permite eliminar partículas con pesos moleculares que oscilan

entre 1.000 y 500.000 Dalton, eliminando así, virus, bacterias, algas, proteínas, entre otros. Los costos de inversión son relativamente bajos, ya que las membranas pueden reutilizarse al poseer un sistema de retro lavado (aumentando su vida útil), y por trabajar con bajas presiones disminuyendo el consumo energético. Las nuevas tecnologías han desarrollado membranas de filtración inteligentes, con sistemas digitales que hacen que el usuario programe el momento exacto en que debe funcionar y el momento en el que deba retro lavarse para que, de esta forma, su eficiencia no se vea disminuida ni afectada al momento de su uso. La ultrafiltración es fácilmente combinable con otros procesos, disminuyendo así el espacio requerido para su instalación. En cuanto al aspecto ambiental estas tecnologías son muy eficaces para la eliminación de residuos que atenten contra el medio, no requieren de grandes espacios por lo que es prácticamente imperceptible, además de tener la facilidad de reutilizar la membrana. Este tipo de tecnologías da cumplimiento con las exigencias que presenta la NCh 1333/78 al generar un agua de buena calidad. Si bien, la normativa le da bastante énfasis a la salinidad del agua para riego, la naturaleza de las aguas servidas domésticas permite que no se requiera de equipos para reducirla, ya que estas no poseen elevadas concentraciones de sales.

Con esto, se definió que el sistema a realizar corresponderá a una combinación de lodos activados, como unidad de tratamiento secundario y una ultrafiltración como unidad de tratamiento terciario. A esta combinación se le denomina Reactor biológico de Membrana (MBR). Que opera de forma similar a un lodo activado convencional, no obstante, el proceso de separación sólidos-líquidos que ocurre normalmente en el sedimentador secundario, en el MBR se materializa a través de la permeabilidad y porosidad de las membranas. La configuración compacta de estos biorreactores implica que el espacio, la obra civil y los requerimientos de operación sean reducidos considerablemente. También existe un aumento en la eficiencia del proceso ya que al eliminar la etapa de sedimentación y disminuir la producción de lodos, existirá una mayor concentración de biomasa activa al prolongarse el tiempo de retención celular, disminuyendo el volumen necesario del biorreactor. En la figura 5.3 se puede apreciar la reducción de espacio por un MBR a comparación de una tecnología convencional (Carrera, 2021).

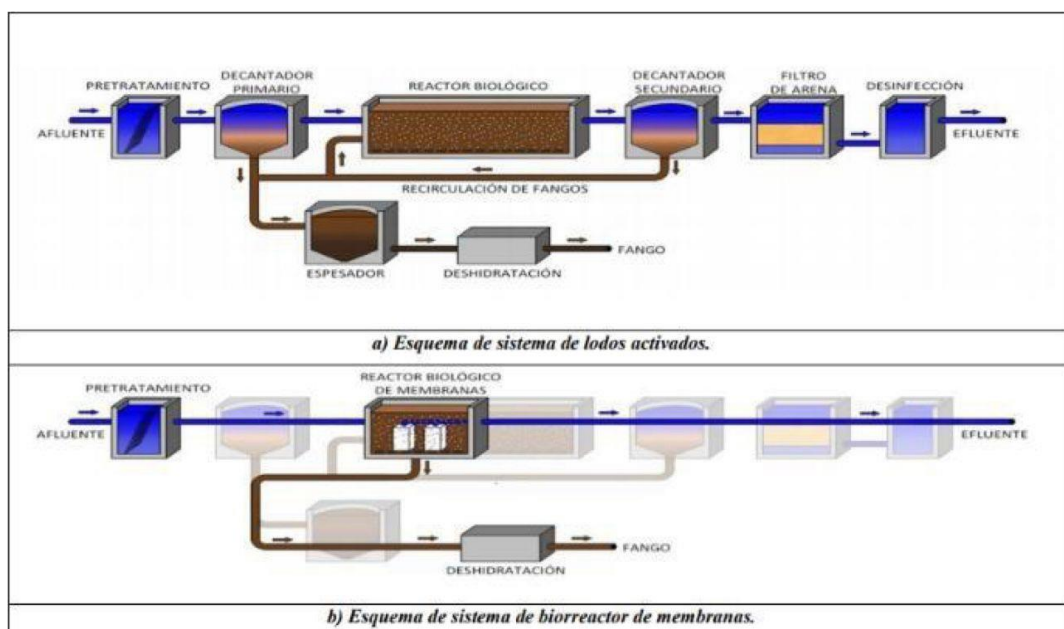


Figura 5.3. Esquema comparativo de impacto del sistema MBR en una PTAS convencional. (Carrera, 2021).

Cabe destacar que, en la discusión de este trabajo de título, se hablará sobre porque las demás tecnologías de membrana no cumplen con los requerimientos de tratamiento a comparación de una ultrafiltración.

5.3. Diseño técnico conceptual para el sistema de tratamiento de las aguas servidas PTAS Loma Larga.

Las aguas servidas pasarán por unidades de pretratamiento correspondientes a operaciones unitarias físicas (tamizado, filtración por desbaste, decantación, adsorción por carbón activado, etc) encargadas de eliminar una fracción de los sólidos suspendidos luego. Luego el alfluente entrará por el sistema MBR combinación de procesos unitarios biológicos y físicos, esto sucede mediante la degradación y mineralización de la materia orgánica a partir de la biomasa activa, con una aireación continua, y la filtración de los sólidos por parte de los módulos de membrana que por su porosidad permite separar prácticamente todo tipo de sólidos (dependiendo de la porosidad). A continuación en la Figura 5.4 se presenta el diagrama de bloques de los procesos que estarán sucediendo.

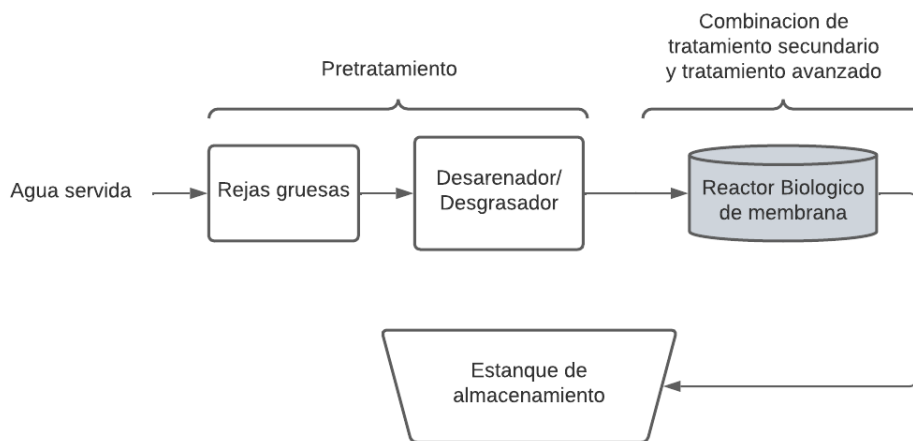


Figura 5.4. Diagrama de bloques sistema de tratamiento.

El diseño completo del sistema de reutilización de aguas servidas consta de diferentes partes las cuales se muestran en la figura 5.5. En este apartado se realizó el diseño del sistema de tratamiento requerido para producir agua de calidad para riego, cumpliendo con los requerimientos descritos en la NCh1333. Cabe destacar que el diseño elaborado no considera el sistema de conducción hacia la comuna de Casablanca, lo cual podría ser evaluado en otro trabajo.

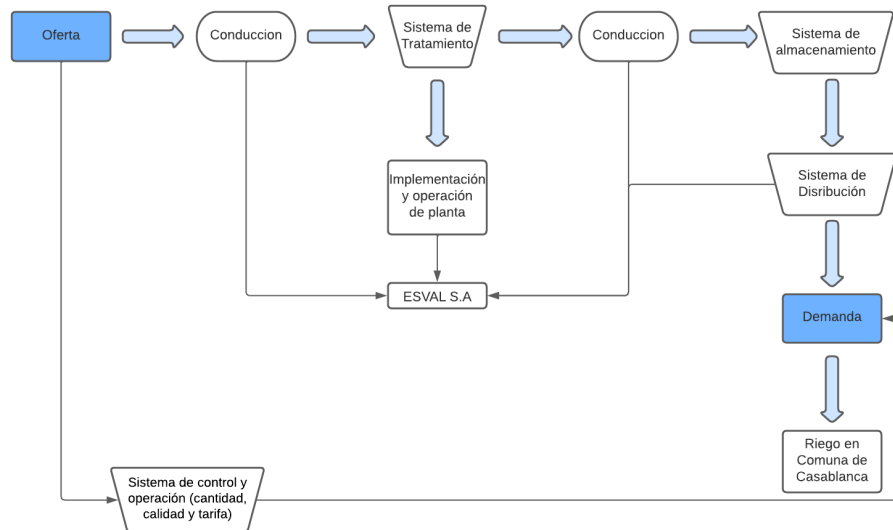


Figura 5.5. Diagrama conceptual del sistema de reutilización de aguas servidas domésticas

Como se mencionó en el apartado anterior, el diseño realizado corresponde a un sistema MBR con membrana sumergida, el cual está compuesto de dos partes principales:

- Reactor biológico responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual
- El módulo de membrana encargado de llevar a cabo la separación sólido-líquido en base a su configuración

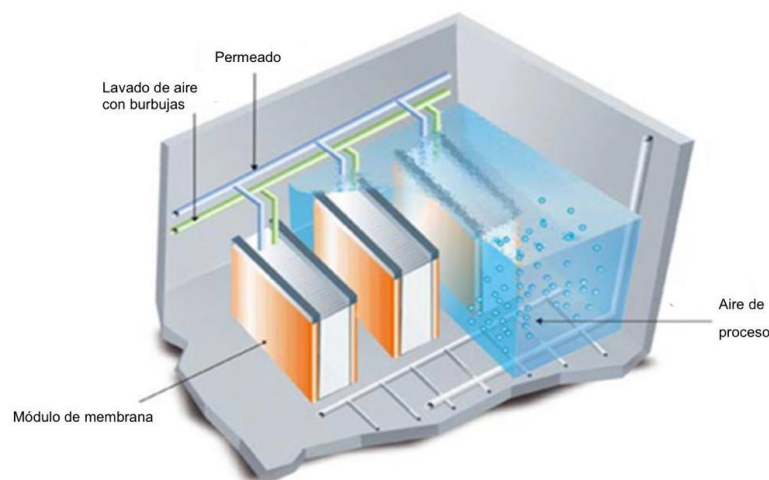


Figura 5.6. Esquema de un biorreactor de membrana sumergida (González, 2007)

En la Figura 5.7 se presenta el diagrama de flujo del sistema y en la Tabla 5.9 la definición de los símbolos utilizados. Tanto el diagrama como las ecuaciones fueron obtenidas de Alcarria, M (2005), que da una serie de pasos para realizar el diseño de un sistema MBR. Se le hicieron una serie de modificaciones a dichos pasos utilizando las ecuaciones descritas por Metcalf & Eddy, (2003). El agua residual que entra en el proceso consta de DBO soluble (DBO_F), de sólidos en suspensión volátiles (X_{VF}) y no

volátiles (X_{NVF}) y de ciertas cantidades de nutrientes (fósforo y nitrógeno) expresados como nitrógeno total Kjendahl (NTK), nitrógeno amoniacal ($N-NH_4$) y fósforo total (Pt).

