



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE UN REACTOR ANAERÓBICO DE  
MEMBRANAS PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN RILES  
VITIVINÍCOLAS - CASO CONCHA Y TORO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**ISABELLA TIAN VILLANUEVA GARCÍA**

PROFESORA GUÍA:  
ANA LUCÍA PRIETO SANTA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARÍA ELENA LIENQUEO CONTRERAS  
GONZALO CORREA IRIARTE

SANTIAGO, CHILE  
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: ISABELLA TIAN VILLANUEVA GARCÍA  
FECHA: 13/05/2020  
PROF. GUÍA: ANA LUCÍA PRIETO SANTA

## ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE UN REACTOR ANAERÓBICO DE MEMBRANAS PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN RILES VITIVINÍCOLAS - CASO CONCHA Y TORO

El escenario hídrico en Chile no es alentador, considerando que desde el 2010 el país se encuentra en una situación catalogada como *megasequía* [1] desde la región de Coquimbo hasta la región de La Araucanía. Por otra parte en el sector energético también existen importantes desafíos, según la Estrategia Nacional de Energía 2012-2020, al final de dicho periodo se prevé que Chile tendrá un consumo eléctrico entre 6-7 % mayor, mientras que la ley 20.257 de fomento a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) establece una meta de un 20 % de ERNC en la matriz energética nacional al 2025 [2].

El impacto ambiental de las industrias varía según el rubro y, por ejemplo, una empresa vitivinícola puede llegar a producir 680 mil m<sup>3</sup> de residuos industriales líquidos (RILES) en un año [3]. Las practicas actuales de tratamiento de RILES en Chile hoy no tienen como premisa la sustentabilidad, lo que aleja al país de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la revalorización de recursos o la correcta gestión hídrica.

Es por esto que, dado el escenario nacional, se hace fundamental el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan tratar, reutilizar y reciclar los RILES de diferentes sectores industriales chilenos, cambiando el paradigma del uso de agua, la matriz energética y sostenibilidad empresarial.

Este trabajo presenta la construcción de un reactor anaeróbico de membranas a escala de laboratorio y su operación durante 53 días dividida en 4 condiciones diferentes:

1. Puesta en marcha (sin parámetros definidos)
2. Condición 1: edad de lodos = 2,7 días y tiempo de retención hidráulica = 14 horas
3. Condición 2: edad de lodos = 2,7 días y tiempo de retención hidráulica = 47 horas
4. Condición 1: edad de lodos = 5 días y tiempo de retención hidráulica = 14 horas

Durante la operación se obtuvo una presencia *peak* de hidrógeno en el biogás producido por el sistema de 33,9%, una relación entre la producción de biogás y caudal tratado igual a 133,8 [L biogás/m<sup>3</sup> tratado], una remoción máxima de DQO igual a 47 % en un rango de pH óptimo en el reactor anaeróbico entre 4,5 y 5,5 unidades. En el estudio técnico económico se concluye que un sistema AnMBR a nivel industrial es prefactible al ser más económico que un sistema MBR. Entre las ventajas ambientales de este sistema está la disminución de la huella de carbono de la Viña Concha y Toro S.A. a partir de la generación de electricidad y disminución de la huella hídrica al generar efluentes para la fertirrigación.

*“Sólo después de que las mujeres empiezan a sentirse en esta tierra como en su casa, se ve aparecer una Rosa Luxemburgo, una Madame Curie. Ellas demuestran deslumbrantemente que no es la inferioridad de las mujeres lo que ha determinado su insignificancia histórica, sino que ha sido su insignificancia histórica lo que las ha destinado a la inferioridad”*  
— **Simone de Beauvoir**

*“Donde haya un árbol que plantar, plántalo tú. Donde haya un error que enmendar, enmiéndalo tú. Donde haya un esfuerzo que todos esquivan, hazlo tú. Sé tú el que aparta la piedra del camino”*  
— **Gabriela Mistral**

# Agradecimientos

No puedo empezar este trabajo sin agradecerlo y dedicárselo a mi mamá. Porque nada sería posible sin su apoyo incondicional, su constante motivación y su eterna compañía. A mis hermanos, Diego y Matías. A mi sobrina Florencia y mi sobrino Martín.. A mi papá, mi abuela y toda mi familia.

A Fernanda, por recorrer este camino conmigo. No es el primero; tampoco el último. Gracias por tu infinito amor, compañía y comprensión.

A mi profesora guía, Ana Lucía, por nunca conformarse en su rol de guía. Por confiar en mí desde el primer día que nos conocimos. A mi comisión, María Elena y Gonzalo, por su apoyo y confianza en esta memoria.

Gracias a Vivi, por su cariño y su compañía. A Manuel, que es el artista detrás de este reactor.

A las amigas y amigos que me dio la universidad, por acompañarme y apoyarme en las buenas y en las malas, en los ramos reprobados, los fines de de semestre y las noches de estudio, pero también de disfrutar la vida universitaria: Javi, Cami, Cata, Pau, Coni, Álvaro, Varas, Nati, Diego, Andrea, Ali, Gabriel, Nacho.

A todas y todos con quienes trabajamos durante mis años en Beauchef. Al CEI 2016, especialmente a Guille e Ivonne. Gracias a todos los cursos donde hice docencia, sin duda me llevo los mayores aprendizajes.

A CEUS CHILE le doy las gracias por devolverme todos los sueños maravillosos que la universidad, con su ritmo implacable, me quitó. A Javis, Kevin, Pau, Gaby, Gene, Fabi, Talo, Vicho, Panchi, Alexa y tantas/os más que lo han hecho posible: a nunca dejar de trabajar.

Una mención especial a todas las mujeres de la ingeniería y las ciencias que me han inspirado. A todas las compañeras, profesoras, académicas, profesionales y funcionarias que conocí en mi paso por la universidad. Espero algún día inspirar a más niñas a creerse el cuento y cambiar el mundo.

Finalmente, gracias a todas las oportunidades que se me han abierto en estos años. En este país desigual estudiar sigue siendo un privilegio, y aceptándolo como tal, espero poder devolverlo de la mejor manera y que un día la educación vuelva a ser un derecho.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto chileno de agua y energía . . . . .	1
1.1.1. Disponibilidad de recursos hídricos y fuentes de energía renovable . .	2
1.1.2. Recuperación de agua y energía en efluentes industriales: Industria vi- tivinícola en Chile . . . . .	3
1.2. Tecnologías de tratamiento para la recuperación de agua y energía en efluentes vitivinícolas . . . . .	3
1.2.1. Reactores anaeróbicos . . . . .	4
1.2.2. Reactores anaeróbicos de membrana (AnMBR) . . . . .	5
1.3. Objetivos . . . . .	7
<b>2. Metodología</b>	<b>9</b>
2.1. OE1: Construcción AnMBR . . . . .	9
2.1.1. Tarea 1: Construcción del montaje experimental . . . . .	9
2.2. OE2: Operación del AnMBR . . . . .	12
2.2.1. Tarea 2: Aclimatación del cultivo bacteriano . . . . .	12
2.2.2. Tarea 3: Caracterización y selección del RIL sintético . . . . .	12
2.2.3. Tarea 4: Operación del AnMBR . . . . .	13
2.2.3.1. Mediciones o monitoreo del sistema . . . . .	13
2.3. OE3: Estudio de prefactibilidad . . . . .	14
<b>3. Resultados y discusión</b>	<b>16</b>
3.1. Evaluación del AnMBR . . . . .	16
3.1.1. Puesta en marcha . . . . .	16
3.1.2. Operación continua . . . . .	17
3.2. Estudio de prefactibilidad . . . . .	20
<b>4. Conclusiones</b>	<b>22</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>24</b>
<b>Anexo A. Partes del reactor anaeróbico de membranas</b>	<b>27</b>
A.1. Reactor Anaeróbico . . . . .	27
A.2. Módulo de membranas . . . . .	28
A.3. Bombas peristálticas . . . . .	28
<b>Anexo B. Mediciones continuas</b>	<b>30</b>

Anexo C. Calibraciones de los dispositivos	32
Anexo D. Sólidos volátiles	36

# Índice de Tablas

2.1.	Caracterización RIL sintético . . . . .	12
2.2.	Generación de hidrógeno según tipo de vino y dilución . . . . .	12
2.3.	Resumen condiciones operacionales . . . . .	13
2.4.	Resumen mediciones realizadas a través de métodos analíticos o monitoreo en línea . . . . .	14
3.1.	Promedio de los resultados de la operación del sistema según condición evaluada	17
3.2.	Comparación de costos de inversión y operación en un AnMBR y MBR . . . .	21
3.3.	Beneficios asociados a la producción de hidrógeno del AnMBR . . . . .	21
D.1.	Relación sólidos totales y sólidos volátiles . . . . .	36

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Tecnologías de tratamiento para RILES vitivinícolas . . . . .	4
1.2.	Esquema de un reactor anaeróbico . . . . .	5
2.1.	Esquema reactor anaeróbico de membrana . . . . .	10
2.2.	Montaje experimental reactor anaeróbico de membrana . . . . .	10
3.1.	Resultados de presencia de hidrógeno en el biogás [%], pH del afluente y en el reactor, y <i>mix liquor solids</i> (MLS) en el reactor [mg/L] durante la operación . . . . .	18
3.2.	Resultados de presencia de hidrógeno en el biogás [%], remoción de DQO [%], producción de biogás [mL/día] y <i>mix liquor solids</i> (MLS) en el reactor [mg/L] durante la operación . . . . .	19
3.3.	Resultados de producción de biogás [mL/día], pH del afluente y el reactor [mg/L] durante la operación . . . . .	19
3.4.	Resultados del flux de la membrana [L/h·m <sup>2</sup> ], <i>mix liquor solids</i> (MLS) en el reactor [mg/L] amplificados por 100 y la presión transmembrana (TMP) [bar] durante la operación . . . . .	20
A.1.	Digestor anaeróbico W8-5 Armfield . . . . .	27
A.2.	Esquema módulo de membrana . . . . .	28
A.3.	Bomba de permeado (izquierda) y alimentación (derecha) . . . . .	29
B.1.	Esquema del sistema de medición de biogás producido . . . . .	31
B.2.	Montaje del sistema de medición de biogás producido . . . . .	31
C.1.	Calibración bomba de alimentación a la membrana utilizando tubería 24 en cabezal 15, 24, 35, 36 . . . . .	33
C.2.	Curva de calibración bomba de inyección de gas a la membrana utilizando tubería 14 en cabezal 13, 14, 16, 25 . . . . .	33
C.3.	Calibración bomba de permeado de la membrana utilizando tubería 18 en cabezal 13, 14, 16, 25, 17, 18 . . . . .	34
C.4.	Curva de calibración del sensor de presión en el punto de alimentación de la membrana . . . . .	34
C.5.	Curva de calibración del sensor de presión en el punto de recirculación de la membrana . . . . .	35
C.6.	Curva de calibración del sensor de presión en el punto de permeado de la membrana . . . . .	35
D.1.	Sólidos totales y sólidos volátiles [mg/L] durante la operación del AnMBR . . . . .	37

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto chileno de agua y energía

El escenario hídrico en Chile no es alentador, considerando que desde el 2010 el país se encuentra en una situación catalogada como *megasequía* [1] desde la región de Coquimbo hasta la región de La Araucanía. De acuerdo a los registros de la Dirección General de Aguas (DGA), existen 126 comunas con decretos vigentes de escasez distribuidas desde la Región de Coquimbo a la del Maule [4].

Por otra parte en el sector energético también existen importantes desafíos, según la Estrategia Nacional de Energía 2012-2020, al final de dicho período se prevé que Chile tendrá un consumo eléctrico entre 6-7 % mayor, mientras que la ley 20.257 de fomento a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) establece una meta de un 20 % de ERNC en la matriz energética nacional al 2025 [2]. Esta última medida va además en la línea de los compromisos adoptados por Chile en el marco del acuerdo climático de la 21<sup>a</sup> Conferencia de las Partes (COP21), más conocido como Acuerdo de París, que en materia de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) buscan disminuir un 30 % la intensidad de estas al 2030 [5].

El impacto ambiental de las industrias varía según el rubro y, por ejemplo, una empresa vitivinícola puede llegar a producir 680 mil m<sup>3</sup> de residuos industriales líquidos (RILES) en un año [3]. Las prácticas actuales de tratamiento de RILES en Chile hoy no tienen como premisa la sustentabilidad, lo que aleja al país de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la revalorización de recursos o la correcta gestión hídrica.

Es por esto que, dado el escenario nacional, se hace fundamental el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan tratar, reutilizar y reciclar los RILES de diferentes sectores industriales chilenos, cambiando el paradigma del uso de agua, la matriz energética y sostenibilidad empresarial.

Así, esta investigación propone desarrollar e implementar a escala de laboratorio un reactor anaeróbico de membranas (AnMBR) para extraer hidrógeno de las aguas residuales, con el fin de generar energía y al mismo tiempo disminuir la Demanda Química de Oxígeno (DQO) que es un parámetro de calidad del agua, convirtiendo el efluente en productos inmediatamente utilizables para adicionar un valor económico y ambiental a las aguas residuales.

### **1.1.1. Disponibilidad de recursos hídricos y fuentes de energía renovable**

El escenario de la disponibilidad de los recursos hídricos en Chile es alarmante. Según el Water Resources Institute (2015) [6] Chile será el único país de Latinoamérica con un estrés hídrico extremadamente alto al año 2040 mientras que a octubre de 2019 la DGA ha decretado escasez hídrica en 126 comunas que representan el 15 % del territorio nacional y afecta a más de 940 mil personas [4]. Esto no solo tiene impacto en los derechos humanos de las personas afectadas o en el equilibrio de los ecosistemas, sino que también se ha traducido en un gasto de 8.015 millones de pesos en camiones aljibe para la repartición de agua durante el primer semestre del 2019 [7].

El 44 % de las causas de los problemas hídricos se relacionan con una deficiente gestión del recurso, el 17 % se debe al aumento de demanda del agua, 14 % a la contaminación del agua, 12 % a la disminución de la oferta de agua, 6 % a un daño ambiental de los ecosistemas hídricos y 5 % al alza de la frecuencia de desastres naturales [8]. Ante esta situación, es necesario diversificar el portafolio nacional de agua y fomentar prácticas alternativas, como la reutilización de aguas servidas, que permitirían mejorar el escenario actual de gestión hídrica en el país.

Con respecto a las fuentes de energía, en Chile se define como fuentes de Energías Renovables No Convencionales a la energía eólica, la pequeña hidroeléctrica (centrales hasta 20 MW), la biomasa, el biogás, la geotermia, la solar y la energía de los mares [9]. La anteriormente mencionada Ley 20.257 de Fomento a las Energías Renovables le da un especial valor a este tipo de energías en el país, haciendo fundamental su estudio e investigación, permitiendo impulsarlas de diferentes formas.

A nivel empresarial es destable el caso de Aguas Andinas S.A., encargada del servicio sanitario de la Región Metropolitana. Desde el 2013 opera el sistema de co-generación eléctrica en la Biofactoría Mapocho-Trabal, donde se utiliza el biogás generado como combustible para producir energía eléctrica (que se distribuye en la planta y/o se exporta a la red general del Sistema Interconectado Nacional) y el calor de los motores de cogeneración y sus gases de escape se usan como fuente de energía térmica para los procesos de digestión anaeróbica y de hidrólisis térmica del tratamiento de aguas. Por otra parte, la empresa genera gas natural desde el 2017 gracias a su planta de biometano en la planta de tratamiento La Farfana donde a partir del biogás se produce gas compatible con el gas natural, el que se inyecta directamente en la red de Metrogas para abastecer hogares o taxis propulsados con gas natural vehicular [10].

### **1.1.2. Recuperación de agua y energía en efluentes industriales: Industria vitivinícola en Chile**

La industria vitivinícola es conocida por ser una de las más importantes de Chile, donde el vino es el quinto producto más exportado del país con exportaciones que ascienden a USD \$2.067 millones anuales [11]. Durante los últimos 5 años, las exportaciones de vino han crecido a una tasa anual de 1,5 %, pasando de USD \$1.690 millones en 2011 a USD\$1.850 millones en 2016, mientras que en el mismo período, las importaciones de vino han crecido a una tasa anual de 5,3 %, de USD \$5.330 millones en 2011 a USD \$7.260 millones en 2016 [12]. Los países con mayor producción de vino son Italia, Francia, España, Estados Unidos, Australia, Argentina, Sudáfrica, China y Chile [13], los que además de aumentar sus ventas, buscan mejorar sus procesos, volviéndolos cada vez más amigables con el medio ambiente. Por ejemplo, de las 6 viñas más importantes de Chile (según producción), 5 de ellas cuentan con área o política de sustentabilidad, lo que demuestra el interés de la industria vitivinícola por la sustentabilidad y el medio ambiente.

Dentro de las viñas nacionales, Viña Concha y Toro S.A. es la principal productora de vino de Latinoamérica y tiene presencia a nivel internacional en 140 países. Durante sus más de 130 años, la Viña Concha y Toro S.A. ha sido pionera en la industria vitivinícola, y en temáticas de sustentabilidad e innovación en Chile. En 2017, Viña Concha y Toro S.A. desarrolló e implementó un sistema de reutilización de RILES que usa humedales para tratamiento biológico y reutiliza el efluente como agua de riego en el Fundo Nueva Aurora de la empresa.

## **1.2. Tecnologías de tratamiento para la recuperación de agua y energía en efluentes vitivinícolas**

A nivel nacional e internacional, la mayoría de los sistemas de tratamiento para RILES vitivinícolas utilizan tecnologías que incluyen tratamiento físicoquímico (remoción de minerales y neutralización de pH) y/o biológico (remoción de material orgánico degradable, sólidos en suspensión y materias coloidales). Por ejemplo, en la Viña Concha y Toro S.A. el tratamiento de sus RILES se establece dependiendo de las características del afluente a tratar y de la normativa de descarga vigentes para RILES industriales. Viña Concha y Toro S.A. cuenta con 11 plantas de tratamiento a nivel nacional y sus tecnologías varían desde simples reactores de mezcla para neutralización (Planta Puente Alto, Región Metropolitana) hasta tratamientos más complejos con lodos activados (Planta Pirque, Región Metropolitana) y reactores de membrana (Planta San Javier, VII Región).

Para remoción de materia orgánica en RILES vitivinícolas se utilizan procesos tanto aeróbicos como anaeróbicos. La Figura 1.1 presenta un resumen de algunas de las tecnologías frecuentemente usadas a nivel mundial [14]. Uno de los objetivos principales del tratamiento es la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO), que representa la carga orgánica de dicho efluente. Tanto los procesos aeróbicos como anaeróbicos son altamente eficientes en reducción de DQO; sin embargo, los procesos anaeróbicos tienen como ventaja su potencial de

generación de biogás (i.e.,  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2$ ) y menor generación de lodos, que al estar estabilizados, disminuye los costos de operación.

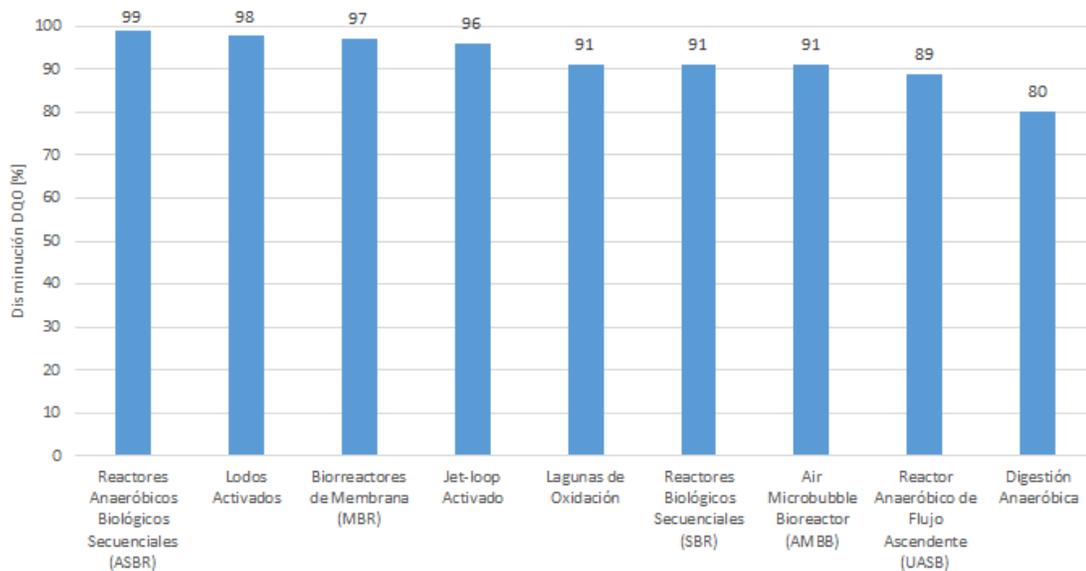


Figura 1.1: Tecnologías de tratamiento para RILES vitivinícolas (Fuente: Adaptado de Mosse et al. [14])

En Chile, la DQO no es un parámetro normativo de calidad de aguas. Es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) el parámetro que es medido y normado; sin embargo, las mediciones de DQO tardan aproximadamente 3 horas mientras que las de DBO tardan 5 días por lo que a nivel de operación es usual hablar de DQO y utilizar una relación para verificar, a priori, el cumplimiento o no de las normas respectivas. En particular para los procesos de la Viña Concha y Toro S.A. se utiliza una relación entre DQO y DBO obtenida en laboratorios certificados, tanto para los RILES que ingresan como los que salen de los diferentes sistemas de tratamientos según planta. Este valor oscila entre 0,6-0,7 para el ingreso y 0,2 para la salida (DBO/DQO) [15].

Las aguas tratadas hoy son descargadas a cuerpos de agua, el mar o suelos; sin embargo su reutilización para regar cultivos tiene varias ventajas, como la utilización de recursos hídricos de bajo costo y una menor necesidad de suplementos de nutrientes [16]. A la actualidad existen estudios de fertirrigación a partir de RILES, por ejemplo reciclaje de aguas residuales provenientes de la acuicultura [17] o aguas municipales [18]. También Etchebarne et al. (2019) estudió la contribución de la fertirrigación de viñas a través de RILES tratados, evaluando el impacto de este tipo de riego en el suelo, el crecimiento vegetativo, el rendimiento y la composición del vino y el jugo de uva [19].

### 1.2.1. Reactores anaeróbicos

Los sistemas de tratamiento anaeróbicos son procesos llevados a cabo por bacterias que trabajan en ausencia de oxígeno transformando la materia orgánica en una mezcla de gases, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono (que se conoce como biogás). Los

productos de la digestión anaeróbica son biogás de elevado poder energético (*lower heating value* LHV a *higher heating value* HHV del metano gaseoso), que puede ser utilizado para la generación de energía (motores de generación) y un lodo estabilizado que es producto del crecimiento microbiano proveniente del proceso de la digestión y de sólidos no digeridos [20]. Un esquema básico del proceso de digestión anaeróbica se presenta en la Figura 1.2.

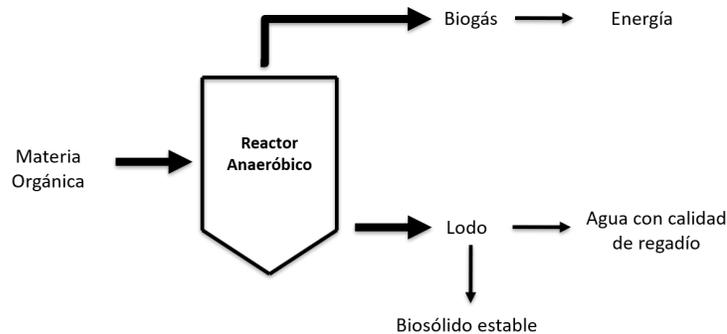


Figura 1.2: Esquema de un reactor anaeróbico (Fuente: Adaptado de [20])

Existen diferencias en las características entre lodos aeróbicos y anaeróbicos que son atribuidas a los diferentes mecanismos involucrados en la biología del proceso. La biomasa del proceso anaeróbico ocurre con baja tasa de hidrólisis y rendimiento (*yield*); así la porción sólida en el reactor está formada principalmente por partículas del afluente que son de bajo tamaño y densidad [21].

Inicialmente los sistemas de tratamiento anaeróbicos sólo se empleaban para el tratamiento de aguas residuales industriales por su alto contenido de materia orgánica, pero su uso se ha ampliado a las aguas residuales también, ya que, los tratamiento aeróbicos no alcanzan la efectividad requerida [22]. De todas formas, los sistemas de tratamiento anaeróbicos no se pueden emplear solos y deben combinarse con procesos aeróbicos (u otros) para alcanzar la calidad requerida para su descarga [23].

### 1.2.2. Reactores anaeróbicos de membrana (AnMBR)

Una membrana aplicada al tratamiento de aguas residuales consiste en un material que permite que algunos componentes físicos o químicos pasen más fácilmente que otros. Por lo tanto, es semipermeable, ya que es más permeable a los constituyentes que lo atraviesan (que luego se convierten en permeado) que a los rechazados por él (que forman el retenido). El grado de selectividad depende del tamaño de poro o material de la membrana [21].