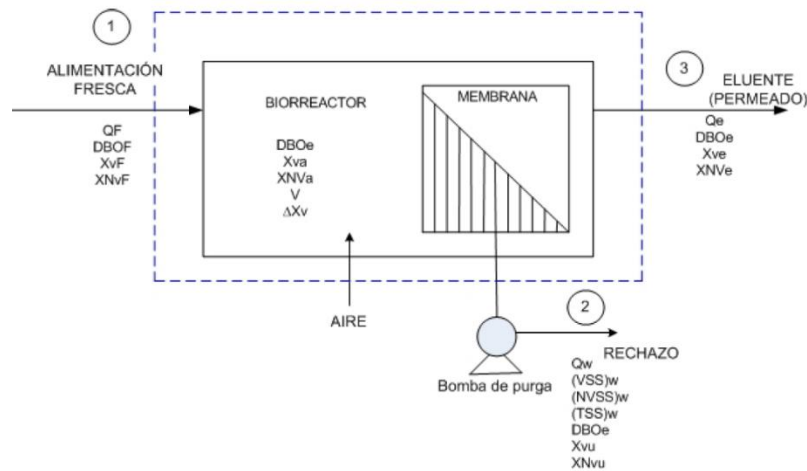


Figura 5.7. Diagrama de flujo de un MBR sumergido (Alcarria, 2005).

Tabla 5.13. Definición de símbolos utilizados en la Figura 5.8 (Alcarria, 2005).

Caudales (m ³ /s)		Concentraciones de la DBO soluble (mg/L)	
Símbolo	Definición	Símbolo	Definición
Q_F	Alimentación inicial	DBO_F	DBO soluble de la alimentación
Q_e	Efluente final	DBO_e	DBO soluble del efluente
Q_w	Purga		
Concentración de sólidos volátiles en suspensión (VSS) (mg/L)		Concentración de sólidos no volátiles en suspensión (NVSS) (mg/L)	
X_{vF}	VSS en la alimentación	X_{NVF}	NVSS en la alimentación
X_{va}	VSS en el reactor	X_{NVa}	NVSS en el reactor
X_{ve}	VSS en el efluente final	X_{Nve}	NVSS en el efluente final
X_{vu}	VSS en la descarga del clarificador	X_{NVu}	NVSS en la descarga del clarificador
Purga (kg/d)		Volumen del reactor (m³)	
$(VSS)_w$	VSS en la purga	V	Volumen del reactor
$(NVSS)_w$	NVSS en la purga	Producción de lodos (kg/d)	
$(SST)_w$	SST en la purga	ΔX_V	Producción de lodos

5.3.1. Consideraciones iniciales de diseño.

Para el diseño del biorreactor de membrana se tendrán las siguientes consideraciones de diseño:

- 1- La concentración de biomasa está íntimamente relacionada con los Sólidos suspendidos volátiles (VSS), los cuales en la alimentación inicial se consideran despreciables, por ser una concentración de microorganismos heterogénea y al no haber efectuado en esta etapa una cantidad apreciable de aireación. Los VSS se producen continuamente en el reactor debido a la síntesis de materia biológica y se purga continuamente. Se considerará una edad de lodos inicial de 12 días.
- 2- Incluir una membrana en el biorreactor permite que la concentración de VSS este comprendida normalmente entre 10.000 y 20.000 mg/L. Para mantener dicha

concentración en el reactor es necesario purgar del sistema una cantidad de sólidos en suspensión igual a la producción de lodo en el reactor

- 3- La presencia de la membrana permite separar del agua residual la DBO insoluble.
- 4- Se considera que el reactor con el que se trabaja es un reactor de flujo continuo en tanque agitado debido a que opera en estado estable y las condiciones de reacción-conversión permanecen invariables durante el tiempo de reacción y son homogéneo
- 5- La DBO soluble en el licor mixto se considera que es igual a la DBO del efluente ya que las membranas utilizadas (ultrafiltración), raramente eliminan materiales disueltos.
- 6- Al no tener restricciones la NCh1333/78 para la DBO (valor necesario para realizar el diseño), se tomaron valores descritos por el Servicio agrícola y ganadero (SAG) y la Universidad de Chile, (2005). Donde clasifican como clase 3, al agua de calidad regular, apta para riego restringido.

5.3.2. Elección de la membrana

Se ha seleccionado una membrana de fibra hueca, con una trayectoria de afuera hacia adentro, elaborada con fluoruro de polivinilideno (PDVF), que trabaja en flujo cruzado. El módulo es de la marca Vocee, esto debido a las características que posee descritas a continuación:

- Posee una presión transmembrana (PTM) baja y uniforme, lo que permite reducción de ensuciamiento.
- La configuración afuera hacia adentro permite que se puedan tratar afluentes con mayor concentración de sólidos en suspensión.
- Esta tecnología es utilizada para diferentes aplicaciones como: agua potable, aguas residuales, aplicaciones terciarias y de reutilización del agua,
- Permeabilidad de 40 l/mh/bar,
- Membrana con porosidad de 0,1 μm (aunque en este caso se asumirá una porosidad de 0,04 μm).



Figura 5.8. Membrana marca Vocee (Alibaba.com, 2022).

Aunque depende del fabricante, las membranas comúnmente se agrupan en módulos, que a su vez se agrupan en cassettes y estos últimos se unirán formando un tanque de membranas con varias vías de funcionamiento para la limpieza de estas. En la Figura 5.9 se puede apreciar dicha secuencia.

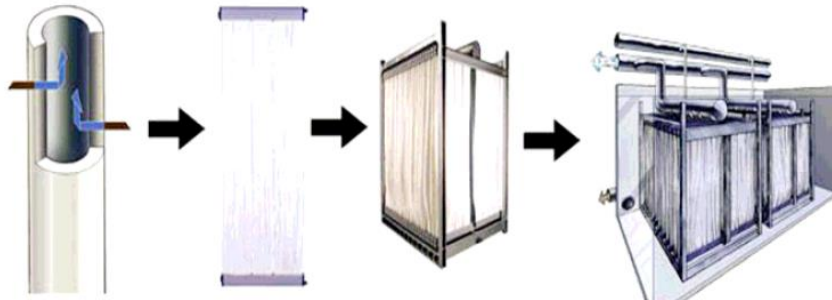


Figura 5.9. Secuencia de formación de un reactor de membrana (Alcarria, 2005).

A continuación, en la Tabla 5.14 se muestran las dimensiones (redondeadas) y características de la membrana.

Tabla 5.14. Dimensiones de módulo de membrana y cassettes (Alibaba.com, 2022).

Características y dimensiones de membrana ZeeWeed serie 500D		
Modulo	Dimensión (cm)	54 x 200
	Área de filtración (m ²)	20
	Nº de módulos por cassette	60
Cassetes	Dimensión (cm)	300 x 150 x 230
	Área de filtración (m ²)	1200
	Nº de cassetes por tanque	20

5.3.3 Procedimiento de diseño de un biorreactor de membrana.

Como se mencionó anteriormente, los cálculos de diseño fueron una serie de pasos descritos por Alcarria (2005) y Metcalf & Eddy (2003). A continuación, se muestra una lista de los datos básicos requeridos y de los criterios fundamentales de diseño.

I. Datos de la alimentación inicial

- Caudal alimentación, oferta de aguas en m³/d, Q_F
- DBO_F en mg/l de DBO_5
- Sólidos en suspensión en mg/L de la alimentación inicial, X_{VF} , X_{NVF}
- Temperatura de la alimentación inicial en °C, T_F
- Nitrógeno total Kjeldahl (NTK) en mg/L, N_F

II. Datos sobre la calidad del efluente

- DBO_e en mg/l de DBO_5
- Nitrógeno total Kjeldahl (NTK) en mg/L, N_e
- Flujo de permeado en (m³/m² *d), J_e

III. Información para el diseño del reactor biológico

- Valor de diseño de la concentración de MLVSS en mg/L, X_{Va}
- Temperatura del aire ambiente en °C, T_a
- Parámetros biocinéticos: k , k_d , Y

IV. Características de las membranas

- Tipo de membrana
- Dimensiones del módulo de membrana escogido
- N° de módulos en un cassette, N_M
- N° de módulos por cassette, N_c

Tabla 5.15. Parámetros de diseño de un MBR.

	PARAMETROS	VALOR
DATOS DE ALIMENTACION	Q_F	25920 m ³ /d
	DBO_F	220 mg/L
	X_{VF}	0
	X_{NVF}	21,4 mg/L
	T_F verano	18,8 °C
	N_F	46,6 mg/L
DATOS SOBRE CALIDAD DEL ELFUENTE	DBO_e	20 mg/L
	N_e	20
	X_{Ve}	0
	X_{NVe}	0
INFORMACION PARA EL DISEÑO DEL REACTOR	X_{va}	12.000 mg/L
	T_a verano	12 °C
	K	0,00123 h ⁻¹ * L/mg
	θ (Coef de Arrhenius para K)	1,03
	K_d	0,0025 h ⁻¹
	θ (Coef. de Arrhenius para K_d)	1,05
	Y	0,6 kg MLVSS/kg DBO_F
	X_{Vu}	= X_{Va}
Edad de lodo	12 días	
INFORMACION SOBRE LA MEMBRANA	J_e	15 (l/m ² *h) \approx 0,4 (m ³ /m ² *d)
	PTM	0,5 bar
	N_c	60
	Dimensiones/características membrana	Ver tabla 5.14

Estos valores son los obtenidos por la caracterización de las aguas servidas provenientes de la PTAS Loma Larga, consideraciones iniciales realizadas y por lo descrito por Alcarria (2005).

Paso 1. Conociendo las características de la membrana se puede obtener la cantidad de tanques de aireación para poder tratar 25.920 m³/d de aguas servidas, a partir del flujo de permeado, utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = J_e \left(\frac{m^3}{m^2 * d} \right) * (A_F) * N_M \left(\frac{Modulos}{Cassettes} \right) * N_C \left(\frac{Cassettes}{tanques} \right)$$

$$Q = 9.600 \frac{m^3}{d}$$

(Ec. 5.1)

Donde,

- J_e: Flujo de permeado = 0,4 (m³/ m²*d).
- A_F: Área de filtrado = 20 (m²).
- N_M: Numero de módulos por cassettes = 60.
- N_C: Numero de Cassettes por tanque = 20.
- Q: Capacidad de agua a tratar por tanque.