Entre los diseños de biorreactores, la combinación de fermentadores y digestores anaeróbicos con filtros de membranas es una de las soluciones más prometedoras debido a que las membranas en el AnMBR, comparadas con otro tipo de reactores, pueden prevenir la pérdida de biomasa del reactor, permitiendo así el largo tiempo de retención de sólidos (SRT) necesario para un tratamiento eficaz y que al mismo tiempo permita un tiempo de retención hidráulico (TRH) relativamente corto, por lo que la aplicación del AnMBR ha provocado

una mejora significativa en la eficiencia de la producción de biohidrógeno en los procesos de fermentación oscura [24].

El hidrógeno es un combustible que puede producirse a partir de una gran variedad de compuestos y que se puede utilizar en distintos procesos, pero como no se encuentra en su estado puro en la naturaleza, no se puede considerar una fuente de energía primaria y se le conoce como vector energético, teniendo la ventaja de ser altamente almacenable para ser utilizado cuando sea necesario. La importancia del hidrógeno es tal que se espera que durante esta década, el hidrógeno sea un medio indispensable para mitigar el avance del cambio climático [25]. La factibilidad de los sistemas de producción de hidrógeno a partir del tratamiento de RILES aún no se ha demostrado a gran escala, ya que muchas de las tecnologías actuales requieren costosos procesos de pretratamiento de los efluentes o no son capaces de capturar eficientemente el hidrógeno que se produce. Además, el control riguroso del pH, las altas presiones parciales del hidrógeno, la disponibilidad limitada de nutrientes y la competencia entre especies microbianas son a menudo factores limitantes que afectan la implementación de reactores acidogénicos [26].

Noblecourt et. al (2017) desarrolló un reactor anaeróbico con membrana sumergida que permitió una separación de los tiempos de retención celular e hidráulica, alcanzando productividades media y máxima de 0,75 y 2,46 [ $L_{H_2}/L/hr$ ]. Este sistema permitió eliminar los VFAs del medio de cultivo, haciendo que las vías de producción de hidrógeno se favorecieran, confirmando los efectos inhibidores del metabolismo de la acumulación de coproductos en medio de fermentación. Tal productividad de hidrógeno es uno de los valores más altos encontrados en la literatura [27].

Prieto et al. (2016) [28] desarrolló una tecnología que encapsula acetógenos, elimina la necesidad de pre-procesamiento de aguas residuales, y proporciona un mecanismo para la recolección y recuperación inmediata del hidrógeno producido. En este estudio, se construyó y probó una membrana bioactiva multicapa para recuperar hidrógeno de las aguas residuales. La biomembrana está compuesta en su base por un malla de membranas de fibra hueca funcionalizadas con bacterias acidogénicas encapsuladas y fueron probadas en biorreactores a escala laboratorio con una capacidad de 3 litros, utilizando aguas residuales sintéticas y provenientes de la industria láctea y de la betarraga. Bajo condiciones anaeróbicas y pH igual a 4,5-5,5, se observó una recuperación de hidrógeno de  $21,2 \pm 4,8$  mL  $H_2/g$  de hexosa ( $0,16 \pm 0,04$  mol  $H_2/mol$  de hexosa) en aguas residuales sintéticas, lo que corresponde a  $57 \pm 11$  % de la producción total de hidrógeno en el biorreactor. La versión final de la biomembrana se construyó inmovilizando bacterias directamente sobre la superficie de la membrana, lo que mejoró la producción de hidrógeno hasta un máximo de  $48,4 \pm 9,4$  mL  $H_2/g$  de hexosa ( $0,36 \pm 0,07$  mol  $H_2/mol$  hexosa) con una eficiencia de recuperación máxima de  $86 \pm 9$  % . Las biomembranas optimizadas también fueron capaces de generar y recuperar hidrógeno a partir de aguas residuales reales, con producción y eficiencias de recuperación de  $H_2$  de  $19,2 \pm 3,0$  mL  $H_2/g$  de hexosa ( $0,14 \pm 0,02$  mol  $H_2/mol$  de hexosa) y  $99,1 \pm 0,2$  % y  $46,0 \pm 15,5$  mL  $H_2/g$  de hexosa ( $0,34 \pm 0,12$  mol  $H_2/mol$  de hexosa) y  $79 \pm 19$  %, cuando se probaron con efluentes proveniente de los procesos industriales de betarraga e industria láctea, respectivamente. Hasta el momento, este estudio es el primero en reportar la producción/recuperación eficiente de hidrógeno a partir de aguas residuales usando membranas bioactivas.

La tecnología que se propone para el tratamiento de RILES vitivinícolas consiste en un módulo de membrana tubular acoplado a un reactor anaeróbico para la purificación de residuos líquidos proveniente de los procesos industriales de la Viña Concha y Toro S.A. Como effluente modelo se utilizará un RIL sintético que busca simular las condiciones reales de DQO y pH, elaborado a partir de la dilución de vino. Adicionalmente, el sistema generará un biogás rico en hidrógeno, el que tiene un potencial uso como energía limpia, a la vez que produce un effluente rico en nutrientes para el uso inmediato en riego (debido a su baja DQO), logrando aplicar principios de *Waste-to-energy*, economía circular y gestión de recursos hídricos.

### 1.3. Objetivos

El objetivo de esta memoria de título es evaluar la prefactibilidad de un sistema reactor anaeróbico de membranas (AnMBR) para generación de hidrógeno a partir de RILES vitivinícolas. Para esto se definieron los siguientes objetivos específicos:

1. Construir un reactor AnMBR para la recuperación de hidrógeno a escala de laboratorio
2. Evaluar la operación del AnMBR a escala de laboratorio
3. Realizar un análisis de factibilidad tecnoeconómica del AnMBR a nivel industrial, usando como referencia la Bodega Cachapoal de la Viña Concha y Toro S.A.

A partir de los objetivos específicos propuestos para el desarrollo de este trabajo de título, se han planteado tareas que permitirán alcanzar el objetivo general propuesto.

Para la construcción del reactor anaeróbico de membranas para la recuperación de hidrógeno gaseoso, en paralelo al diseño mismo del reactor, se ha realizado la aclimatación de las bacterias *Clostridium butyricum* en RILES vitivinícolas junto a la realización de una serie de pruebas BMP (siglas en inglés para *biochemical methane potential*), estudio que permite determinar la productividad de la generación de hidrógeno gaseoso en función de la concentración de la DQO. Finalmente, con todo lo anterior y junto a la adquisición de equipos, infraestructura y tecnologías se da paso a la construcción del reactor.

Una vez construido el reactor, se pone en marcha el segundo objetivo específico, que consiste en la puesta en marcha y operación de este, que entre sus tareas se encuentra la identificación de las condiciones características y variables medibles del reactor anaeróbico de membrana, para luego comenzar el período de experimentos con diferentes condiciones y tiempo de retención hidráulica (TRH) para obtener las condiciones óptimas de operación del sistema.

En paralelo a lo anterior, se ha llevado a cabo el estudio de prefactibilidad del reactor anaeróbico de membrana a escala industrial ubicado en la Bodega San Javier de la Viña Concha y Toro S.A. para la generación de hidrógeno gaseoso con potencial de generación de energía. En este punto, asociado al objetivo específico 3, se ha realizado un estudio del caso base, es decir, los costos del proceso de tratamiento de RILES sin el uso de la tecnología propuesta. Además, la evaluación tecnoeconómica del reactor anaeróbico de membranas a

gran escala para, finalmente, realizar el estudio de sostenibilidad. Todo lo anterior con el fin de estudiar qué tan eficiente es el uso del rector y sus reales beneficios.

# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. OE1: Construcción AnMBR

#### 2.1.1. Tarea 1: Construcción del montaje experimental

La configuración del reactor anaeróbico de membranas se esquematiza en la Figura 2.1 y consiste en la adaptación de un digester anaeróbico marca Armfield modelo W8-5 (Anexo 1), acoplado a un módulo de membranas. El módulo de membranas consiste en una membrana tubular de fluoruro de polivinilideno (PVDF) de 8 mm de diámetro y 30 cm de largo (Berghof Membranes, Leeuwarden, Países Bajos), con un tamaño medio de poros de  $0,03 \mu\text{m}$ . Esta membrana se fijó a un armazón de PVC, que permite acoplarlo al resto del reactor y realizar el proceso de filtrado, tal como se muestra en el esquema de la Figura A.2. La longitud total del módulo es de 45 cm. La filtración se realiza aplicando presión negativa en el lado del permeado de la membrana con una bomba peristáltica de velocidad variable (Masterflex L/S Standard Digital Pump Systems de doble cabezal, Cole-Parmer , Illinois, Estados Unidos) mientras que las de alimentación son Masterflex L/S Variable-Speed Console Pump Systems.

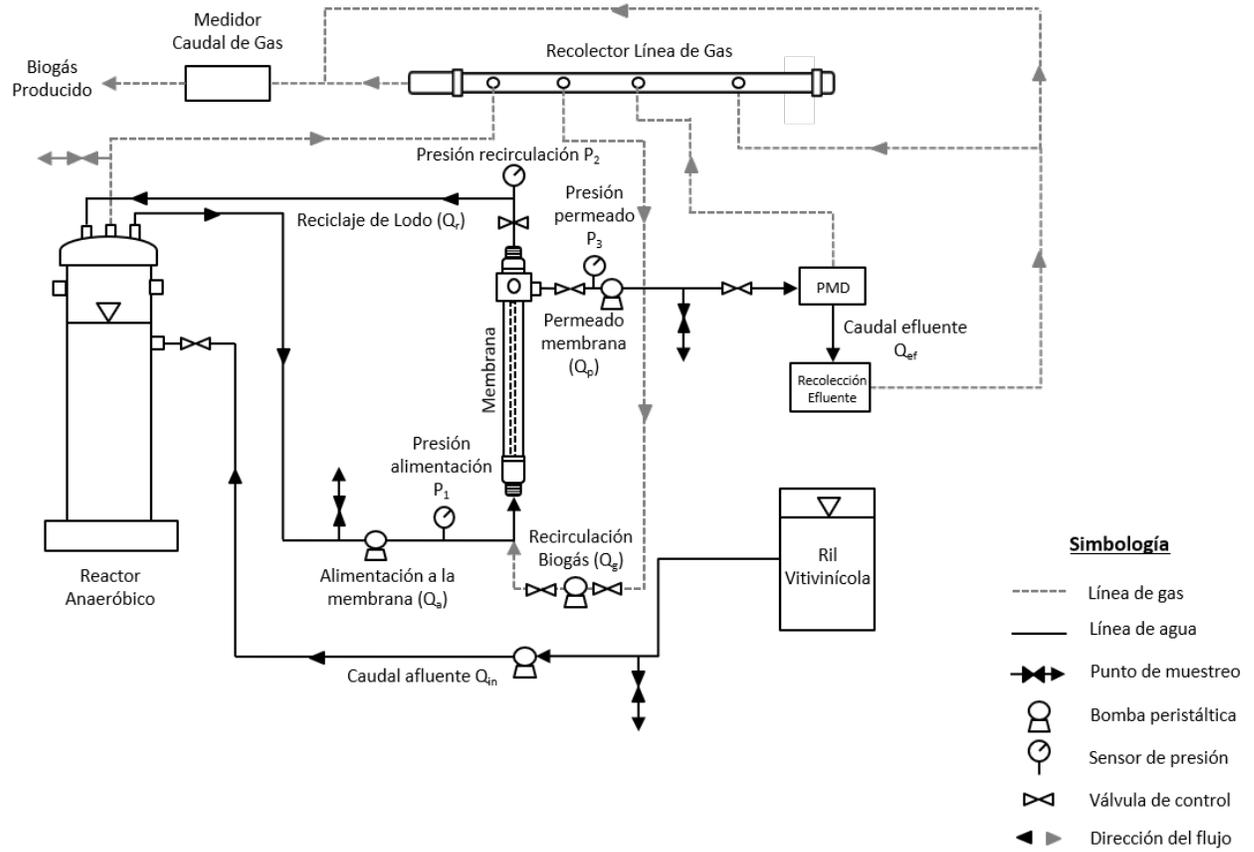


Figura 2.1: Esquema reactor anaeróbico de membrana



Figura 2.2: Montaje experimental reactor anaeróbico de membrana

Los flujos de sistema, indicados en la Figura 2.1 son:

1. Caudal afluente ( $Q_{in}$ ): ingreso del RIL sintético elaborado en el laboratorio
2. Caudal de alimentación a la membrana ( $Q_a$ ): salida del reactor anaeróbico. Este sistema está en mezcla completa
3. Caudal reciclaje de lodos ( $Q_r$ ): flujo que atraviesa el lumen de la membrana y vuelve al reactor anaeróbico
4. Caudal de permeado de la membrana ( $Q_p$ ): fluido (líquido y gaseoso) que atraviesa los poros de la membrana
5. Caudal effluente  $Q_{ef}$ : fluido líquido que es recolectado en la etapa final de la línea de agua del AnMBR

Para realizar el monitoreo continuo del reactor, se establecieron los siguientes dispositivos:

1. Datos en línea: el sistema de monitoreo remoto para registro de datos o *data acquisition system* (DAQ) consiste en una interfaz (HOBO RX3000, ONSET, Massachusetts, Estados Unidos), conectada a un computador a través del software HOBOWare (ONSET, Massachusetts, Estados Unidos). Este sistema recibe datos en línea de los sensores conectados cada 2 segundos, y guarda datos cada 5 minutos.
2. Caudales: para medir el caudal effluente de la membrana ( $Q_e$ ), se usa un pluviómetro en línea (TX2U-IT, The Weather Channel, Georgia, Estados Unidos) conectado al DAQ. Se registra la cantidad de conteos del dispositivo en determinado periodo, y cada conteo representa 2 mL de líquido medido (ver detalle de calibración en Anexo 5.1.4.1).
3. Presiones ( $P_1$ ,  $P_2$ , y  $P_3$ ): se usan 3 sensores de presión (EW-68075-05, Cole-Parmer, Illinois, Estados Unidos) conectado al DAQ, se obtienen datos de voltaje que traducen en valores de presión (ver detalle de calibración en Anexo 5.2.4-6). Con esto se conocen las presiones en el ingreso ( $P_1$ ), recirculación ( $P_2$ ) y permeado ( $P_1$ ) del módulo de membrana.
4. Producción de biogás: el volumen de biogás se mide diariamente con un sistema de desplazamiento de volumen (ver detalle del sistema en el Anexo 5.1.4.3).
5. Temperatura reactor: el reactor Armfield cuenta con un termómetro que mide la temperatura del digestor ( $T_r$ ) y se monitorea visualmente.
6. Temperatura ambiente: se utiliza una sonda de temperatura de aire (S-THB-M008, Onset, Massachusetts, Estados Unidos) conectado al DAQ.

## 2.2. OE2: Operación del AnMBR

### 2.2.1. Tarea 2: Aclimatación del cultivo bacteriano

El inóculo de bacterias acetogénicas es obtenido después de realizar tratamiento térmico (95°C por 40 minutos) a una muestra de lodo proveniente de la digestión anaeróbica de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Para la aclimatación, se preparan botellas serum con 100 mL del medio a estudiar (RIL sintético de vino para este caso). Se elimina el oxígeno de la botella inyectando nitrógeno gaseoso. Las muestras del RIL sintético se inoculan con aproximadamente 2 mL de cultivo bacteriano y se incuban a 37°C por 24 horas.

### 2.2.2. Tarea 3: Caracterización y selección del RIL sintético

Para realizar los experimentos en el laboratorio, se comparan inicialmente soluciones de vino tinto y vino blanco disponibles comercialmente [29].

La caracterización de la DQO de ambos tipos de vino para diferentes diluciones se detalla en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Caracterización RIL sintético

Dilución	Vino Tinto		Vino Blanco	
	DQO Medida [mg/L]	DQO Real [mg/L]	DQO Medida [mg/L]	DQO Real [mg/L]
1:200	1.320	264.000	1.291	258.200
1:500	521	260.500	555	277.500
1:1000	310	310.000	286	286.000
Promedio	<b>717</b>	<b>278.1667</b>	<b>711</b>	<b>273.900</b>

Otro aspecto determinante en la elección del RIL sintético es la presencia de hidrógeno en el biogás producido. Para esto se inoculan 6 muestras de vino tinto y blanco en diferentes diluciones. Los resultados se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Generación de hidrógeno según tipo de vino y dilución

Tipo de Vino	Dilución	Hidrógeno en biogás [%]
Blanco	1:40	17 %
Blanco	1:80	10 %
Tinto	1:80	6 %
Tinto	1:100	4 %
Tinto	1:40	3 %
Blanco	1:100	3 %

A partir de estos resultados y la facilidad en la elaboración de las muestras, se utiliza un RIL sintético elaborado diluyendo vino blanco comercial, ya que presenta una mayor generación de hidrógeno en las botellas serum en comparación al vino tinto, y en proporciones 1:40, para conseguir una DQO entre 6.000 y 7.000 [mg/L] que es la concentración promedio de DQO que caracteriza los RILES de la viña Concha y Toro S.A. [30].

## 2.2.3. Tarea 4: Operación del AnMBR

Para la operación del reactor, se definieron parámetros iniciales de la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Resumen condiciones operacionales

	Parámetro	Fórmula	Unidad	Valor	Justificación	Referencia
Membrana	Diámetro membrana ( $D_m$ )		[mm]	8	Fabricante	
	Área sección transversal ( $A_s$ )	$\pi \cdot (R_m/2)^2$	[mm <sup>2</sup> ]	50	Fabricante	
	Largo ( $L_m$ )		[m]	0,3	Construcción	
	Área filtrado ( $A_f$ )	$2 \cdot \pi R_m \cdot L_m$	[m <sup>2</sup> ]	$7 \cdot 10^{-3}$		
Digestor	Volumen digestor ( $V_r$ )		[L]	3,5	Fabricante	
Condición 1	Velocidad de flujo transversal ( $CFV$ )		[m/s]	0,5	Criterio diseño	[31]
	Tasa de gas a líquido ( $\epsilon$ )	$\frac{Q_g}{Q_g+Q_a}$	[-]	0,1	Criterio diseño	[32]
	Flujo a través de la membrana ( $Flux$ )		[L/h·m <sup>2</sup> ]	40	Criterio diseño	[21]
	Caudal alimentación membrana ( $Q_a$ )	$CFV \cdot A_s$	[mL/min]	1.506		
	Caudal recirculación biogás ( $Q_g$ )	$\frac{\epsilon Q_a}{1-\epsilon}$	[mL/min]	168	$\epsilon$	
	Caudal permeado membrana ( $Q_p$ )	$Flux \cdot A_f$	[mL/min]	4,7		
	Caudal efluente ( $Q_e$ )		[mL/min]	4,2		
	Caudal afluente ( $Q_i$ )	$Q_e$	[mL/min]	4,2		
	Tiempo de retención hidráulica ( $TRH$ )	$V_r/Q_i$	[h]	13,8		
	Edad de los lodos ( $SRT$ )		[día]	2,7	AnMBR ácido	
	Caudal de purga ( $Q_w$ )	$V_r/SRT$	[L/día]	1,3		
Condición 2	Velocidad de flujo transversal ( $CFV$ )		[m/s]	0,5	Criterio diseño	[31]
	Tasa de gas a líquido ( $\epsilon$ )	$\frac{Q_g}{Q_g+Q_a}$	[-]	0,1	Criterio diseño	[32]
	Flujo a través de la membrana ( $Flux$ )	$\frac{Q_p}{A_f}$	[L/h·m <sup>2</sup> ]	13	$Q_p$	
	Caudal alimentación membrana ( $Q_a$ )	$CFV \cdot A_s$	[mL/min]	1.506		
	Caudal recirculación biogás ( $Q_g$ )	$\frac{\epsilon Q_a}{1-\epsilon}$	[mL/min]	168		
	Caudal permeado membrana ( $Q_p$ )		[mL/min]	1,5	Bomba operando	
	Caudal efluente ( $Q_e$ )	$Q_i$	[mL/min]	1,3		
	Caudal afluente ( $Q_i$ )	$\frac{V_r}{TRH}$	[mL/min]	1,3	TRH	
	Tiempo de retención hidráulica ( $TRH$ )		[h]	47	Variación experimental	
	Edad de los lodos ( $SRT$ )		[día]	2,7	AnMBR ácido	[21]
	Caudal de purga ( $Q_w$ )	$V_r/SRT$	[L/día]	1,3		
Condición 3	Velocidad de flujo transversal ( $CFV$ )		[m/s]	0,5	Criterio de diseño	[31]
	Tasa de gas a líquido ( $\epsilon$ )	$\frac{Q_g}{Q_g+Q_a}$	[-]	0,1	Criterio diseño	[32]
	Flujo a través de la membrana ( $Flux$ )	$\frac{Q_p}{A_f}$	[L/h·m <sup>2</sup> ]	13	$Q_p$	
	Caudal alimentación membrana ( $Q_a$ )	$CFV \cdot A_s$	[mL/min]	1.506		
	Caudal recirculación biogás ( $Q_g$ )	$\frac{\epsilon Q_a}{1-\epsilon}$	[mL/min]	168		
	Caudal permeado membrana ( $Q_p$ )	$Flux \cdot A_f$	[mL/min]	1,5	Bomba operando	
	Caudal efluente ( $Q_e$ )	$Q_i$	[mL/min]	1,3		
	Caudal afluente ( $Q_i$ )	$\frac{V_r}{TRH}$	[mL/min]	1,3	TRH	
	Tiempo de retención hidráulica ( $TRH$ )		[h]	47		
	Edad de los lodos ( $SRT$ )		[día]	5	Variación experimental	
	Caudal de purga ( $Q_w$ )	$V_r/SRT$	[L/día]	0,7		

La temperatura del sistema queda determinada por la temperatura ambiente del lugar donde se encuentra reactor. Durante la operación es  $24,174 \pm 0,039$  °C.

### 2.2.3.1. Mediciones o monitoreo del sistema

Para obtener los datos de la operación del reactor se realizan diferentes mediciones analíticas o monitoreos en línea. Estos se resumen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Resumen mediciones realizadas a través de métodos analíticos o monitoreo en línea

Métodos analíticos	Monitoreo en línea
MLS, DQO, pH, cromatografía de gas, producción diaria biogás,	Presiones ( $P_1$ , $P_2$ y $P_3$ ), temperatura ambiente, temperatura digestor, caudal effluente $Q_e$

En cuanto a la composición del biogás se analiza en un cromatógrafo (Autosystem XL, Perkin Elmer, Massachusetts, Estados Unidos) que funciona a través de un detector de conductividad térmica en una columna molecular Sieve 13X donde se toma un volumen de 100  $\mu\text{L}$  de la botella que contiene la muestra y es inyectado para su análisis. Esta botella con la muestra consiste en botellas serum de volúmenes conocidos, selladas y llenas de nitrógeno, a las cuales se les inyecta un volumen conocido de biogás (usualmente 20 mL) extraído de la cabeza de gas del reactor utilizando una jeringa común. El muestreo de biogás se realiza cada dos días por la disponibilidad para el procedimiento de cromatografía y, cabe destacar, que las muestras correspondientes al mes de febrero fueron guardadas hasta marzo debido al receso universitario correspondiente a las vacaciones.

### 2.3. OE3: Estudio de prefactibilidad

La Bodega Cachapoal de la Viña Concha y Toro S.A. está ubicada en la comuna de Peumo, Región de O'Higgins, Chile. Actualmente posee un sistema de tratamiento mediante lodos activados y se ha evaluado migrar a un sistema MBR, similar al utilizado en la Bodega San Javier de la misma viña que está diseñada para tratar un caudal máximo de 400  $\text{m}^3/\text{día}$  con una carga de  $\text{DBO}_5$  de entrada de 4.500 mg/L y tiene como objetivo el tratamiento de los RILES provenientes de los tranques de almacenamiento de la viña [30].

El estudio de prefactibilidad busca realizar un análisis técnico-económico de una AnMBR para el tratamiento de RILES vitivinícolas de la Bodega Cachapoal de la Viña Concha y Toro S.A., teniendo como horizonte de comparación el MBR que hoy es objeto de estudio por parte de la empresa. Con esto, se analizarán las ventajas y desventajas que podría presentar la tecnología, con especial énfasis en el potencial de producción de biogás, la generación de energía a partir del hidrógeno presente en el biogás, el recorte de emisiones de GEI y la generación de efluentes ricos en nutrientes para riego.