Conociendo el caudal de agua que se puede tratar por tanque se procedió a calcular el número de tanques requeridos, utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_F = N_T * Q \Rightarrow N_T = \frac{Q_F}{Q} = 2,7 \approx 3 \text{ Tanques}$$

(Ec. 5.2)

Donde,

- Q: Capacidad de agua a tratar por tanque = 9.600 (m³/d).
- N_T: Numero de tanques necesarios.
- Q_F: Caudal de alimentación = 25.920 (m³/d).

Paso 2. Luego, conociendo el tipo de membrana que se utiliza se calculó el volumen del tanque. Según los datos establecidos en la Tabla 5.14, habrá 60 módulos por cassette.

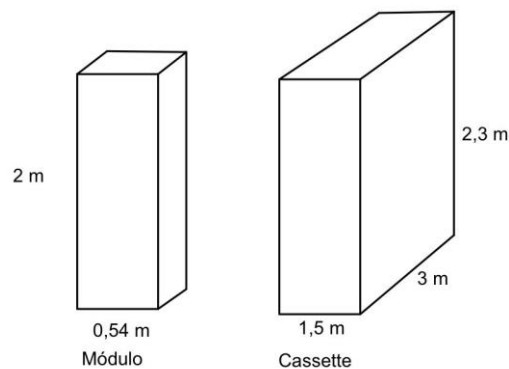


Figura 5.10. Dimensiones de un módulo y un cassette.

Considerando que en un tanque se introducen 20 cassettes y que se establece una altura del reactor de 4 metros. En la Figura 5.11 se encuentran las dimensiones del tanque implementado.

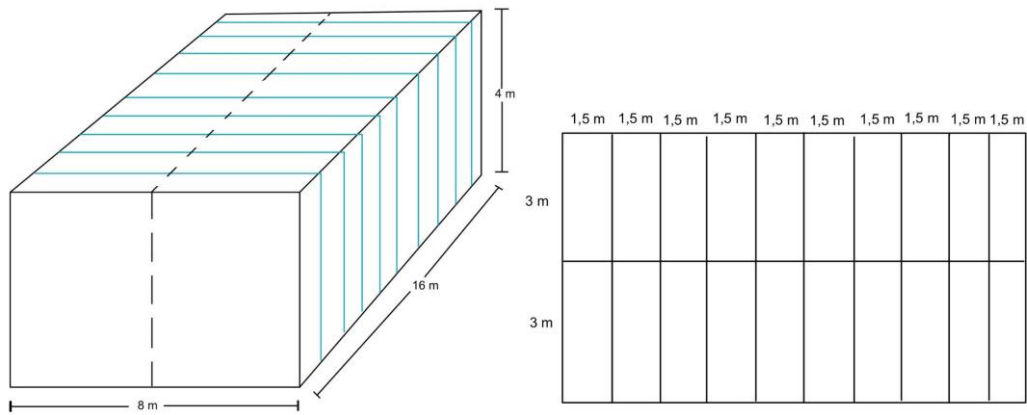


Figura 5.11. Dimensiones del tanque utilizado y área total de cassettes.

Por lo tanto, el volumen del tanque está dado por:

Alto = 4 (m).

Ancho = 8 (m).

Largo = 16 (m).

$$V_T = \text{Alto (m)} * \text{Ancho (m)} * \text{Largo(m)} = 512 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Paso 3. A continuación, se realizó una estimación preliminar de la potencia requerida por los aireadores. La cual se verificará más adelante, donde, si no hay acuerdo, se realizara un procedimiento iterativo hasta alcanzar la convergencia deseada:

$$P = \frac{(DBO_F - DBO_e) * Q_F'}{20 \text{ a } 22} = \frac{(220 - 20) * 0.001 * 25.920}{21} = 246,85 \text{ Cv} \approx 243 \text{ HP} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Donde,

-P: Potencia de aireación en caballos de vapor (Cv).

-DBO_F: Demanda biológica de oxígeno en la alimentación = 220 (mg/L).

-DBO_e: Demanda biológica de oxígeno en el efluente = 20 (mg/L).

-Q_F': Caudal de entrada al reactor = 25.920 (m³/d).

En este proceso biológico se considera que se consume aproximadamente de 20 a 22 kg de DBO₅/Cv*d.

Paso 4. A continuación, se llevó a cabo una estimación preliminar de la temperatura T_w del licor mixto en el reactor en condiciones verano.

$$T_W = \frac{(3,6 * 10^6 * Q_F * T_F) + (1134 * P * T_a)}{(3,6 * 10^6 * Q_F) + (1134 * P)} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Donde,

-T_w: Temperatura del licor mixto en el reactor (°C).

-T_F: Temperatura de alimentación inicial (°C).

- T_a: Temperatura de aire ambiente (°C).
- P: Potencia de aireación en caballos de vapor (CV).
- Q_F: Caudal de entrada de un tanque = 0,1 (m³/s).

- Verano
 - T_F= 18,8°C.
 - T_a= 12°C.

$$T_W = \frac{(3,6 * 10^6 * 0,1 * 18,8) + (1134 * 283,8 * 12)}{(3,6 * 10^6 * 0,1) + (1134 * 283,8)} = 15,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paso 4. Luego, se calcularon los valores de los parámetros K y K_d para las temperaturas de verano e invierno:

$$K_{T_W} = K * \theta^{(T_W - 20)} \quad (\text{Ec. 5.10})$$

$$K_{dT_W} = K_d * \theta^{(T_W - 20)} \quad (\text{Ec. 5.11})$$

Donde,

- K: Parámetro de crecimiento de microorganismos = 0,00123 (h⁻¹L/mg).
- θ: Coef. de Arrhenius para K = 1,03.
- K_d: Parámetro de decrecimiento de microorganismos = 0,0025 (h⁻¹).
- θ_d: Coef. de Arrhenius para K_d = 1,05.

Sustituyendo estos valores y las respectivas temperaturas de verano e invierno se obtienen los parámetros de crecimiento y decrecimiento de microorganismos:

- Verano
 - T_W= 15,8°C

$$K_{15,8} = 0,00108 \frac{L}{mg * h} = 0,027 \frac{L}{mg * d}$$

$$K_{d15,8} = 0,002 \frac{L}{mg * h} = 0,051 d^{-1}$$

Paso 5. Edad del lodo.

Para este trabajo se considerará inicialmente una edad de lodo igual a 12 días, puesto que es un valor típico en este tipo de diseño (Alcarria, 2005). La ecuación que define la edad de lodos es la siguiente:

$$\theta_c = \frac{V_r * X_{Va}}{Q_W * X_{Vu} + Q_e * X_{Ve}} \quad (\text{Ec. 5.12})$$

Donde,

- V_r: volumen del reactor (m³)
- Q_w: caudal de lodo purgado (m³/d)

- X_{Vu} : concentración de microorganismos en el lodo (mg/L)
- Q_e : caudal del efluente de la unidad de membranas (m^3/d)
- X_{Ve} : concentración de microorganismos en la unidad de membranas (mg/L)
- X_{Va} : concentración de biomasa en el tanque de aireación (mg/L)

Paso 6. En este paso se calculó las dimensiones del reactor biológico en el cual ira inmersa el tanque de la membrana determinado en el paso 2.

$$\text{Acumulacion} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Crecimiento neto}$$

$$\frac{dx}{dt} V_r = Q_F * X_{VF} - (Q_W * X_{Vu} + Q_e * X_{Ve}) + V_r(r'_g) \quad (\text{Ec. 5.13})$$

Sustituyendo r'_g por la ecuación de la tasa de crecimiento y suponiendo que la concentración de células en el afluente es nula y que hay estado estacionario, se obtiene:

$$\frac{Q_W * X_{Vu} + Q_e * X_{Ve}}{V_r X} = -Y \frac{r_{su}}{X} - k_d \quad (\text{Ec. 5.14})$$

Simplificando la Ecuación (5.12) y reordenando:

$$\frac{1}{\theta_c} = -Y \frac{r_{su}}{X} - k_d \quad (\text{Ec. 5.15})$$

El término r_{su} se determina por medio de la siguiente expresión:

$$r_{su} = -\frac{Q}{V_r} (DBO_F - DBO_e) = -\frac{(DBO_F - DBO_e)}{\theta} \quad (\text{Ec. 5.16})$$

Donde,

- DBOF: DBO del afluente (mg/L)
- DBOe: DBO del efluente (mg/L)
- θ : tiempo de retención hidráulico (d)

La concentración de microorganismos en el reactor SSLM, se puede obtener sustituyendo la Ecuación (5.16) en la (5.15) y despejando el valor de SSLM:

$$X_{Va} = \frac{\theta_c}{\theta} * \frac{Y(DBO_F - DBO_e)}{(1 + k_d \theta_c)} \quad (\text{Ec. 5.17})$$

Sustituyendo en la Ecuación 5.17 V/Q en θ y reordenando, obtenemos:

$$V_r = \frac{Y * Q_F * (DBO_F - DBO_e) * \theta_c}{X_{Va} * (1 + k_d \theta_c)} \quad (\text{Ec. 5.18})$$

Donde,

- Q_F : caudal de entrada (m^3/d)
- Y : rendimiento celular
- DBO_F : DBO del afluente (mg/L)
- DBO_e : DBO del efluente (mg/L)
- θ_c : Edad del lodo (días)
- X_{Va} : concentración de biomasa en el tanque de aireación (mg/L)
- K_d : constante de respiración endógena (d^{-1})

$$V_r = \frac{0,6 * 25.920 * (220 - 20) * 12}{12.000 * (1 + 0,051 * 12)} = 1929 m^3 \approx 2000 m^3$$

Respecto a la geometría que tendrá el reactor biológico será rectangular. Mientras que la altura del reactor se fija en 4 metros, valor típico de los reactores en tratamientos de depuración. Por lo tanto, el dimensionamiento es el siguiente:

$$\hat{A}_{reactor} = 500 m^2$$

Paso 7. Cálculo de la carga másica.

$$C_m = \frac{DBO_F * Q_F}{X_{Va} * V_r} \quad (\text{Ec. 5.20})$$

Donde,

- Q_F : caudal de entrada (m^3/d)
- DBO_F : DBO del afluente (mg/L)
- X_{Va} : concentración de microorganismos en el tanque de aireación (mg/L)
- V_r : volumen del reactor (m^3).

$$C_m = \frac{220 * 25.920}{12.000 * 2000} = 0,23 \frac{kgDBO}{kg * d}$$

Paso 8. Cálculo del tiempo de retención hidráulica.

$$TRH = \frac{V_r}{Q_F} \quad (\text{Ec. 5.21})$$

$$TRH = \frac{2000}{25.920} = 0,077 d = 1,85 h$$

Paso 9. Como se mencionó anteriormente, se consideró el biorreactor como un reactor biológico continuo que opera bajo régimen estacionario y mezcla completa. A continuación, a nivel cinético, el balance de masas de sustrato que entra y abandona el biorreactor se escribe de la siguiente forma:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Velocidad neta} \\ \text{de} \\ \text{cambio en el reactor} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Velocidad a la} \\ \text{que el sustrato} \\ \text{entra en el reactor} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Velocidad a la que} \\ \text{el sustrato abandona} \\ \text{el reactor} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Velocidad a la que el} \\ \text{sustrato se oxida} \\ \text{en el reactor} \end{array} \right\}$$