El análisis técnico-económico considera los siguientes supuestos:

- Caudal de diseño: debido a que la Viña Concha y Toro S.A. ha considerado migrar a un sistema MBR de 400  $[\text{m}^3/\text{día}]$  similar al de San Javier, se asume este mismo caudal para realizar los cálculos
- Producción de RILES anual: si bien las plantas de tratamiento se diseñan para un determinado caudal de diseño, este no es constante durante todo el año debido a la estacionalidad de los RILES vitivinícolas (mayor generación en periodos de vendimia

que disminuyen el resto del año). Para efectos de cálculos se considerará un caudal anual de producción de RILES igual a 30.000 [m<sup>3</sup>/año], que es el valor producido en la Bodega Peumo de la Viña Concha y Toro S.A. en 2017 [30].

- Consumo eléctrico: el consumo eléctrico de las plantas de tratamiento de RILES no está registrado por la empresa; sin embargo, se han registrado bajos consumos de energía en AnMBR para el tratamiento de aguas municipales, como es el caso de Pretel et al. (2016) donde los autores registran un consumo mínimo de 0,04 [kWh/m<sup>3</sup>] [33]. Asumiendo este valor y considerando el caudal de diseño, el consumo eléctrico para el AnMBR en estudio será igual a 1.200 [kWh/año]
- Producción de biogás: a partir de los resultados de la puesta en marcha del AnMBR a escala de laboratorio se obtiene una relación entre el caudal afluente del sistema y el biogás producido por el mismo. Para efectos del estudio se asume que la relación se mantiene a escala industrial.
- Presencia de hidrógeno en el biogás: se asume que el biogás producido en la planta de tratamiento está compuesto por un 34 % de hidrógeno. Esta decisión se toma en base a que es el mejor rendimiento obtenido en el reactor a escala de laboratorio, lo que se observa en la sección 3.1.1.
- Potencial energético del hidrógeno: se utiliza la energía teórica del hidrógeno equivalente a 3,0 [kWh/Nm<sup>3</sup>] y una eficiencia de transformación a energía eléctrica igual a 40 % [34].
- Emisiones de GEI: el factor de emisión GEI del Sistema Eléctrico General (SEN) es un indicador que corresponde a los valores informados en la Comisión Nacional de Energía (CNE) para la emisión neta de gases de efecto invernadero en todo el sistema. En Chile, para el 2020, el factor es igual a 0,4056 [tCO<sub>2eq</sub>/MWh] [35].
- CAPEX: se considera que las inversiones en bienes capital (CAPEX) son equivalentes a US\$9.360 y US\$8.700 por m<sup>3</sup> tratado en la planta para un AnMBR y MBR, respectivamente, según cotizaciones confidenciales de Concha y Toro S.A. [36].
- OPEX: análogamente, los costos permanentes asociados a la operación de una planta AnMBR se asumen igual a US\$0,7 y US\$5,2 por m<sup>3</sup> tratado para un AnMBR y MBR, respectivamente, según cotizaciones confidenciales de Concha y Toro S.A. [36].

# Capítulo 3

## Resultados y discusión

### 3.1. Evaluación del AnMBR

#### 3.1.1. Puesta en marcha

El inicio de la operación del AnMBR comenzó probando el correcto funcionamiento del sistema circulando agua de la llave por 24 horas. Con esto es posible identificar si existen fugas de líquido y/o gas y que funcionen correctamente los dispositivos (sensores, bombas, pluviómetro). Una vez finalizada la prueba de agua, se introduce el RIL sintético de vino en el reactor junto a inóculo bacteriano. Con el fin de asegurar condiciones anaeróbicas, se inyecta nitrógeno al espacio de gas del sistema.

El sistema se pone a prueba durante 13 días donde los principales problemas que se identificaron y solucionaron fueron:

1. Diferencia de caudal afluente/efluente: esto ocasiona que el nivel del reactor no se mantenga. En un principio se utilizó una bomba peristáltica con doble cabezal con el fin de que el afluente y el efluente fueran iguales. Sin embargo, en la práctica esto no ocurrió y se optó por separar los flujos utilizando una bomba adicional. Esto hace que el sistema sea menos eficiente en términos de consumo eléctrico.
2. Fuga de biogás por el colector del efluente: durante el periodo de prueba se identificó que por la tubería del efluente también salía biogás, el que no se estaba cuantificando. Aquí se optó por cambiar el sistema de recolección del efluente a un tanque con salida al sistema de medición de biogás producido, como se puede ver en el esquema de la Figura 2.1.
3. Líquido en la línea de gas: se identifica que existe una persistente fuga de líquido hacia la línea de gas, lo que genera diferencias de presión en el sistema. Como solución se construyó una línea de gas de menor volumen con el objetivo de evitar que almacene líquido en su interior.
4. Falla en el sistema de medición de volumen de biogás producido: en primera instancia se construyó un sistema para monitoreo en línea del volumen de biogás producido en el sistema usando un *Wet Tip Gas Meter* [37]; sin embargo, el sistema presentó fallas

durante la puesta en marcha, por lo que se descartó este sistema y se reemplazó por el sistema de desplazamiento de volumen presentado en la sección 2.1.1.

5. pH del reactor: para un correcto funcionamiento el pH de la mezcla dentro del reactor debe estar entre 4,5 y 5,5. Sin embargo, durante la puesta en marcha se identifica un pH que llega hasta las 3 unidades, debido a la acidez del RIL sintético de vino. Luego de diferentes pruebas, se opta por agregar 400 mg de Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) por litro de solución afluente para mantener el pH en el rango indicado.
6. Mediciones de cromatografía: como se mencionó en la sección 2.2.4, durante el receso académico de la Universidad de Chile (febrero) las muestras de biogás fueron conservadas para su posterior análisis a través de cromatografía de gases; sin embargo, los resultados obtenidos (que se presentan en la sección 3.1) indican problemas en la conservación del biogás durante este mes.

### 3.1.2. Operación continua

El AnMBR fue operado continuamente durante 53 días. El promedio de la operación para cada condición y parámetro se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Promedio de los resultados de la operación del sistema según condición evaluada

Parámetro	Puesta en marcha	Condición 1	Condición 2	Condición 3
Hidrógeno en el biogás [%]	15,29 ± 11,37	0,96 ± 0,88	1,06 ± 1,01	-
MLS [mg/L]	1.700 ± 1.270	1.600 ± 260	1.273 ± 134	1.339 ± 180
SVT [mg/L]	934 ± 698	879 ± 143	699 ± 74	736 ± 99
Producción biogás [L/día]	-	1.020 ± 166	188 ± 96	265 ± 119
pH afluente [-]	4,68 ± 1,02	6,36 ± 0,83	4,82 ± 0,80	5,26 ± 1,00
pH reactor [-]	5,23 ± 1,07	5,91 ± 0,55	4,73 ± 0,30	5,19 ± 0,62
Remoción DQO [%]	4,00 ± 3,41	11,73 ± 16,12	12,20 ± 8,92	24,14 ± 10,72
Flux [L/h·m <sup>2</sup> ]	13,37 ± 10,35	3,60 ± 5,61	5,38 ± 3,14	1,38 ± 2,03
TMP [bar]	0,95 ± 0,21	1,12 ± 0,12	0,65 ± 0,13	0,91 ± 0,35

Las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 describen la operación durante la puesta en marcha y las condiciones 1, 2 y 3.

La mayor presencia de hidrógeno en el biogás se obtiene durante la puesta en marcha del sistema con un peak de 33,9%. A su vez, durante la condición 1 el mayor porcentaje de hidrógeno se obtuvo el día 21 con 2,4% y para la condición 2 el día 40 con 2,8%. La disminución del hidrógeno presente en la composición del biogás puede atribuirse a los problemas que se presentaron en la continuidad de las pruebas de cromatografía y una posible mala conservación de las muestras, como se menciona en la sección 2.4.

A partir de la curva de MLS de los gráficos (Figura 3.1 y 3.2) se observa que durante la puesta en marcha del sistema existe un aumento sostenido de los sólidos en el reactor, correspondiente al crecimiento de microorganismos en el reactor. Desde el día 13, por el contrario, se observa una tendencia a la disminución, para luego estabilizarse. Esto se debe

a que desde el inicio de la condición 1 se controlan los sólidos totales en el reactor a través de un caudal de purga determinado por la edad de los lodos de cada condición.

Analizando la Figura 3.2 se identifica una clara diferencia entre la producción de biogás entre las diferentes condiciones de operación, siendo aproximadamente 3 veces mayor en la condición 1 (TRH=14 [h]) respecto de la condición 2 y 3 (TRH=47 [h]). Este resultado preliminar indicaría que a menor TRH se tiene una mayor producción de biogás. A pesar de esto, es importante considerar que un menor TRH también significa un mayor caudal afluente o caudal tratado, el que a su vez es aproximadamente 3 veces mayor en la condición 1 con respecto a la condición 2 y 3 (Tabla 3.1). A partir de esto, es posible plantear una relación entre el caudal afluente tratado y el biogás producido igual a 133,8 [L biogás/m<sup>3</sup> tratado] con una desviación estándar de 26,1 (n=35 muestras).

Por otra parte, de la Figura 3.2 se ve que la remoción de DQO del sistema presenta una tendencia al aumento en respuesta a la variación de la edad de los lodos. Se puede identificar que los lodos más jóvenes tienen menor tiempo para degradar los compuestos, mientras que en lodos mayores los microorganismos tienen más tiempo de interacción con el medio, y esto mejora la degradación de DQO. Si bien este rendimiento es bajo en relación a sistemas AnMBR comerciales, UASB (por las siglas en inglés de reactor anaeróbico de flujo ascendente) o SBR (por las siglas en inglés de reactor biológico secuencial), donde las remociones superan el 60% e incluso llegan a 98% [38], este sistema experimental alcanza un 47% de remoción de DQO.

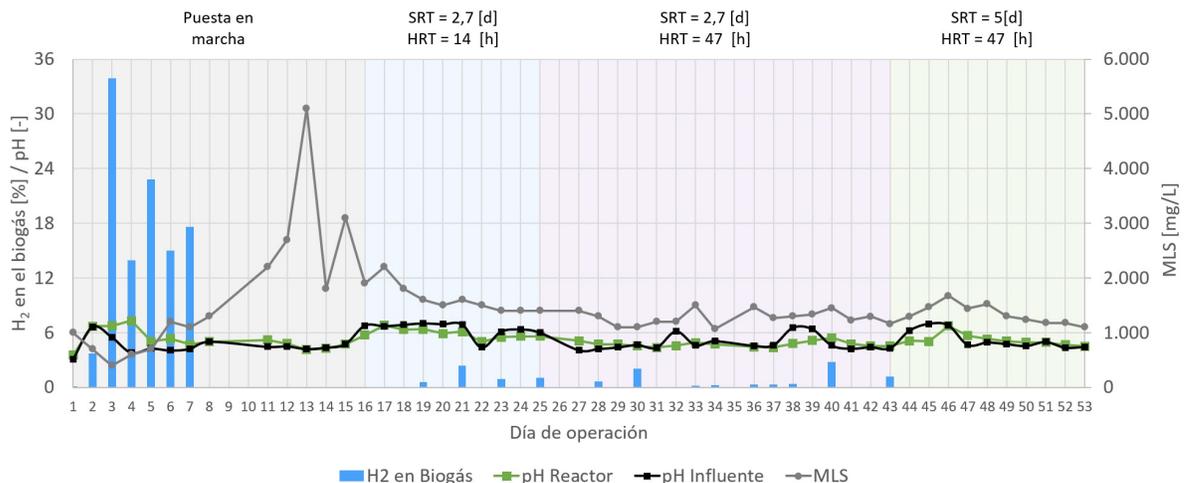


Figura 3.1: Resultados de presencia de hidrógeno en el biogás [%], pH del afluente y en el reactor, y *mix liquor solids* (MLS) en el reactor [mg/L] durante la operación