Bajo este régimen estacionario la concentración de sustrato permanece constante en el reactor, por lo tanto, la velocidad neta de cambio en el reactor se hace cero. Sustituyendo cada una de las variables del balance anterior se tiene:

$$0 = Q_F * DBO_F * -Q_e * DBO_e - \left(\frac{dS}{dt}\right) * V_r \quad (\text{Ec. 5.23})$$

Como se consideró que el sustrato está expresado en MLVSS, la velocidad de consumo de sustrato presente en el reactor estará definida mediante:

$$q = \frac{1}{X_{Va}} * \left(\frac{dS}{dt}\right) \quad (\text{Ec. 5.24})$$

Despejando (dS/dt) y combinando las ecuaciones (5.23) y (5.24), tenemos:

$$q = \frac{1}{X_{Va} * V_r} * (Q_F * DBO_F - Q_e * BBO_e) \quad (\text{Ec. 5.25})$$

Aplicando que el consumo de sustrato sigue una cinética de primer orden:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right) = K * DBO_e \quad (\text{Ec. 5.26})$$

Sustituyendo la ecuación (5.26) en la ecuación (5.24) para luego igualarlas con la ecuación (5.25), se tiene:

$$\frac{1}{X_{Va}} * K * DBO_e = \frac{1}{X_{Va} * V_r} * (Q_F * DBO_F - Q_e * BBO_e) \quad (\text{Ec. 5.27})$$

Debido a que la concentración de MLVSS en el equilibrio (X_{va}) está fijada por una operación específica de reactor continuo, la relación K/X_{va} es una constante que se denotará mediante la letra k , entonces:

$$k = \frac{K}{X_{Va}} \quad (\text{Ec. 6.28})$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (5.27):

$$k * DBO_e = \frac{1}{X_{Va} * V_r} * (Q_F * DBO_F - Q_e * BBO_e)$$

(Ec. 5.29)

Con esto se puede despejar DBO_e obteniendo:

$$DBO_e = \frac{Q_F * DBO_F}{K * X_{Va} * V_r + Q_e}$$

(Ec. 5.30)

Para aplicar la ecuación anterior y determinar la variación de la DBO_5 respecto a la temperatura, se considera que $Q_e \approx Q_F$, esto es debido a que el caudal de purga (Q_w) es bastante reducido a comparación con el caudal del efluente. Entonces la ecuación quedara de la siguiente manera:

$$DBO_e = \frac{Q_F * DBO_F}{K * X_{Va} * V_r + Q_F}$$

(Ec. 5.31)

Donde,

- Q_F : Caudal de entrada de un tanque = 25.920 (m^3/d).
- DBO_F : Demanda biológica de oxígeno en la alimentación = 220 (mg/L).
- X_{Va} : Concentración de microorganismos como MLVSS = 12.000 (mg/L).
- V_r : Volumen del reactor = 2000 (m^3).

- Condiciones de verano

$$DBO_e = \frac{25.920 * 220}{0,027 * 12.000 * 2000 + 25.920} = 8,4 \text{ mg/L}$$

Paso 10. La producción de lodos en el reactor está en función de las condiciones de verano, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta X_v = Y_{obs} * (DBO_F - DBO_e) * Q_F * 10^{-3}$$

(Ec. 5.32)

Donde,

- $Y_{obs} = 0,6/(1+kd*\theta_c) = 0,37$ kg MLVSS/kg DBO_F .
- Q_F : 25.920 m^3/d .
- V_r : 2000 m^3 .
- $DBO_F = 220$ mg/L.
- $DBO_e = 8,4$ mg/L.

$$\Delta X_v = 0,37 * (220 - 8,4) * 25.920 * 10^{-3} = 2331 \frac{kg}{d}$$

Paso 11. Luego para calcular el consumo de oxígeno en la degradación biológica, debe conocer el nitrógeno total Kjeldahl en el caudal de alimentación y en el de permeado (N_F y N_e). Entonces el requerimiento de oxígeno p estará dado por la siguiente ecuación:

$$kg \frac{O_2}{d} = \frac{Q_F * (DBO_F - DBO_e) * 10^{-3}}{f} - 1,42 * \Delta X_v + 4,57 * Q_F' * (N_F - N_e) * 10^{-3}$$

(Ec. 5.33)

Donde,

- $Q_F' = 25.920 \text{ (m}^3/\text{d)}$.

- N_F : Nitrógeno total Kjeldahl en la alimentación

- N_e : Nitrógeno total Kjeldahl en el agua de permeado

-1,42: Factor de conversión para la demanda de oxígeno

-4,57: Factor de conversión para la oxidación completa.

- f = factor de conversión de DBO_5 en $DBO_L = 0,68$

Como se considera que este tipo de procesos permite operar con tiempos de retención celular altos, genera la degradación de los microorganismos de crecimiento lento, por lo que al sustituir los valores con sus condiciones climáticas respectivas se tiene:

- Condiciones de verano

$DBO_F = 220 \text{ (mg/L)}$

$DBO_e = 8.4 \text{ (mg/L.)}$.

$\Delta X_v = 2331 \text{ (kg/d)}$.

$$kg \frac{O_2}{d} = \frac{25.920 * 10^{-3} * (220 - 8,4)}{0,68} - 1,42 * 2331 + 4,57 * 2000 * 10^{-3} * (46,6 - 20)$$

$$kg \frac{O_2}{d} = 7906 \frac{kg O_2}{d}$$

Paso 12. Con el dato obtenido anteriormente se volvió a calcular la potencia requerida de aireación para épocas veraniegas, esto debido a que requiere de mayor oxigenación. Dicha potencia se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P' = \frac{kg O_2/d}{(RT)_{real}}$$

(Ec. 5.34)

Donde,

RT: representa el rendimiento de transferencia de oxígeno (donde se consideró un $RT = 0,854 \text{ kg O}_2/(\text{Cv} \cdot \text{h}) = 20,4 \text{ kg}/(\text{Cv} \cdot \text{d})$)

P' : potencia real de aireación.

$$P' = \frac{7906}{20,4} = 387 \text{ Cv} = 382 \text{ HP}$$

Como se puede observar la potencia obtenida es considerablemente mayor a la obtenida en el paso 3. Por lo tanto, se realizó un ejercicio iterativo en ambas condiciones desde el paso 3 al 13 (sin contar los pasos del 5 al 8), hasta que P concuerde con P'

Utilizando el software Microsoft Excel se realizaron las iteraciones hasta llegar a un valor aproximado, como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 5.16. Iteración valores de diseño, potencia de aireación verano.

P inicial	T _w	DBO _e	ΔX _v	kg O ₂ /d	P' final
246,8571429	15,82538254	8,407547137	2331,097933	7906,134413	387,5556085
387,5556085	15,60230521	8,461029665	2340,197431	7891,174498	386,8222793
386,8222793	15,60605608	8,460127704	2340,044703	7891,425753	386,8345957

Tabla 5.17. Iteración valores de diseño, parámetros biocinéticos, verano.

K (L/mg*d)	K _d (d ⁻¹)	Y _{obs}
0,027180323	0,050982696	0,372256388
0,027004682	0,05044004	0,373766458

Paso 14. A continuación, se realizó el cálculo del caudal de purga. Realizando el balance de materia de sólidos en suspensión en el reactor, se determinó la cantidad en kg/d de los sólidos volátiles en el exceso de lodos, donde el término $Y*(DBO_F - DBO_e) * Q_e$ indica la producción de biomasa por síntesis en el reactor, y el término $K_d * X_{Va} * V$ indica la biomasa perdida por respiración endógena.

$$Y * (DBO_F - DBO_e) * Q_F + Q_F * X_{VF} = Q_W * X_{Vu} + K_d * X_{Va} * V * Q_e * X_{Ve}$$

$$(VSS)_W = Q_W * X_{Vu} = Y * (DBO_F - DBO_e) * Q_F - K_d * X_{Va} * V + Q_F * X_{VF} - Q_e * X_{Ve}$$

$$(VSS)_W = \Delta X_V + Q_F * X_{VF} - Q_e * X_{Ve} = Q_W * X_{Vu}$$

(Ec. 5.35)

Es en este punto donde la presencia de la membrana determina la diferencia en el proceso. Como en los sistemas MBR se utilizan membranas (en este caso de ultrafiltración), la presencia de esta impide el paso de los sólidos en suspensión a través de ellas. Este hecho permitió determinar que la concentración de sólidos en suspensión en el efluente sea prácticamente nula ($X_{Ve} \approx 0$). Por lo tanto, la membrana retiene prácticamente todos los sólidos volátiles en suspensión presentes en el reactor, entonces, se puede considerar que $X_{Va} \approx X_{Vu}$. Con estas consideraciones, aplicándolas en la ecuación (5.35) se tiene:

$$Q'_W * X_{Va} = \Delta X_V + Q'_F * X_{VF}$$

$$Q'_W = \frac{\Delta X_V + Q'_F * X_{VF}}{X_{Va}}$$

(Ec. 5.36)

Donde,

- $X_{Va} = 12.000$ (mg/L).

- $\Delta X_V = 2340$ (kg/d) (condición de verano)

- $Q'_F = 25.920$ (m³/d).

- $X_{VF} \approx 0$.

- Condiciones de verano.

$$Q'_W = \frac{2340}{12.000 * 10^{-3}} = 195 \text{ m}^3/\text{d}$$

Se puede observar cómo Q'_F es indudablemente mayor a Q'_W , corroborando que la aproximación que se hizo en el paso 9 ($Q_e \approx Q_F$), es aceptable.

Paso 15. Con los datos obtenidos, se pudo calcular el caudal del efluente. Realizando un balance global en el tanque de la Figura 5.7, fue posible encontrar dicho caudal de salida utilizando la siguiente ecuación:

$$Q'_e = Q'_F - Q'_W \quad (\text{Ec. 5.37})$$

Donde,

$$-Q'_F = 25.920 \text{ (m}^3\text{/d)}$$

$$-Q'_W = 195 \text{ (m}^3\text{/d)}$$

$$Q'_e = 25.920 - 195 = 25.724,9 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Paso 16. En este paso se realizó el cálculo de la cantidad de sólidos totales en suspensión eliminados. Para esto, fue necesario en primera instancia, realizar un balance de masas de los sólidos en suspensión no volátiles mediante la Figura 5.7, utilizando la siguiente expresión:

$$(NVSS)_W = Q_W * X_{NVu} = Q_F * X_{NVF} - Q_e * X_{NVe} \quad (\text{Ec. 5.38})$$

Donde,

$$-X_{NVF} = 21,4 \text{ (mg/L)}$$

$$-X_{NVe} \approx 0$$

$$-Q_F = 25.920 \text{ (m}^3\text{/d)}$$

$$(NVSS)_W = 25.920 * 21.4 * 10^{-3} - 25.778,5 * 0 = 554,6 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Sabiendo que $(VSS)_W = Q'_W * X_{Vu}$ y que $Q'_W = 195$ más la consideración de que $X_{Vu} \approx X_{Va}$ (la membrana retiene todos los sólidos volátiles en suspensión).

$$(VSS)_W = 12.000 * 195 * 10^{-3} = 2340 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Luego, conociendo $(NVSS)_W$ y $(VSS)_W$ se determinó los sólidos totales en suspensión eliminados.

$$(TSS)_W = (VSS)_W + (NVSS)_W \quad (\text{EC. 5.39})$$

$$(TSS)_W = 2894,7 \text{ kg/d}$$

Paso 17. En este paso se calculó la DBO_e real, para las condiciones generales climáticas, sabiendo que $Q_e = 25.724,9 \text{ m}^3\text{/d}$ calculado anteriormente y utilizando la ecuación (5.30), se obtuvo:

- Condiciones de verano.

$$DBO_e = \frac{25.920 * 220}{0,027 * 12.000 * 2000 + 25.724,9} = 8,46 \frac{mg}{L}$$

Paso 18. Calculo edad del lodo iterada.