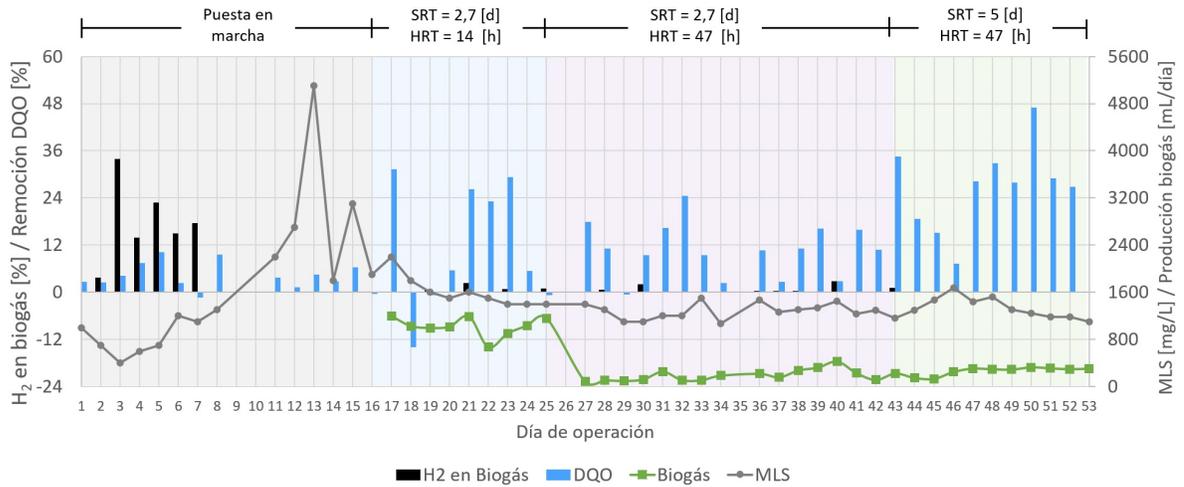


Figura 3.2: Resultados de presencia de hidrógeno en el biogás [%], remoción de DQO [%], producción de biogás [mL/día] y *mix liquor solids* (MLS) en el reactor [mg/L] durante la operación

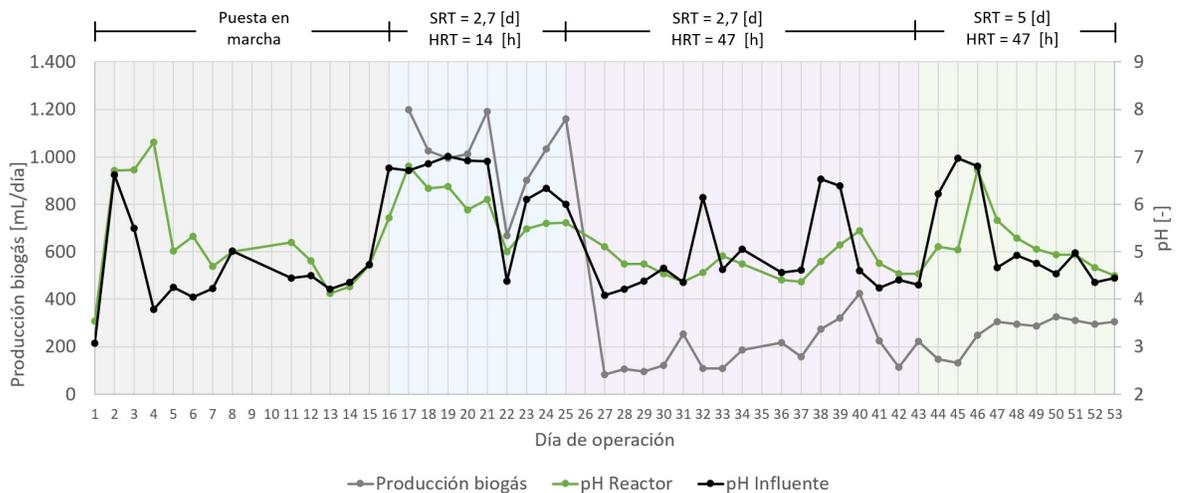


Figura 3.3: Resultados de producción de biogás [mL/día], pH del afluente y el reactor [mg/L] durante la operación

En la Figura 3.3 se muestra la relación experimental que se presentó entre el pH y la producción de biogás, en la cual una disminución del pH trae consigo una disminución de la producción de biogás, siempre y cuando el sistema se mantenga en el rango óptimo de operación (4,5–5,5). También se ve en el gráfico que el pH en el afluente sufre abruptos aumentos, esto se debe a la adición de carbonato para regular el pH del reactor, el que a su vez tiende a disminuir más rápidamente debido a la acción de los microorganismos durante la acetogénesis.

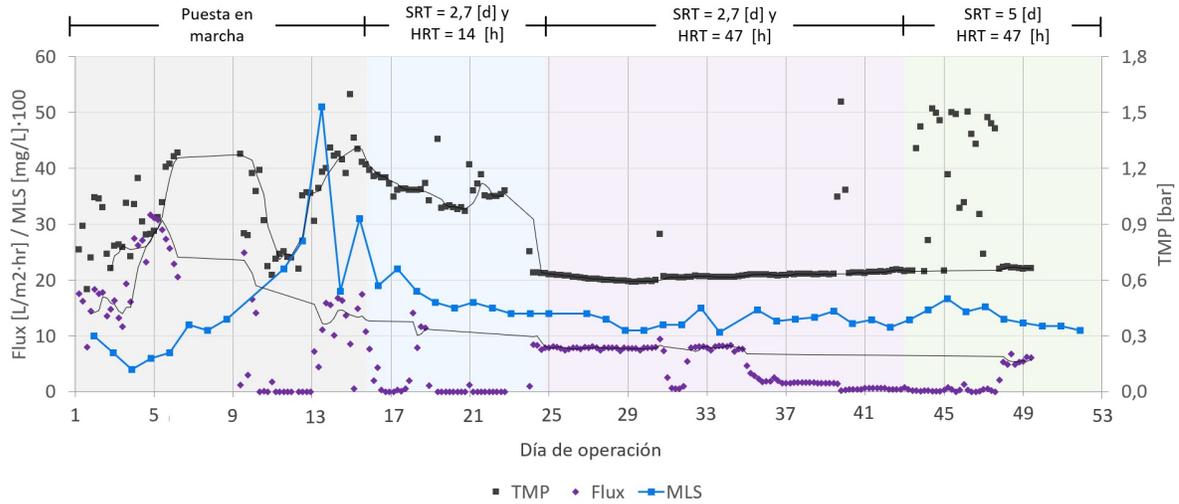


Figura 3.4: Resultados del flux de la membrana  $[L/h \cdot m^2]$ , *mix liquor solids* (MLS) en el reactor  $[mg/L]$  amplificados por 100 y la presión transmembrana (TMP)  $[bar]$  durante la operación

De la Figura 3.4 se observa que los sólidos tienen influencia en el rendimiento de la membrana debido a que son los responsables de colmatar los poros de ella hasta, eventualmente, causar que se obstruya. Durante la puesta en marcha existe un aumento de la TMP que se debe al inicio de la acumulación de sólidos en la membrana. A mayor obstrucción, se tendrá mayor presión. Durante la condición 1 se ve una tendencia a la caída de la TMP (Ver línea negra) a la vez que existe una caída en los MLS. Durante la condición 2 se observa una TMP constante, al igual que los MLS, lo que se puede asociar a una estabilización del sistema. Finalmente, durante la condición 3, existe un aumento irregular de la TMP, que se puede deber a una falla en el monitoreo y se podría considerar como ruido en los datos, para luego volver a estabilizarse al final de la operación.

En cuanto al *flux* este es menos constante y tendió a la disminución durante la operación del sistema (Ver línea morada), lo que tiene sentido debido a que un aumento en la obstrucción de la membrana por la presencia de sólidos, conlleva un menor flujo a través de ella. Los valores de *flux* que son nulos o cercanos a cero se deben a fallas en el sistema de monitoreo del caudal de permeado ocurrido entre el día 9 y 22.

## 3.2. Estudio de prefactibilidad

Entre las ventajas del AnMBR se encuentran un menor costo de operación debido principalmente al ahorro energético porque no requiere aireación y la reducción en la producción de lodos. Sin embargo, los costos de inversión del MBR son menores a los del AnMBR. Los valores de CAPEX y OPEX para un AnMBR y MBR con el caudal de diseño y operación del caso de estudio se presentan en la Tabla 3.2, según cotizaciones confidenciales de la Viña Concha y Toro S.A. [36].

Tabla 3.2: Comparación de costos de inversión y operación en un AnMBR y MBR [36]

	AnMBR	MBR
Inversión [US \$]	3.744.000	3.480.000
Operación anual [US \$]	21.000	157.324
<b>Total [US \$]</b>	<b>3.604.544</b>	<b>3.637.324</b>

Además, es posible cuantificar otras ventajas del AnMBR, tanto económicas como ambientales. El principio fundamental de ambas es que el AnMBR estudiado produciría 1.360 [Nm<sup>3</sup>] de hidrógeno al año y 30.000 [m<sup>3</sup>] de efluentes ricos en nutrientes, inmediatamente disponibles para fertilización de los cultivos de la viña.

Tabla 3.3: Beneficios asociados a la producción de hidrógeno del AnMBR

Potencial energético hidrógeno [kWh/año]	1.632
Consumo energía AnMBR [kWh/año]	1.200
<b>Energía disponible [kWh/año]</b>	<b>432</b>

El detalle del potencial energético asociado a la producción de hidrógeno se resume en la Tabla 3.3, donde se observa que la generación de energía no sólo permite suplir la demanda energética del AnMBR para su funcionamiento, sino que deja disponible un excedente para ser utilizado en otros procesos de la planta. Esta generación eléctrica se traduce en **US\$160.456 de ingresos anuales para el sistema AnMBR, lo que significa que será US\$32.780 más barato que el MBR, haciendo al proyecto económicamente prefactible.**

Por otra parte, la generación de energía del sistema se traduce en una disminución de 0,7 [tonCO<sub>2eq</sub>/año] en la huella de carbono de la planta y, por consiguiente, de la empresa. Mientras que la disponibilidad de un efluente para fertilización es equivalente a 30.000 [m<sup>3</sup>/año], lo que se traduce en una disminución del 0,03 % de la huella hídrica de la empresa. Estos dos aspectos son un aporte a los índices ambientales que la Viña Concha y Toro reporta anualmente.

# Capítulo 4

## Conclusiones

Recientemente, la producción biológica de hidrógeno ha atraído la atención científica debido a su potencial como fuente inagotable, de bajo costo y renovable de energía limpia. Entre todas las tecnologías de producción, la fermentación anaeróbica de hidrógeno parece ser la más favorable, ya que el hidrógeno puede generarse a mayor velocidad y, aunque hoy las investigaciones a nivel de laboratorio apuntan a que los AnMBR no son costo-eficientes respecto a otras tecnologías convencionales, los desafíos están puestos en la mejora de la eficiencia y el rendimiento de los reactores anaeróbicos de membrana [24].

A partir del trabajo realizado en la memoria de título se concluye que una planta con tecnología AnMBR es prefactible desde una perspectiva técnico-económica. Sumado a esto, este tipo de tratamiento de RILES trae beneficios ambientales asociados a la generación de energías renovables, disminución de la huella de carbono y huella hídrica. Esto significa un punto de especial interés tanto para Concha y Toro S.A. debido a sus políticas empresariales como para el contexto nacional en cuanto a cambio climático y escasez hídrica.

Luego del trabajo que se llevó a cabo, se proponen las siguientes líneas de investigación o recomendaciones:

1. Disminuir la dilución en la elaboración del RIL sintético, con lo que aumenta la DQO a través del Organic Loading Rate (OLR). Esto se propone según lo estudiado en la literatura, donde se presenta que un aumento gradual del OLR puede aumentar la producción de hidrógeno [39]
2. Estudiar alternativas para mejorar la disminución de DQO del sistema. Entre las alternativas se propone específicamente recircular el efluente tratado
3. Estudiar el desempeño del sistema con un RIL vitivinícola real, debido a que el utilizado en esta investigación puede contener altos niveles de sulfitos que podrían interferir en el desarrollo de las bacterias anaeróbicas. Además, se propone analizar la adición de nutrientes en este mismo, simulando lo realizado en las plantas de tratamiento de la Viña Concha y Toro S.A.
4. Probar condiciones con mayor concentración de biomasa en el reactor con el fin de evaluar su efectividad

5. Analizar diferentes formas de optimizar el sistema, tanto para generar mayores volúmenes de biogás con una mayor concentración de hidrógeno, como para alcanzar mayores porcentajes de remoción de DQO
6. Mejorar las mediciones para determinar la composición del biogás, realizarlas diariamente y no almacenar las muestras, además de identificar si la cromatografía que se realiza está adaptada para este tipo de gas
7. Estudiar otras configuraciones para el módulo de membranas, por ejemplo una mayor altura para tener una mayor área de filtrado

Finalmente, cabe destacar el aporte que significa el estudio de este tipo de tecnologías, debido a que el reactor diseñado, construido y puesto en marcha fue capaz de realizar un tratamiento de los RILES vitivinícolas sintéticos a la vez que producía biogás rico en hidrógeno con un alto potencial energético, que si bien para efectos de este estudio de prefactibilidad no arroja una inversión conveniente, podría mejorar luego optimizar el sistema de las formas propuestas anteriormente u otras.