- Edad de lodos.

$$\theta_c = \frac{V * X_{Va}}{Q_W * X_{Vu} + Q_e * X_{Ve}}$$

(Ec. 5.40)

Donde,

- θ : Edad del lodo (d)

- V_r : 2000 (m³)

- Q_W : 195 (m³/d)

- $X_{Vu} \approx X_{Va}$

- $X_{Ve} \approx 0$

$$\theta_c = \frac{2000}{195} = 10,2 d$$

Se puede observar que debido a la iteración realizada las nuevas condiciones de lodos son 10,2 días.

Paso 19. A continuación, se calculó la cantidad de difusores a utilizar.

Para esto, en primera instancia, es necesario conocer las necesidades reales de oxígeno que se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$NO_R = \frac{NO_T}{K}$$

(Ec. 5.41)

Donde,

- NO_T : necesidad teórica de oxígeno kgO₂/d (determinada en el paso 11).

- K : capacidad de transferencia de oxígeno del sistema de aireación

$$K = K_{T1} + K_{T2} + K_{T3}$$

(Ec. 5.42)

- Coeficiente K_{T1} : La aportación de oxígeno es proporcional el déficit de saturación.

$$K_{T1} = \frac{C'_s - C_x}{C_s}$$

(Ec. 5.43)

Donde,

- C_x : concentración media de oxígeno en tanque de aireación (3 mg/L con nitrificación)

- C_S : saturación en agua clara a temperatura T y a presión atmosférica (que, según Gonzales, L (2007). En nuestro caso con una temperatura $15,8 \approx 16$ °C $C_S = 9,95$).

- C'_S : concentración de saturación en el tanque de aireación a la temperatura T

$$C'_S = C_S * \beta * C_p * C_A = 10,7 \quad (\text{Ec. 5.44})$$

Donde,

- β : relación de las materias en suspensión y salinidad que en condiciones normales es $\beta = 0,98$

- C_p : variación de presión debida a la altitud (en este caso la altitud es 0 por lo tanto $C_p = 1$).

- C_A : corrección de la altura del agua en el tanque de aireación

$$C_A = \frac{10,33 + 0,238 * (4) \text{Altura}_{\text{tanque}}}{10,33} = 1,109 \quad (\text{Ec. 5.45})$$

Conocido estos factores remplazamos en la ecuación (5.43) y se obtuvo:

$$K_{T1} = \frac{10,7 - 3}{9,95} = 0,776$$

- Coeficiente K_{T2}

La velocidad de disolución de oxígeno varia con la temperatura según

$$K_{T2} = 1,024^{(T-10)} \quad (\text{Ec.46})$$

Conociendo que la temperatura es de $15,8^\circ\text{C}$ se calculo

$$K_{T2} = 1,024^{(15,8-10)} = 1,147$$

- Coeficiente K_{T3} : Sistema de aireación

Tabla 5.18. Valores de coeficiente K_{T3} (González, 2006)

Sistema de aireación	K_{T3}
Aire con burbujas finas	
• Carga sin nitrificación	0,55
• Carga con nitrificación	0,65
Aire con difusores estáticos	0,80
Turbinas de aireación	0,90
Aire con burbujas gruesas	0,90

Para este sistema se utilizó un sistema de aireación con burbujas gruesas, entonces aplicada en la ecuación (5.42), se obtuvo:

$$K = 0,776 * 1,147 * 0,90 = 0,80$$

Luego, se aplicó dicho valor en la ecuación (5.41), obteniendo:

$$NO_R = \frac{7.891}{0,80} = 9840,9 \frac{kgO_2}{d}$$

Calculado las necesidades reales de oxígeno se calculó la cantidad de aireación la cual se obtuvo utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{air} = \frac{NO_{real}}{K * Ef} \quad (\text{Ec. 5.47})$$

Donde,

-K: KgO₂/m³ reactor en condiciones normales. Utilizando un valor de 0,3 por (González, (2007).

-Ef: Eficiencia del difusor. Utilizando una eficiencia estándar de transferencia de oxígeno para difusores de tubo rígido, Ef = 30% que con un caudal que van de 4,07 a 6,8 m³/h*difusor, según González, L. (2007).

$$Q_{air} = \frac{9840,9}{0,3 * 0,3} = 109.343 \frac{m^3 \text{aire}}{d}$$

Calculado la cantidad de aire requerido se determinan la cantidad de difusores, esto mediante la siguiente expresión

$$N_{difusores} = \frac{Q_{aire}}{Q_{unitario/difusor}}$$

Adaptando un valor de 6 m³/h*difusor * 24 d, se obtuvo que:

$$N_{difusores} = \frac{109.343}{6 * 24} = 759 \text{ difusores}$$

Paso 20. Finalmente, se calcularon algunas eficiencias del proceso como:

- Porcentaje de conversión de las membranas

$$Y_c = 100 * \frac{Q_e'}{Q_F'} \quad (\text{Ec. 5.48})$$

Donde,

-Y_c = Porcentaje de conversión de las membranas (%).

-Q_F' = 25.920 (m³/d).

-Q_e' = 25.724,9 (m³/d).

$$Y_c = 100 * \frac{25.724,9}{25.920} = 99,2\%$$

- Eficiencia en eliminación de la DBO en el Biorreactor de membrana.

$$\eta_T = \frac{DBO_F - DBO_e}{DBO_F} * 100$$

(Ec. 5.49)

Donde,

- η_T = Eficiencia de eliminación de la DBO en el MBR.

- DBO_F = 220 (mg/L).

- DBO_e = 8,46 (mg/L) (condición de verano).

- condición de verano

$$\eta_T = \frac{220 - 8,46}{220} * 100 = 96,15\%$$

5.4 Estimación de los costos de implementación y operación.

A continuación, se realizan los costes de inversión de la implantación de un MBR con la unidad de membranas de UF con el fin de establecer el coste inicial del proyecto. Cabe destacar que estos valores fueron obtenidos mediante contacto directo con profesionales del sector sanitario, los cuales facilitaron al estudiante una serie de cotizaciones de proyectos similares de años anteriores, los cuales fueron reajustados a lo diseñado en este trabajo de título. En los anexos 1, 2, 3 y 4 se encuentran los datos de los cuales se realizó un estimado de los costos presentados a continuación.

5.4.1 Costos de Inversión

- Costes de reactor y unidad de membrana

Para los costes del reactor biológico se tendrá en cuenta los elementos principales, difusores, bombas, obra civil.

Tabla 5.19. Costo neto del reactor biológico

Reactor biológico	
Excavación masiva y obras civiles (hormigón, acero, compuertas, barandas, escaleras, etc.)	12.000 UF
Referente a difusores	Difusores de burbuja
Costos de 900 difusores.	4.600 UF
Referente bombas	Alimentación y succión
Ajustado de bomba de 200 l/s a 300 l/s H: 4 m.c.a	
Costo total (2 op + 1 rep)	3.700 UF
Soplador turbo (1 op + 1 rep)	3200 UF
Bomba de purga (op + 1 rep)	200 UF
tuberías + válvulas (10% del Obras civiles)	1.200 UF
COSTO TOTAL	24.900 UF

- Unidad de membrana

Para los costes de la unidad de membrana se han tomado los elementos principales que intervienen en el proceso, así como un coste aproximado de estos.

Tabla 5.20. Costo neto unidad de membrana

MBR de ultrafiltración	
Modelo	Vocee
Tanques de membrana (x3)	820 UF
N° de cassette x tanque	20
Costo de cada cassette	380 UF
Costo total de elementos (mas 30% de cargo por importación)	29.640 UF
Tanque de limpieza (40% total tanques de membrana)	328 UF
Coste de tuberías + válvulas (30% total tanques de membrana)	246 UF
Bomba	1300 UF
COSTO TOTAL	32.334 UF

- Costos de capital

Para realizar el cálculo de los costes de capital se analizó por un lado los costes de capital directos y por otra parte los costes de capital indirectos, siendo el porcentaje 74-25% respectivamente. El coste total de capital es 87359 UF.

Tabla 5.21. Costes de capital directos e indirectos

Costos de capital directos (construcción)		
Equipos reactor biológico	24.900 UF	28,5 %
Equipos de membrana	32.334 UF	37%
Sistema eléctrico e instrumentación (30% de equipos reactor biológico)	7470 UF	8,5%
Costos de capital indirectos (construcción)		
Ingeniería del proyecto, costos dueño, seguros, permisos, etc. (35% de los costos directos)	22646	25%
Total, costos de capital (inversión)	87359 UF	100%

5.4.2. Costos de Operación y Mantenimiento

- Costos de energía.

Se considera que el costo de la energía se pagara como empresa, donde su valor ha varia constantemente Comisión Nacional de Energía, (2020) (80 US/MWh – 100 US/MWh), por lo que se decidio utilizar un valor intermedio entre estas. Considerando que las dos bombas operaran 12 horas diarias con una potencia de 25 kW (0,025 MW) cada una; que la bomba de purga funcionara 18 horas diaria con una potencia de 10 kW (0,01 MW) y que el soplador funcionara 24 horas, con consumo variable, mediante una potencia de 400 kW aprox (0,4), a continuación, se presentan los costos requeridos por consumo eléctrico anual estimados.

Tabla 5.22. Costos por consumo eléctrico anual.

Costos por consumo eléctrico	
Potencia Total (MW/h)	10,38
Consumo anual de energía (MW/h)	89.683,2
Costo por consumo eléctrico (US\$/MWh)	90
Costo Total Anual en UF	208.081,65 UF

- Costos anuales de operación y mantención

Respecto a los costos de operación y mantenimiento, se tienen en cuenta por un lado los costes variables siendo 94,4% del total y los costes fijos que son el 5,59% restante.

Tabla 5.23. Costos anuales de operación y mantención.

Costos Variables		
Energía	208.081,65 UF	88,7%
Productos químicos	100 UF	0,04%
Reemplazo de membranas Considerando que se requerían 3600 membranas de reemplazo, de 110 USD cada una (con un factor de 30% por importación).	13.271,46 UF	5,77%
Costos fijos		
Mano de obra	5.188,8 UF	2,21%
Vigilancia ambiental	19,69 UF	0,008%
Mantenimiento	45,13 UF	0,019%
amortización de la inversión (vida útil de 10 años del proyecto)	7.862,31 UF	3,42%
Costo total anual de O&M	234.569 UF	100%

6. Discusión

Las tecnologías tratamiento por membranas han sido un avance significativo en lo que tratamiento de aguas respecta, ya sea para la producción de alimentos, producción de agua potable extrayendo agua de los océanos o para el tratamiento de aguas servidas entre otras aplicaciones. Este último ha causado mucho interés a través de los años, debido a que ha permitido disminuir los costos de producción, generar un agua de alta calidad o disminuir los espacios requeridos para el tratamiento. Si bien, en un principio el uso de estas tecnologías se veía limitado, debido a sus elevados costes de inversión y operación o también por la ignorancia de las ventajas potenciales que poseían estas en el tratamiento de aguas servidas, a través de los años se han desarrollado nuevas generaciones de membrana más productivas y menos costosas.

Existen diferentes tipos de membranas, en donde la elección de cual se requiere dependerá de las condiciones de agua a tratar y del uso que se le quiere dar luego del tratamiento. En este caso se evaluaron cuatro tipos de membrana en donde su principal diferencia estaba en su capacidad de filtración y la presión que utilizan, diferencias que son indispensables para definir cual seleccionar. En definitiva, la membrana que mejor se adapta a las condiciones requeridas (uso de riego), es la de ultrafiltración (UF) principalmente por su capacidad de filtración, capacidad de retro lavarse y costes más reducidos. Si bien, se pudo elegir una membrana de microfiltración (MF), ya que tiene casi las mismas capacidades que la UF, hubo un factor que generó el descarte de esta, esto es, la incapacidad de retener la carga viral provenientes de las aguas servidas, esto implica incluir obligatoriamente una cámara de contacto capaz de disminuir dicha carga utilizando desinfectantes (como gas cloro), componentes que pueden afectar a los cultivos. En el caso de la Nanofiltración (NF) y Osmosis Inversa (OI), sus principales desventajas para implementarlas son: su extremada capacidad de filtración (capaces de retener solidos disueltos), donde uno pensaría que es útil tomando en cuenta que la NCh1333/78 donde más énfasis le da es a la salinidad, esto es en condiciones elevadas de sales, que no es el caso de las aguas servidas de origen domestico (las cuales poseen una conductividad eléctrica óptima para riego), incluso podría afectar a los cultivos al producir aguas con una acidez muy elevada (lo que se tendría que mitigar añadiéndole sales al efluente); su elevado costo de inversión, ya sea por sus altos costos energéticos (OI más que NF) o su bajo flujo de permeado (alto flujo de rechazo), requiriendo mayor cantidad de membranas; sus impactos ambientales, una OI genera un alto nivel de rechazo y como su principal es retener sales, se genera un gran volumen de concentrado de sales y productos químicos (salmuera), la cual debe ser manipulada con cautela debido a sus características, teniendo que implementar un buen sistema de gestión de dichos residuos. Tomando todo esto en cuenta, se decidió utilizar un reactor biológico combinado con un sistema de filtración con membrana de ultrafiltración denominado biorreactor de membrana (MBR) esto debido a sus múltiples ventajas.

En el diseño de un biorreactor de un sistema MBR es necesario tomar en cuenta una serie de factores. Se definió por utilizar un biorreactor de membrana sumergido principalmente por su capacidad de disminuir el espacio requerido, esto debido a que sustituye a las unidades de sedimentación primaria y secundaria, a su vez permite eliminar la recirculación de lodos, facilitando el proceso de diseño. La aireación dentro de

los reactores no solo proporciona el mantenimiento de la biomasa, también contribuye a la formación de un flujo cruzado turbulento sobre la superficie de la membrana, lo que ayuda a reducir la acumulación de materia en la superficie de esta, incrementando el ciclo operacional del sistema (donde el ensuciamiento de la membrana es un factor indispensable al momento de elegir su configuración), además que estos procesos normalmente cuentan con sistema de retro lavado utilizando parte del agua permeada y ocasionalmente con soluciones químicas (cuando se requiere limpiar incrustaciones dentro de la membrana). Se seleccionó un módulo de fibra hueca, esto por sus considerables ventajas a comparación de sus contrapartes, como son densidad compacta, demanda energética, caída de presión, volumen extraído o el coste del módulo. Al encontrarse sumergida en el reactor, utilizar un difusor de burbuja gruesa es la mejor elección, ya que proporciona un sistema de limpieza continuo en la membrana debido a la fuerza transversal de barrido que produce el flujo cruzado (razón por la cual se seleccionó este tipo de flujo), además de ser menos costoso que difusores de burbuja fina. Es importante mencionar que en estos procesos las necesidades de oxígeno son mayores debido a que opera con edades de lodos elevadas, lo que un aumento en el flujo de aireación ayuda a disminuir la producción de lodos.

Aunque en este trabajo de título no se tomó en cuenta la línea de lodos, es importante realizar una buena gestión de estos. Si bien los sistemas MBR se caracterizan por producir menores volúmenes de lodos que un tratamiento biológico convencional, la envergadura de este proyecto implica la generación de volúmenes de lodos no despreciables, es por esto por lo que recomendaría utilizar algún tipo de tratamiento de lodos. Debido a las condiciones climáticas y al poco espacio que cuenta PTAS Loma Larga, no es posible realizar este tratamiento mediante lechos de secado o canchas de secado, es por esto por lo que la mejor opción sería que, seguido de un espesador de lodos, se introdujese un mecanismo de deshidratación mecanizado como un centrifugador mecánico. Esto con el propósito de cumplir con lo requerimiento del Decreto Supremo n° 4/2009, y darles las condiciones de un lodo clase A o B dándole la capacidad de ser vertidos en suelos degradados y así favorecer el desarrollo del medio ambiente.

Uno de los limitantes de diseño del sistema MBR es el reducido espacio con el que cuenta PTAS Loma Larga (4000 m²), el cual está dispuesto para las diferentes instalaciones y equipos que deberán ser implementados para el desarrollo de este proyecto (pretratamiento, reactor MBR, tratamiento de lodos, oficinas, etc.). Por lo que se optó por diseñar un reactor de 500 m² ocupando un 12,5 % del espacio disponible (sin contar el espacio que requieren las demás infraestructuras). Para determinar la disposición de todos los equipos se requerirá de un trabajo arduo, lo cual no es muy factible, con esto en mente, considerando que parte del volumen es proveniente de la localidad de Quilpué, se podría realizar la instalación del proyecto en ese sector, donde si existen espacios disponibles, además que, si el objetivo principal es dirigir las aguas tratadas a un sistema de almacenamiento en la comuna de Casablanca, existirá una importante disminución en los costes de implementación considerando las distancias entre las dos localidades.

Otra limitante para el diseño del sistema son los elevados costos de operación y mantenimiento, lo que incrementar la envergadura del proyecto implicaría un aumento considerable de estos costos por lo que se deberían realizar más evaluaciones para determinar su factibilidad.

Existieron una serie de dificultades para la realización de este proyecto, con relación a identificar las ecuaciones que satisfagan con el diseño del sistema MBR, pero en mayor medida, fue la complejidad en obtener los costos para implementar este proyecto. Esto se debe a que, si bien, se intentó contactar con diferentes proveedores, estos no tenían mayor interés en facilitar cotizaciones debido a que estas eran para un trabajo de título y no a una cotización para un proyecto real.

Por esto, mediante un contacto directo con trabajadores del sector sanitario (cercano al estudiante), se le facilitó información de proyectos de años anteriores, similares al de este trabajo. Dichos proyectos poseían dimensiones y equipos diferentes a los necesarios en el presente trabajo, por lo que el estudiante debió realizar modificaciones y reajustes a los costos entregados. El reactor biológico fue reajustado de un proyecto donde se diseñó un reactor de 5000 m^3 , el cual se adecuó a un reactor de $2000 \text{ m}^3 \approx 1929 \text{ m}^3$; El tipo de bombas utilizadas son especiales debido a la gran cantidad de volumen que debe impulsar (300 L/s), por lo que se realizó un reajuste de una bomba que era capaz de conducir 200 L/s a 4 metros de altura, lo mismo con los compresores.

Del análisis económico se puede desprender que este proyecto requiere de grandes inversiones para su funcionamiento, lo que generaría dudas sobre su factibilidad. Habría que realizar un estudio económico mas completo, incluyendo indicadores financieros como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), que son indicadores que permitirán evidenciar la verdadera factibilidad económica del proyecto.

7. Conclusión

En el presente trabajo se realizó una evaluación técnico-económica de un sistema de tratamiento avanzado que permita tratar las aguas servidas domésticas provenientes de un emisario submarino en la localidad de Playa Ancha (PTAS Loma Larga), con la finalidad de darles la calidad requerida por la NCh1333/78, cumpliendo también con criterios técnicos económicos y ambientales.

Para esto, en primera instancia, se realizó una caracterización física y química de las aguas que son vertidas por dicho emisario. Estas características fueron obtenidas mediante una adaptación de diferentes fuentes bibliográficas, donde se identificaron concentraciones de DBO_5 , SST, NTK, coliformes fecales, pH, temperatura, etc. Luego se realizó una estimación de la demanda como consumo para riego la cual permitió determinar una necesidad preliminar de la oferta a entregar. Con un consumo de 3000 m^3/ha necesario para la capacidad productiva de vid y, un área cultivada de 5.688,93 hectáreas en la comuna de Casablanca (datos obtenidos por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA), se determinó que la demanda total por parte de los viñedos rondaba los 16,8 MM $\text{m}^3/\text{día}$. Con esta información se dispuso a obtener la oferta de agua por parte de PTAS Loma Larga, que según lo descrito por la Super Intendencia de Servicios Sanitario (SISS), el caudal de entrada a la instalación poseía un caudal medio entre 2.044 y 4.630 L/s (por sus datos de diseño), debido a que dichos caudales son sumamente altos (que influyen en las dimensiones del reactor) y el limitado espacio en PTAS Loma Larga, se estableció que el caudal a tratar correspondería a 300 L/s, equivalente 9,4 MM $\text{m}^3/\text{año}$.

Seguido, se dispuso a realizar una evaluación (bajo los criterios mencionados anteriormente) de cuatro tecnologías de membrana. Recabando información de distintas fuentes, determinando sus características, ventajas y desventajas, identificando las condiciones de espacio y los requerimientos descritos por la NCh1333/78, se determinó que la mejor tecnología a implementar correspondería a una ultrafiltración, la cual posee una porosidad de membrana que ronda desde los 0,1 μm hasta los 0,5 aprox, la cual es capaz de retener todo tipo de sólidos sedimentables, partículas, coloides, virus, bacterias, endotoxinas, entre otros. Identificada la tecnología a utilizar, se definió que el sistema a diseñar correspondería a un biorreactor de membrana sumergida (combinación de un lodo activado con un filtro de membrana), ya que se representan una solución compacta y discreta en lugares que no se cuentan con el área necesaria para la implementación de reactores convencionales, además de ser un proceso altamente eficiente por su alta biomasa activa, baja producción de lodos y su excelente calidad de agua permeada.