# Bibliografía

- [1] Centro del Clima y la Resiliencia, “Informe a la Nación - La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro,” Santiago, 2015. Disponible en: <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>.
- [2] Biblioteca del Congreso Nacional, BCN, *Ley 20.257 INTRODUCE MODIFICACIONES A LA LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS RESPECTO DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES*, 2007. Disponible en: [https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Decretos\\_vigentes.jpg](https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Decretos_vigentes.jpg).
- [3] Concha y Toro, “Reporte de sustentabilidad 2017,” tech. rep., Concha y Toro S.A., Santiago, 2017.
- [4] Dirección General de Aguas, DGA, *Decretos de Escasez Hídrica a Octubre de 2019*, 2019. Disponible en: [https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Decretos\\_vigentes.jpg](https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Decretos_vigentes.jpg).
- [5] Ministerio de Medio Ambiente, “Asamblea general de la onu: Chile compromete reducción de un 30 % de emisión de gases de efecto invernadero al año 2030,” 09 2019.
- [6] T. Luo, R. Young, and P. Reig, “Aqueduct projected water stress country rankings,” tech. rep., Water Resources Institute, Washington, 2015.
- [7] Cooperativa, “A 8 mil millones de pesos subió el gasto en uso de camiones aljibe por escasez de agua el primer semestre,” 09 2019. Disponible en: <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/servicios-basicos/agua/a-8-mil-millones-de-pesos-subio-el-gasto-en-uso-de-camiones-aljibe-por/2019-09-16/025545.html>.
- [8] Fundación Chile, “Transición hídrica: el futuro del agua en Chile,” tech. rep., Fundación Chile, Santiago, 2019.
- [9] Ministerio de Energía, “Qué son las energías renovables,” 2017. Disponible en: <http://www.energia.gob.cl/educacion/que-son-las-energia-renovables>.
- [10] Aguas Andinas, “Reporte integrado 2018,” tech. rep., Aguas Andinas S.A., Santiago, 2018.
- [11] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), “Vinos y alcoholes.” Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/rubros/vinos-y-alcoholes>.
- [12] DATACHILE, “Vino (productos alimenticios).” Disponible en: <https://es.datachile.io/products/productos-alimenticios-04/vino-042204>.
- [13] Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV), “Los datos de la coyuntura vitivinícola mundial,” tech. rep., OIV, París, 2018.

- [14] K. Mosse, A. Patti, E. Christen, and T. Cavagnaro, “Review: Winery wastewater quality and treatment options in australia,” *Australian Journal of Grape and wine Research*, 2011.
- [15] Gonzalo Correa. (Comunicación Personal), Mayo 2020.
- [16] A. Prazeres, J. Rivas, M. Almeida, M. Patanita, J. Dores, and F. Carvalho, “Agricultural reuse of cheese whey wastewater treated by naoh precipitation for tomato production under several saline conditions and sludge management,” *Agricultural Water Management*, 2016.
- [17] M. Álvarez García, M. Urrestarazu, J. Guil-Guerrero, and S. Jiménez-Becker, “Effect of fertigation using fish production wastewater on pelargonium x zonale growth and nutrient content,” *Agricultural Water Management*, 2019.
- [18] J. Delvaux, J. Carvalho, J. Rodrigues, and J. Cavalcante, “Fertigation with domestic wastewater: Uses and implications,” *African Journal of Biotechnology*, 2016.
- [19] F. Etchebarne, P. Aveni, J. Escudier, and H. Ojeda, “Reuse of treated wastewater in viticulture: Can it be an alternative source of nutrient-rich water?,” *BIO Web Conf.*, 2019.
- [20] E. Vivanco, R. Yaya, and R. Chamy, “Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales cyted,” tech. rep., CYTED, Santiago, 2018.
- [21] S. Judd, *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, 2011.
- [22] F. Cakir and M. Stenstrom, “Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology,” *Water Research*, 2005.
- [23] Y. Chan, M. Chong, C. Law, and D. Hassell, “A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater,” *Chemical Engineering Journal*, 2009.
- [24] M. Aslama, R. Ahmada, M. Yasina, A. Khana, M. Shahidd, S. Hossaine, Z. Khana, F. Jamila, S. Rafiq, M. R. Biladf, J. Kimc, and G. Kumarg, “Anaerobic membrane bioreactors for biohydrogen production: Recent developments, challenges and perspectives,” *Bioreasource Technology*, 2018.
- [25] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), “Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile,” Santiago, 2018.
- [26] F. Hawkes, D. Hawkes, and I. Hussy, “Sustainable fermentative hydrogen production: challenges for process optimisation,” *Hydrogen Energy*, 2002.
- [27] A. Noblecourt, G. Christophe, C. Larroche, G. Santa-Catalina, E. Trably, and P. Fontanille, “High hydrogen production rate in a submerged membrane anaerobic bioreactor,” *Hydrogen Energy*, 2017.
- [28] A. Prieto, L. Sigtermans, B. Mutlu, A. Aksan, W. Arnold, and P. Novak, “Performance of a composite bioactive membrane for h<sub>2</sub> production and capture from high strength wastewater,” *The Royal Society of Chemistry*, 2016.
- [29] P. Martins, P. Reis, R. Martins, L. Gando-Ferreira, and R. Quinta-Ferreira, “Iron reco-

- very from the fenton's treatment of winery effluent using ion-exchange resin," *Journal of Molecular Liquids*, 2017.
- [30] F. AVaria, "Modelo de simulación para el mejoramiento de sistema de tratamiento de RILES de Bodega Cachapoal, Viña Concha y Toro," *Universidad de Chile*, 2019.
- [31] H. Futselaar, R. Borgerink, H. Schonewille, and R. Rosberg, "Airlift mbr for municipal wastewater treatment: out of the box performance," *Desalination and Water Treatment*, 2009.
- [32] A. Prieto, H. Futselaar, P. Lens, R. Bair, and D. Yeh, "Development and start-up of a gas-lift anaerobic membrane bioreactor (gl-anmbr) for conversion of sewage to energy, water and nutrients," *Journal of Membrane Science*, 2013.
- [33] R. Pretel, A. Robles, M. Ruano, A. Seco, and J. Ferrer, "Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic mbr-based (anmbr-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment," *Environmental Management*, 2016.
- [34] Asociación Española de Hidrógeno, "Los números del hidrógeno." Disponible en: <http://www.aeh2.org>.
- [35] Energía Abierta, "Factores de emisión." Disponible en: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>.
- [36] Empresa Privada, "Cotizaciones," tech. rep., Concha y Toro S.A., Santiago, 2019.
- [37] Wet Tip Gas Meter, "Gas meter for laboratories." Disponible en: <http://wettipgasmeter.com/meters.php>.
- [38] T. Massara, O. Komesli, O. Sozudogru, and S. Komesli, "A mini review of the techno-environmental sustainability of biological processes for the treatment of high organic content industrial wastewater streams," *Waste Biomass Valor*, 2017.
- [39] P. Bakonyi, N. Nemestóthy, Simon, and K. Bélafi-Bakó, "Fermentative hydrogen production in anaerobic membrane bioreactors: A review," *Bioresource Technology*, 2014.
- [40] R. Baird, A. D Eaton, E. W Rice, L. Bridgewater, APHA, *2540 SOLIDS (2017)*, p. 1. American Public Health Association, 2017. Disponible en: <https://www.standardmethods.org/doi/abs/10.2105/SMWW.2882.030>.

# Anexo A

## Partes del reactor anaeróbico de membranas

### A.1. Reactor Anaeróbico

Para la construcción del equipo se utiliza un digestor anaeróbico marca *Armfield* modelo W8-5 (Figura A.1). Este modelo está equipado con dos reactores de flujo ascendente de lecho lleno de 5 litros, donde cada reactor tiene instalaciones de muestreo y recolección de gas, pudiendo funcionar en serie o en paralelo, utilizando bombas peristálticas de velocidad variable (Armfield, 2019).



Figura A.1: Digestor anaeróbico W8-5 Armfield

## A.2. Módulo de membranas

El módulo de membranas consiste en una membrana tubular de fluoruro de polivinilideno (PVDF) de 8 mm de diámetro y 30 cm de largo (Berghof Membranes) con un tamaño medio de poros de  $0,03 \mu\text{m}$ . Esta membrana se ha fijado a un armazón de PVC, que permite acoplarlo al resto del reactor y realizar el proceso de filtrado, tal como se muestra en el esquema de la Figura A.2.

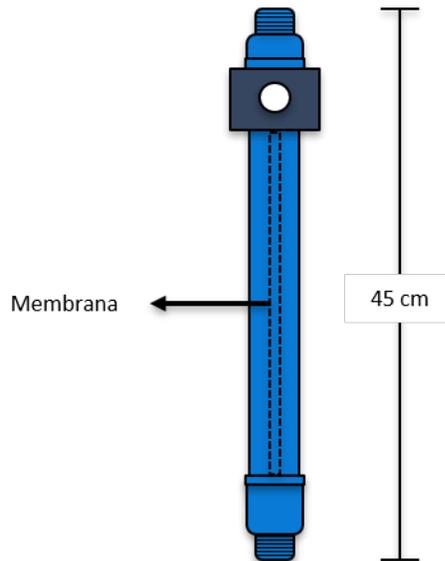


Figura A.2: Esquema módulo de membrana

Como punto de partida, las velocidades de flujo del influente y del gas de limpieza de la membrana se establecieron para asegurar velocidades de flujo cruzado (CFV) entre 0,3-0,5 m/s según lo informado como óptimo para la operación de transporte aéreo [31]. La filtración se realiza aplicando una presión negativa en el lado permeable de la membrana con una bomba de velocidad variable.

## A.3. Bombas peristálticas

La bomba utilizada para el permeado es una *Masterflex L/S Standard Digital Pump Systems* de doble cabezal, mientras que las de alimentación son *Masterflex L/S Variable-Speed Console Pump Systems*, las que se muestran en la Figura A.3.



Figura A.3: Bomba de permeado (izquierda) y alimentación (derecha)

# Anexo B

## Mediciones continuas

Para realizar el monitoreo continuo del reactor, se midieron los siguientes parámetros a través de diferentes dispositivos:

1. Caudal effluente de la membrana: utilizando un pluviómetro en línea *The Weather Channel TX2U-IT* conectado a un sistema de monitoreo remoto para el registro de datos (*HOBO RX3000* de *ONSET*) que, a su vez, está conectado a un computador que registra cada conteo a través del software *HOBOWare*, se puede obtener la cantidad de conteos del dispositivo en determinado periodo, donde a su vez, se conoce que cada conteo representa 2 mL de líquido medido.
2. Presiones de la membrana: utilizando 3 dispositivos *Cole-Parmer High-Accuracy Pressure Transducers* modelo EW-68075-05 conectado al mismo sistema de monitoreo anterior, se obtienen datos de voltaje que, a través de una correcta calibración, se pueden representar como presiones. Con esto se conocen las presiones en el ingreso, retorno y permeado del módulo de membrana.
3. Producción de biogás: para poder medir diariamente el volumen de biogás que el reactor produce, se construye un sistema de probetas invertidas llenas de agua que en su base cuentan con tuberías proveniente de la línea de gas del sistema, donde el volumen desalojado de agua por el efecto del aire permite conocer el volumen de biogás producido. En la Figura B.1 se muestra un esquema del sistema y en la Figura B.2 el montaje final.
4. Temperatura: mediante un termómetro propio del reactor, se monitorea la temperatura de la mezcla completa, la cual se visualiza directamente en el montaje experimental en una pantalla digital.

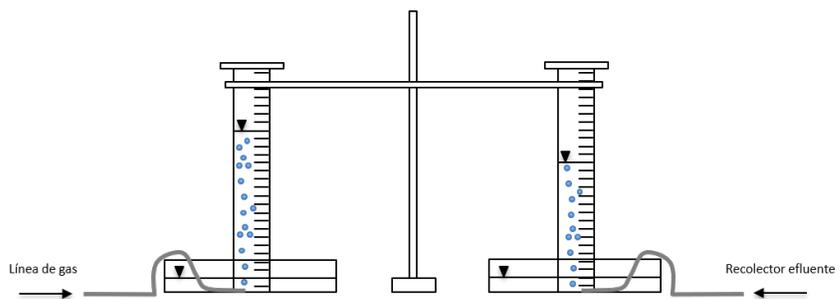


Figura B.1: Esquema del sistema de medición de biogás producido



Figura B.2: Montaje del sistema de medición de biogás producido

# Anexo C

## Calibraciones de los dispositivos

Para utilizar los dispositivos que permiten el funcionamiento y monitoreo del AnMBR, estos fueron calibrados previamente. Esta calibración tiene como objetivo poder obtener valores reales de los parámetros que son de interés en el estudio a partir de la lectura o configuración que entregue cada uno.