Como cuarto paso se realizaron los cálculos de diseño del sistema MBR identificando las operaciones unitarias que intervienen en el proceso. Seleccionando un filtro de membrana de fibra hueca, con trayectoria afuera-adentro, elaborado de PDVF, la cual trabaja en flujo cruzado, de la marca Vocee, que cumple con los requerimientos para el diseño. Mediante diagrama de flujo se identificaron los parámetros y variables que intervienen en el proceso he identificado las consideraciones iniciales se dispuso a determinar diferentes resultados, donde los más importantes fueron: volumen del reactor

2000 m³; Tiempo de retención hidráulica (TRH) de 1,85 horas; producción de lodos estimado de 2340 kg/d; caudal de purga de 195 m³/d, con un tiempo de retención celular comprendida entre los 12 y 10 días; Caudal de permeado (producción) de 25.724,9 m³/d; 2894,7 kg/d de SST eliminados; Caudal de aire requerido de 109.343 m³/d; y por último se calcularon la eficiencia de producción la cual dio un 99,2% y la eficiencia de eliminación de la DBO en el MBR la cual dio un valor de 96,15%.

Finalmente, se dispuso a calcular los costos capitales de inversión, los cuales fueron determinados por los costos netos directos de la construcción del reactor biológico, de la unidad de ultrafiltración y los costos indirectos, considerando ingeniería del proyecto, costos del dueño, seguros, permisos, entre otros. Lo cual dio un costo neto de inversión de 87.359 UF. También se estimaron los costos de operación y mantenimiento, identificando costos anuales estimados de consumo energético, remplazo de membranas y otros, identificando que los costos de O&M corresponderían a 234.569 UF.

8. Bibliografía

Acuatecnica S.A.S. (2018). Tratamiento primario de las aguas residuales. Recuperado el 5 de agosto de 2022, de <https://acuatecnica.com/tratamiento-primario-aguas-residuales/>

Acuatecnica S.A.S. (2019). Tratamiento secundario de las aguas residuales. Recuperado el 5 de agosto de 2022, de <https://acuatecnica.com/tratamiento-secundario-de-aguas-residuales/#:~:text=El%20tratamiento%20secundario%20de%20aguas,eliminaci%C3%B3n%20de%20materia%20org%C3%A1nica%20biodegradable.>

Albarrán, A. Evaluación del potencial reúso de aguas servidas en la agricultura, tratadas mediante lodos activados y humedales construidos bajo diferentes procesos de desinfección. Trabajo de título para optar al título Ingeniero ambiental. Concepción, Chile. Universidad de Concepción, 2017. 14p – 38p.

Alcarria, M. Evaluación tecnológica de la aplicación de reactores de membrana en proceso de tratamiento de aguas residuales. Proyecto de fin de carrera de la Escuela Superior de Ingeniería industrial de Barcelona, España, 2005.

Alibaba.com. (2022). Planta de tratamiento de aguas residuales para uso doméstico, membrana de biorreactor sumergido MBR. Recuperado el 1 de noviembre de 2022, de https://spanish.alibaba.com/p-detail/Submerged-1600467547111.html?spm=a2700.shop_plser.41413.19.60406290gDOnKK

BBVA (2021). Descubre cuáles son las causas de la escasez de agua. Recuperado el 7 de mayo de 2022, de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/causas-de-la-escasez-de-agua/>

Comisión Nacional de Energía. (2020). Anuario Estadístico De Energía. Recuperado el 7 de noviembre de 2022, de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2021/12/AnuarioCNE2020.pdf](https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2021/12/AnuarioCNE2020.pdf)

Cornejo, A. Desarrollo de bases técnicas y plan de mantenimiento periódico-preventivo para montacarga de tipo funicular de 40 toneladas planta loma larga-ESVAL S.A. Memoria de Titulación para optar al título de Ingeniero Mecánico Industrial. Valparaíso, Chile. Universidad Técnico Federico Santa María, 2017. 39p

Carreara, J. Diseño. construcción y modelación de un reactor biológico de membrana (MBR) a escala piloto para la evaluación del tratamiento de aguas residuales de una industria farmacéutica. Trabajo de Tesis para optar el Título de Ingeniero Ambiental y Sanitario, Universidad de LASALLE, Bogotá, 2021.

Carbotecnia (2022). ¿Qué es la osmosis inversa? Recuperado el 16 de octubre de 2022, de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/>

Carbotecnia (2022). ¿Qué es la microfiltración? Recuperado el 15 de octubre del 2022, de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/que-es-microfiltracion/>

Diario Concepción. (2022). Ulrike Broschek: “Un 76% de la superficie chilena está afectada por sequía y suelo degradado”. Recuperado el 7 mayo 2022, de <https://www.diarioconcepcion.cl/economia/2021/03/21/ulrike-broschek-un-76-de-la-superficie-chilena-esta-afectada-por-sequia-y-suelo-degradado.html>

ESVAL S.A. (2022). Tratamiento de Aguas Servidas. Recuperado el 7 de mayo de 2022, de <https://www.esval.cl/personas/agua-y-comunidad/proceso-del-agua/el-proceso-del-agua/agua-servida/>

Fibras & Normas S.A. (2022). Ultrafiltración: Definición, Características, Ventajas y Desventajas. Recuperado el 20 de octubre de 2022, de <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/ultrafiltracion-definicion-caracteristicas-ventajas-desventajas/#Ventajas-y-desventajas>

Fibras & Normas S.A. (2022). La Nanofiltración: Definición, Características, Ventajas y Desventajas, Aplicaciones y usos. Recuperado el 20 de octubre de 2022, de <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/la-nanofiltracion-definicion-caracteristicas-ventajas-desventajas-aplicaciones-usos/>

Fundación Chile (FCH). (2016). Aguas residuales como nueva fuente de agua. Diagnóstico del potencial reúso de aguas residuales en la Región de Valparaíso. Recuperado el 8 de mayo de 2022, de <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/aguas-residuales-como-fuente-de-agua.pdf>

Fundación Chile (FCH). (2020). Cinco medidas para abordar la crisis del agua en la Reactivación Sostenible. Recuperado el 20 de mayo de 2022, de <https://fch.cl/noticias/cinco-medidas-para-abordar-la-crisis-del-agua-en-la-reactivacion-sostenible/>

González, L. Estudio comparativo de un proceso biológico convencional y un proceso mediante biomembranas para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Proyecto de fin de carrera, Universidad de Cádiz, España, 2007.

GIBA (2022). Las aguas servidas y su caracterización. Recuperado el 20 de mayo de 2022, de http://www.eula.cl/giba/proyecto/images/contenidos/educacionambiental/Fichas_1_AS.pdf

Gob.cl. (2022). Plan Sequia. O cuidamos el agua o nos quedamos sin ellas. Conoce las medidas para aumentar su disponibilidad y mejorar la eficiencia de su uso. Recuperado el 8 de julio de 2022, de <https://www.gob.cl/plansequia/>

Leal, M. Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones. México 2022. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado el 10 de junio de 2022, de https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/04_Capitulo_04.pdf

Lenntech. (2022). Micro y Ultrafiltración. Tecnologías de membrana. Recuperado el 15 de octubre de 2022, de <https://www.lenntech.es/micro-y-ultra-filtracion.htm>

Metcalf & Eddy. Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización, 3ª ed., volumen 1 y 2, MCGraw-Hill, 2003.

Ministerios de Obras Públicas (MOP). (1998). Decreto 609, ESTABLECE NORMA DE EMISION PARA LA REGULACION DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS DESCARGAS DE RESIDUOS INDUSTRIALES LIQUIDOS A SISTEMAS DE ALCANTARILLADO. Recuperado el 19 de julio de 2022, de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=121486>

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020). Mesa Nacional de Agua. Primer informe. 16p. Recuperado el 15 de julio de 2022, de https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa_Nacional_del_Agua_2020_Primer_Informe_Enero.pdf

Municipalidad de Casablanca, (2022). Plan Regulador Comunal de Casablanca. Memoria explicativa. Recuperado el 10 de junio de 2022 de https://municipalidadcasablanca.cl/images/Plan_regulador/Memoria_PRC_CasablancaFI_NAL2.pdf

Naciones, U. (2022). Población | Naciones Unidas. Recuperado el 7 de mayo 2022, de <https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=Se%20espera%20que%20la%20poblaci%C3%B3n,de%2011.000%20millones%20para%202100.>

Núñez, T. (2022). Crisis hídrica y racionamiento de agua en Chile: una realidad que llegó para quedarse - Ladera Sur. Recuperado el 7 de mayo de 2022, de <https://laderasur.com/articulo/crisis-hidrica-y-racionamiento-de-agua-en-chile-una-realidad-que-llego-para-quequedarse/>

ODEPA

<https://www.odepa.gob.cl/rubro/vinos/catastro-viticola-nacional>

Peralta, D. (2020). EL RÉGIMEN DE LAS AGUAS SERVIDAS TRATADAS EN CHILE (1ª ed., pp. 17 - 119). Santiago de Chile: EDICIONES JURÍDICAS DE SANTIAGO.

Pire, C. (2019). Las aguas residuales: tipos y características. Recuperado el 10 de junio de 2022, de <https://lacontaminacion.org/aguas-residuales/>

Revista AIDIS. (2016). Especial: Reúso de Aguas Servidas. N°53. Recuperado el 14 de mayo de 2022, de <https://www.aidis.cl/wp-content/uploads/2016/10/REV-AIDIS-DIC-2016.pdf>

Solís, C.A, Velaz, C.A, & Ramírez J.S. Tecnologías de membrana: Ultrafiltración, Entre Ciencia e Ingeniería vol.11 no.22. (2017). Recuperado el 18 de octubre de 2022, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672017000200026#:~:text=Ultrafiltraci%C3%B3n%20\(UF\)%3A%20concentra%20grandes,de%20presi%C3%B3n%20inferiores%201000%20kPa.&text=Nanofiltraci%C3%B3n%20\(NF\)%3A%20separa%20part%C3%ADculas,a%200%2C001%2%B5m%20\(1nm\).](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672017000200026#:~:text=Ultrafiltraci%C3%B3n%20(UF)%3A%20concentra%20grandes,de%20presi%C3%B3n%20inferiores%201000%20kPa.&text=Nanofiltraci%C3%B3n%20(NF)%3A%20separa%20part%C3%ADculas,a%200%2C001%2%B5m%20(1nm).)

Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). (2010). ESTABLECE NUEVO PROGRAMA DE MONITOREO PARA EL EMISARIO SUBMARINO DE LOMA LARGA DE LA EMPRESA ESVAL S.A., DE LA CIUDAD DE VALPARAISO, REGION DE VALPARAISO, ASOCIADA A LA APLICACIÓN DEL CARGO TARIFARIO POR TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS, AUTORIZADO MEDIANTE OFICIO SISS W1120 DE 1999. Recuperado el 18 de mayo de 2022, de http://www.siss.gob.cl/586/articles-5124_RPM_4023_2010.pdf

Super Intendencia de Servicios Sanitario (SISS). (2021). Informe de coberturas sanitarias 2021. Recuperado el 18 de julio de 2022, de https://www.siss.gob.cl/586/articles-19710_recurso_1.pdf

Super Intendencia de Servicios Sanitario (SISS). (2022). Presentación de la nueva Ley de Servicios Sanitarios Rurales se realizó en nueva sesión del COSOC. Recuperado el 15 de julio de 2022, de <https://www.siss.gob.cl/586/w3-article-17988.html>

Super Intendencia de Servicios Sanitarios (SISS), (2022). Sistemas de tratamiento de aguas servidas. Recuperado el 18 de mayo del 2022, de <http://www.siss.gob.cl/586/w3-article-4373.html>

Super Intendencia de Servicios Sanitarios (SISS), (2022). Sistemas de tratamiento de aguas servidas. Recuperado el 18 de mayo del 2022, de <http://www.siss.gob.cl/586/w3-article-4373.html>

Super Intendencia de Servicios Sanitario (SISS), (2022). Norma Chilena NCh1333/1978 - Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Recuperado el 22 de mayo de 2022, de <https://www.siss.gob.cl/586/w3-article-4248.html>

Sustentable S.A. (2022). Reutilización de agua en contexto de sequía: la necesidad de estándares y lineamientos técnicos. Recuperado el 6 de junio de 2022, de <https://www.sustentable.cl/reutilizacion-de-agua-en-contexto-de-sequia-la-necesidad-de-estandares-y-lineamientos-tecnicos/>

Troconis, A. (2010). Tratamiento de Aguas Residuales. 1ra ed. Estados Unidos. 19p – 22p. Recuperado el 15 de mayo de 2022, de https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf

UNESCO, ONU-Agua, (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO.

Valdivielso, A. (2022). ¿Qué es un sistema de Lodos Activado? Recuperado el 7 de junio de 2022, de <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sistema-lodos-activados>

Waterstation. (2020). Ósmosis inversa: ventajas y desventajas. Recuperado el 21 de octubre de 2022, de <https://waterstation.mx/agua-y-salud/osmosis-inversa-ventajas-y-desventajas/>

9. Anexos

Anexo 1. Coste de membranas marca Vocee.

Item 1080m3/h MBR Cassette				
No	Name	Model	QTY	Remark
1.1	MBR membrane module	Material: PVDF reinforced Support tube material: PET Designed flux: 10~15L/m ² .h Single membrane area: 20 m ² Total membrane area:90000 m ² Dimension: 540x2000(mm). Membrane hollow fiber ID/OD (mm) :1.0/2.0 Filter aperture:0.1um Brand: vocee	4500PCS	
1.2	SUS304 Frame	Size: about 3000x1500x2300(mm) Collecting water pipe and membrane aeration are included	75Sets	
Total value:\$1,092,857				

Hay que recordar que se consideró que la porosidad de la membrana correspondería a 0,04 µm, además que el valor presentado este hecho para 75 sets, en este trabajo se reajusta el valor para 60 sets además de aplicarle un factor del 30% correspondiente importación.

Anexo 2. Coste de Bombas de alimentación y succión, marca KSB.

Estimados Señores,

En atención a la referencia, y de acuerdo a lo solicitado por Uds., tenemos el agrado de ofrecer lo siguiente:

Item	Códig	Cantid	UM	Description	Precio Unit	Precio Total
1	000000	3,0	UN	GRUPO ETA R 250-300 G + 15KW 6P	15.090,00	45.270,00

Bomba de carcasa espiral en ejecución de proceso. ENVÍO MARÍTIMO

Sistema 2+1

Q: 392 l/s - H: 4 m.c.a.

Qbomba: 196 l/s - H: 4 m.c.a.

Eficiencia hidráulica: 80%.

Diámetro de rodete: 302.0/271.0/23°/A05 mm.

Materialidad: Carcasa y rodete en fundición gris EN-GJL-250.

Motor: 15kw - IE3 - 400V - 50Hz - 984rpm - arranque tipo Y-D - PT100 en

rodamientos - Caja de conexión adicional.

Incluye:

- PT100 en rodamientos lado bomba y motor.
- Acoplamiento Normex.
- Base Estructural.
- Puesta en marcha.

** Mayor información del equipo en las hojas de datos adjuntas **

Plazo Entrega: 105 DIAS

Hay que recordar que a este valor se le aplico 50% por gastos generales y utilidades, además de duplicar su precio por reajuste a 300 L/s. se asume una potencia de 25kw

Anexo 3. Soplador turbo para aireación.



Soplador turbo marca Turbowin

Tecnología de vanguardia en Sopladores Turbo de alta eficiencia con motor de imanes permanentes y rodamientos que levitan en una lámina de aire.

Modelo	Presión máxima	Potencia máxima	Caudal máximo
WL	1,2 bar	1200 Hp	840 m ³ /min
WHi	2 bar	800 Hp	200 m ³ /min
WHi	4 bar	500 Hp	90 m ³ /min
WHi	8 bar	500 Hp	68 m ³ /min

Como la potencia de oxigenación ronda por los 400 y 500 Hp como referencia se muestra un soplador turbo modelo WHi el cual utiliza como potencia máxima 500 Hp.

Anexo 4. Costos netos del reactor biológico más parrilla de difusores

Construcción de reactor de 5000 m³				
Hormigón G-05, emplantillados	m ³	51	3,731	190,281
Hormigón grado G-25	m ³	1332	3,738	4.979,02
Acero A63-42H	Kg	219950	0,044	9.677,79
Moldajes Planos Tipo 2	m ²	2410	1,227	2.957,07
Curado	m ²	1426	0,032	45,632
Pruebas de estanquidad	Gl	1	695,621	695,621
Impermeabilizante Superficial	Kg	275	0,201	55,275
Escalera metálica de acceso	Gl	2	53,971	107,942
Baranda	m	84	2,098	176,232
Parrilla de piso desmontable	m ²	14	5,571	77,994
Compuerta stop Log L=500 mm	N°	2	49,894	99,788
Compuerta stop Log L=1200 mm	N°	2	64,347	128,694
Excavación masiva	N°	1	529,179	529,179
Costo Total Neto				19.720,52

Parrilla de 1000 difusores				
Suministro de Parrilla de Difusores Reactores Proyectados	GL	1	2.400,82	2.400,82
Transporte, montaje de parrilla de difusores	GL	1	954,352	954,352
Costo Total Neto				3.355,18 UF

Hay que recordar que el valor total del reactor se le aplico un reajuste a las dimensiones del proyecto presentado (2000 m³). En el caso de la parrilla de difusores, se le hizo un reajuste del costo por 900 difusores. A estos costos se les aplico factor 50% por gastos generales y utilidades.

Anexo 5. Solicitud ingresada al Sistema de Atención Ciudadana (SAC).

Superintendencia de Servicios Sanitarios

**Respuesta Folio AM011T0005453– Sr(a). Hernán Nazer Blaset**
Solicitud de información recibida con fecha 28.10.2022:

PARA ELABORACIÓN DE TESIS, NECESITA ANTECEDENTES DE CAUDAL Y CALIDAD DE LAS AGUAS SERVIDAS EFLUENTES DE LA PLANTA LOMA LARGA DE VALPARAÍSO DE LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS.

Respuesta:

De nuestra consideración y en respuesta a su requerimiento, enviamos a Ud. en formato Excel, planilla con caudal y calidad de aguas servidas efluentes de la Planta Loma Larga de la región de Valparaíso de los periodos desde el año 2017 al 2022.

Es importante destacar que estos datos corresponden a lo informado por cada empresa sanitaria y en ningún caso son generados directamente por esta Superintendencia.

Se incluye un archivo con la firma digital del contenido de la entrega, el cual resguarda la consistencia e integridad de ella. Cualquier modificación a los archivos cambiará la firma digital y esta Superintendencia no se hace responsable de ellos.

Para la descarga de archivos comprimidos se recomienda utilizar 7zip (programa gratuito) que se puede descargar aquí: <https://www.7-zip.org/download.html> O utilizar una versión actualizada y licenciada de WinRar.

POR ORDEN DEL SUPERINTENDENTE DE SERVICIOS SANITARIOS

(Según Resolución SISS N° 2576/2021)

Ximena Silva PalmaJefatura Unidad Atención Ciudadana y Transparencia
SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS

2022-11-28 03:53



MVL

Anexo 6. pruebas de caudal de alimentación, mayores a lo determinado en este trabajo de título

$$Q = J_e \left(\frac{m^3}{m^2 * d} \right) * (A_F) * N_M \left(\frac{Modulos}{Cassettes} \right) * N_C \left(\frac{Cassettes}{tanques} \right)$$

(Ec. 5.1)

$$Q = 9.600 \frac{m^3}{d}$$

Donde,

- J_e : Flujo de permeado = 0,4 (m³/ m²*d).
- A_F : Área de filtrado = 20 (m²).
- N_M : Numero de módulos por cassettes = 60.
- N_C : Numero de Cassettes por tanque = 20.
- Q : Capacidad de agua a tratar por tanque.

Conociendo el caudal de agua que se puede tratar por tanque se procede a calcular el número de tanques requeridos, utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_F = N_T * Q \Rightarrow N_T = \frac{Q_F}{Q} = 3,6 \approx 4 \text{ Tanques}$$

[Ec. 5.2]

Donde,

- Q : Capacidad de agua a tratar por tanque = 9.600 (m³/d).
- N_T : Numero de tanques necesarios.
- Q_F : Caudal de alimentación (m³/d).

Caso 1 con un caudal de 0,5 m³/s = 43.200 m³/d

$$Q_F = N_T * Q \Rightarrow N_T = \frac{Q_F}{Q} = 4,5 \approx 5 \text{ Tanques}$$

Caso 2 Caudal de 0,8 m³/s = 69.120 m³/d

$$Q_F = N_T * Q \Rightarrow N_T = \frac{Q_F}{Q} = 7,2 \approx 7 \text{ tanques}$$

Caso 3 Caudal de 1,5 m³/s = 129.600

$$Q_F = N_T * Q \Rightarrow N_T = \frac{Q_F}{Q} = 13,5 \approx 14 \text{ Tanques}$$

Estos valores implican una necesidad de espacio considerables, pensando que cada tanque posee un área de 512 m². También hay que tomar en cuenta que, si bien PTAS Loma Larga cuenta con 4000 m², ha de requerirse espacio no solo para el sistema MBR, ya que se debe incluir el pretratamiento (con todas sus partes), tratamiento de lodos, oficinas, etc.