Para calibrar las bombas peristálticas se midió el volumen desplazado por la bomba en un período de tiempo conocido para diferentes *set-up* utilizando tuberías y cabezales conocidos. Con estos datos empíricos se construye la curva de calibración correspondiente.

Para el caso de los sensores de presión, estos se calibraron utilizando un manómetro conectado en serie al sensor, además de ejercer presión y/o vacío a través de una bomba peristáltica. El sensor marca un valor de voltaje mientras que el manómetro permitirá conocer la presión, así con diferentes puntos de presiones se construye la curva de cada sensor.

A continuación, se presentan las curvas de calibración de cada dispositivo del sistema.

1. Bomba alimentación a la membrana: la bomba *Masterflex* modelo *L/S Analog Variable-Speed Console Drive Systems* utilizando una tubería *Materflex-24* tiene la curva de calibración de la Figura C.1

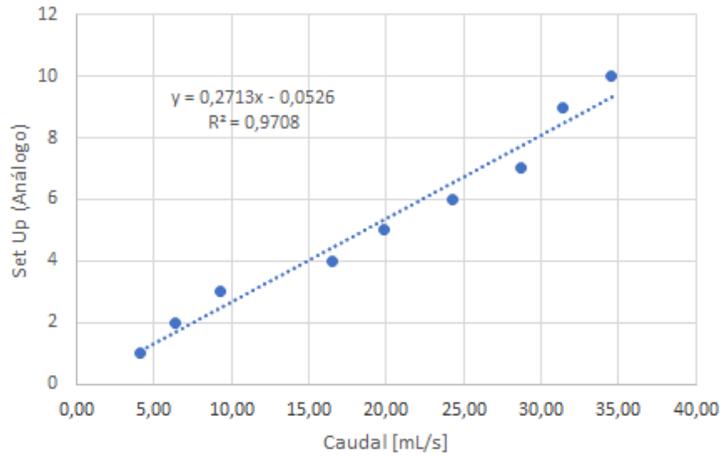


Figura C.1: Calibración bomba de alimentación a la membrana utilizando tubería 24 en cabezal 15, 24, 35, 36

2. Bomba inyección gas a la membrana: la bomba *Masterflex* modelo *L/S Analog Variable-Speed Console Drive Systems* utilizando una tubería *Masterflex-14* tiene la curva de calibración de la Figura C.2

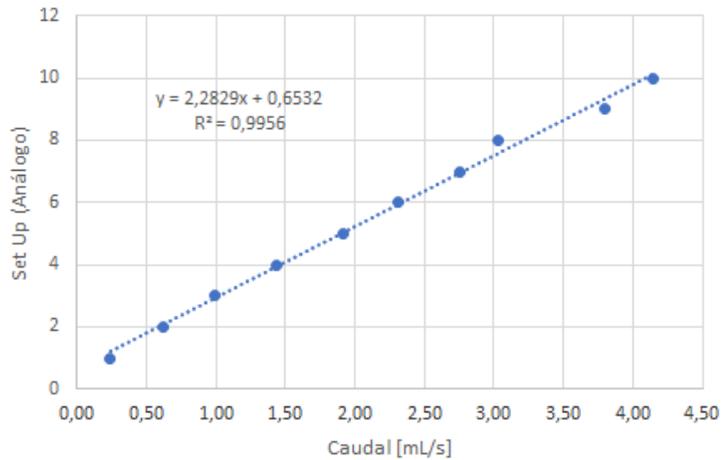


Figura C.2: Curva de calibración bomba de inyección de gas a la membrana utilizando tubería 14 en cabezal 13, 14, 16, 25

3. Bomba de permeado: la bomba *Masterflex* modelo *L/S Standard Digital Pump Systems* utilizando una tubería *Masterflex-18* tiene la curva de calibración de la Figura C.3

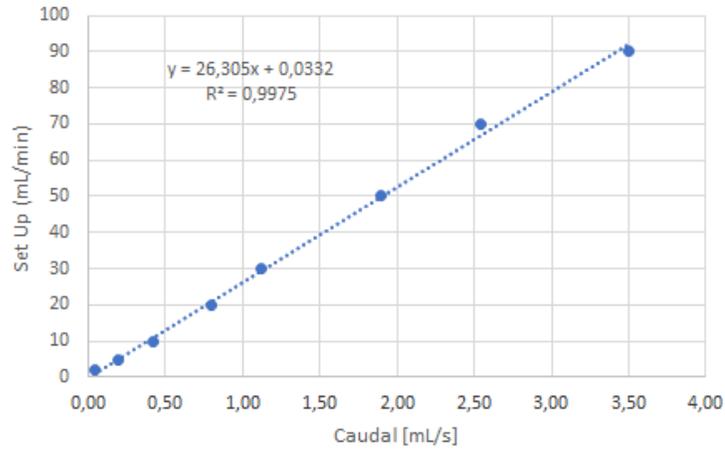


Figura C.3: Calibración bomba de permeado de la membrana utilizando tubería 18 en cabezal 13, 14, 16, 25, 17, 18

4. Sensor de presión alimentación a la membrana: el sensor *Cole-Parmer High-Accuracy Pressure Transducers* modelo EW-68075-05 tiene la curva de calibración de la Figura C.4

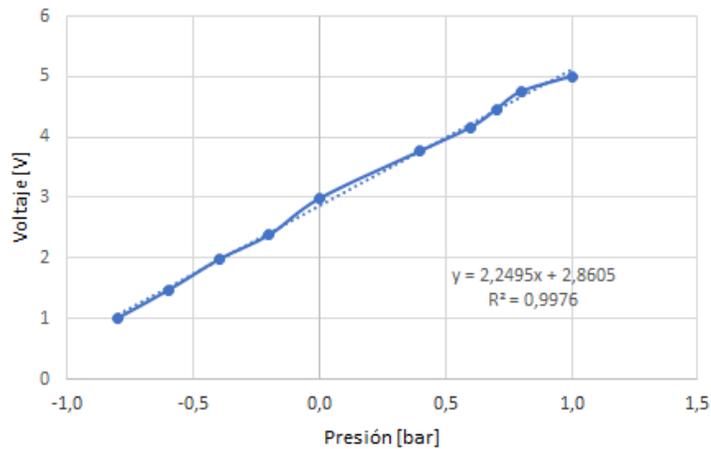


Figura C.4: Curva de calibración del sensor de presión en el punto de alimentación de la membrana

5. Sensor de presión recirculación a la membrana: el sensor *Cole-Parmer High-Accuracy Pressure Transducers* modelo EW-68075-05 tiene la curva de calibración de la Figura C.5

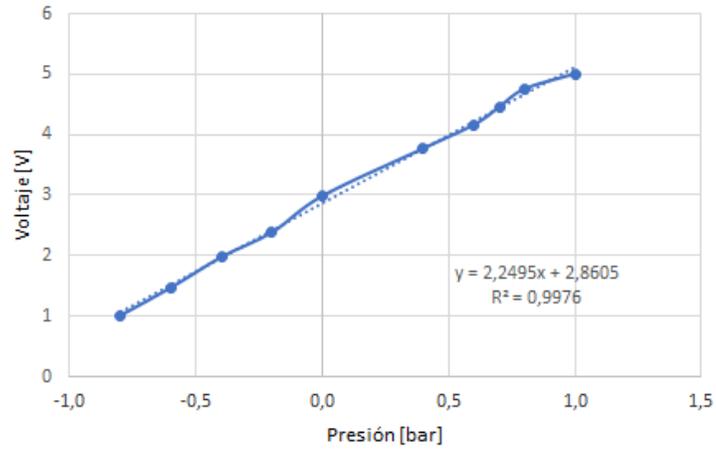


Figura C.5: Curva de calibración del sensor de presión en el punto de recirculación de la membrana

6. Sensor de presión permeado: el sensor *Cole-Parmer High-Accuracy Pressure Transducers* modelo EW-68075-05 tiene la curva de calibración de la Figura C.6

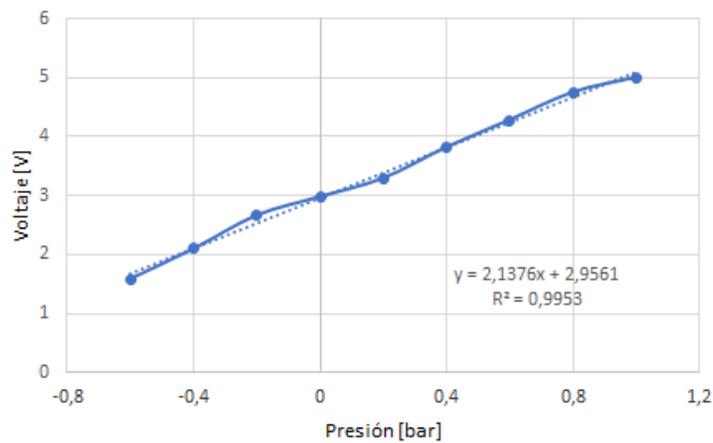


Figura C.6: Curva de calibración del sensor de presión en el punto de permeado de la membrana

# Anexo D

## Sólidos volátiles

Los sólidos volátiles presentes en el reactor se calcularon a través de la relación entre ellos y los sólidos totales. Esta relación se obtuvo sometiendo 15 platos de muestras de los sólidos totales (previamente sometidas al procedimiento) a una mufla a 550°C durante 15 minutos. Luego, se pesan los platos y la diferencia entre el peso final con el peso inicial, dividido por el volumen de la muestra, es la concentración de sólidos volátiles [40]. Los resultados fueron corregidos para ser presentados en mg/L.

En la Tabla D.1 se muestran los resultados obtenidos. Con esto se obtiene una relación entre los sólidos totales y los sólidos volátiles para cada caso. Finalmente, la relación final será el promedio de las 15 muestras e igual a  $0,550 \pm 0,09$ .

Tabla D.1: Relación sólidos totales y sólidos volátiles

ST [mg/L]	SV [mg/L]	Relación
1.300	620	0,477
1.200	590	0,492
1.400	710	0,507
1.400	750	0,536
1.450	590	0,407
1.630	960	0,589
1.320	830	0,629
1.200	760	0,633
1.200	760	0,633
1.290	810	0,628
1.200	820	0,683
1.290	630	0,488
1.320	790	0,598
1.270	680	0,535
1.280	520	0,406
<b>Promedio</b>		0,550
<b>Desviación</b>		0,09

A continuación se grafican ambos tipos de sólidos, que presentan la misma tendencia debido a que se utilizó una relación y no datos medidos.

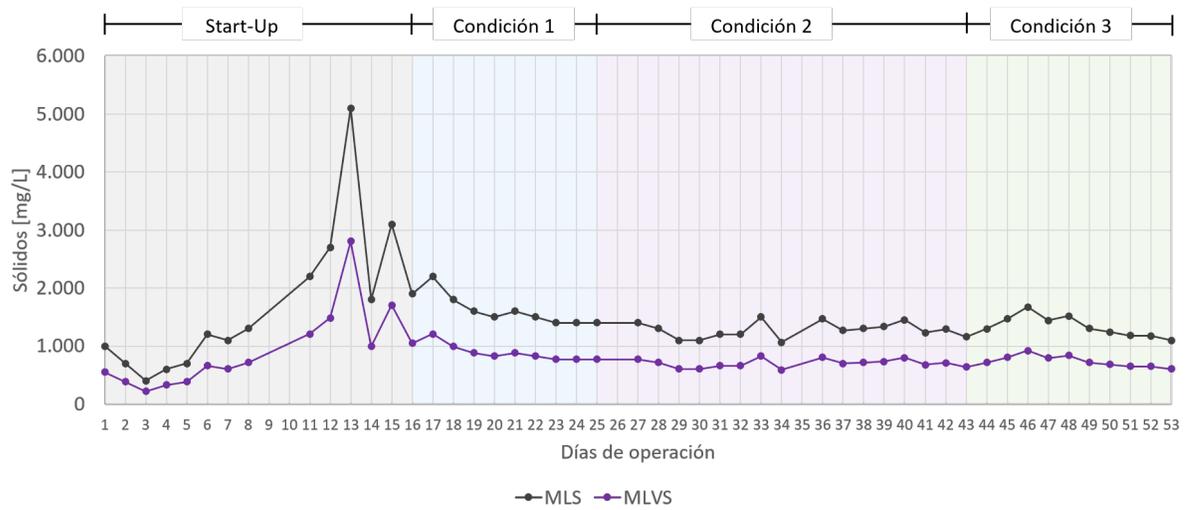


Figura D.1: Sólidos totales y sólidos volátiles [mg/L] durante la operación del AnMBR