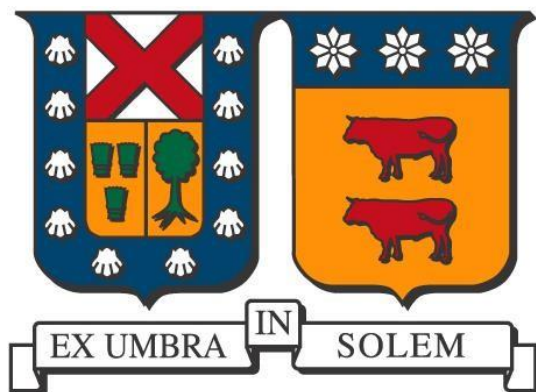




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA COMERCIAL

**EVALUACIÓN ECONÓMICA DE ENERGÍA A PARTIR DE LAS AGUAS
RESIDUALES MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLES MICROBIANAS EN
PLANTAS DE AGUAS SERVIDAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO COMERCIAL

AUTOR

YENIFER GERALDINE REYES MUÑOZ

PROFESOR GUÍA

FRANCISCO OMAR LAGOS PERALTA

PROFESOR CORREFERENTE

LIONEL VALENZUELA

SANTIAGO, 14 DICIEMBRE DEL 2022

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a mis amados padres por entregar la mejor educación que lograron entregarme, sin sus esfuerzos y constancia no podría haber llegado a donde me encuentro hoy en día. Gracias por toda su entrega no solo educacionalmente, sino que, en el respeto, amor y cariño en la vida, pero sobre todo gracias por sus valores familiares, sin ellos no sería la mujer, estudiante y profesional en la que he llegado a convertirme. Los amo y siempre estaré agradecida por los increíbles padres en los que se convirtieron.

Continúo agradeciendo a mi querida hermana, por apoyarme en cada decisión que he tomado a lo largo de mi vida, no solo en lo académico y profesional, por la paciencia que ha tenido durante las épocas de exámenes o controles y los mejores consejos al momento de tomar una decisión.

Luego mis más sinceros agradecimientos al profesor Francisco Lagos, persona crucial para llevar a cabo esta memoria. Gracias por acompañarme en el proceso, además de su confianza, paciencia, cariño, dedicación, motivación, pero por, sobre todo, la vocación que tiene para ser un maestro, no solo dentro del aula.

Finalizó agradeciendo a mis compañeros de carreras, mis amigos y profesores que marcaron en mi ser la vocación de ser una ingeniera comercial. Debo hacer énfasis en mis compañeros de estudio y de vida, sin ellos hubiera sido un poco más difícil finalizar este proceso universitario.

ÍNDICE

1	RESUMEN EJECUTIVO.....	5
2	INTRODUCCIÓN.....	7
3	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	9
4	OBJETIVOS.....	12
4.1	Objetivo General.....	12
4.2	Objetivo Específicos.....	12
5	ALCANCES	13
5.1	Evaluación del Proyecto	13
5.2	Agua Residual.....	13
5.3	Horizonte de Estudio	13
5.4	Efectos	14
5.5	Mejoras	14
6	MARCO TEÓRICO	15
6.1	Tratamiento de Aguas Residuales	15
6.2	Tratamiento de Aguas Residuales en Chile.....	17
6.3	Problemáticas Ambientales	18
6.4	Problemas Económicos.....	21
6.5	Microbios en la limpieza del Agua y en la Obtención de Energía	23

6.6 Celdas de Combustible Microbianas	25
6.6.1 Principio de funcionamiento	25
6.6.2 La celda de combustible en las plantas de tratamiento de aguas residuales	27
6.7 Modelo y Resultados de otros países.....	27
7 METODOLOGÍA.....	29
7.1 Recopilación de Información Relevante.....	29
7.2 Criterio de Aprobación para la Ejecución del Proyecto	30
7.3 Emisión de agua servida por habitante	30
7.4 Análisis económico.....	30
7.5 Estimación de Beneficios (Enfoque Social)	33
7.6 VAN Social.....	35
7.7 Efectividad del proyecto.....	38
7.8 Eficiencia del proyecto	38
8 RESULTADOS	41
9 ANALISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES	42
10 DISCUSIÓN.....	44
11 LIMITACIONES.....	46
12 REFERENCIAS	47

1 RESUMEN EJECUTIVO

Con el pasar de los años, el mundo se ha encontrado en una difícil situación medioambiental. Esto debido al aumento de población en el planeta y el sobre consumo de los recursos naturales. En la actualidad existe un problema energético de gran importancia: por una parte, la demanda de energía es mayor cada vez y, por otra, las fuentes actuales contienen en gran proporción recursos limitados y su uso conlleva a repercusiones ambientales indeseables.

Desde la Revolución Industrial hasta la actualidad, los diversos procesos industriales se desarrollan quemando combustible fósil, sin considerar el desmedido uso de los recursos naturales del planeta. Estos procesos cambian la composición de la atmósfera de la Tierra, emitiendo gases y compuestos de efecto invernadero.

Es de suma importancia poner en marcha acciones de carácter urgente, para reducir el impacto ambiental. Una de estas acciones es el acuerdo de París, que establece como objetivo limitar el aumento de la temperatura media global. Dentro de este acuerdo se encuentra en forma inmerso el cambio a una producción energética bajo en carbono.

Chile no se queda atrás en reformas o acciones para mitigar los contaminantes a la atmósfera y el medio ambiente, además de cambiar poco a poco la manera de producir energía. Una de estas acciones es la ley número 21.305 relacionada sobre la eficiencia energética. En donde se declara que cada 5 años el ministerio de energía en colaboración con los ministerios sectoriales respectivos, deberán elaborar un Plan Nacional de Eficiencia Energética. Otra acción que lleva a cabo Chile para mejorar la producción de energía es suministrar fondos millonarios para proyectos de eficiencia energética y energías renovables. Aumentando la Inversión Energética Local, haciendo partícipe a las diferentes comunas del país.

Si bien la producción de energía de fuentes renovables y energía verdes han aumentado con el paso de los años dentro del país, el consumo de energía a través de fuentes térmicas sigue siendo alto. Es por ello que, en el presente trabajo de título, tiene como objetivo determinar si la aplicación de Energía a partir de las aguas residuales mediante celdas de combustibles microbianas en plantas de aguas servidas es conveniente económica y socialmente en el país al momento de instalarlas.

Para establecer si el proyecto es factible económicamente, se llevará a cabo una evaluación económica con enfoque costo-beneficios en la aplicación de celdas de combustibles microbianas en las diversas plantas de aguas residuales dentro de Chile.

A lo largo de la preparación del presente trabajo, se realizaron diversas investigaciones, que involucran los siguientes temas: origen del sistema de agua residuales, celdas de combustibles microbianas, electricidad en Chile, plantas de aguas residuales, tratamientos de aguas residuales en Chile, problemas ambientales, leyes energéticas, entre otros temas.

La metodología utilizada en la presente memoria es una evaluación social del proyecto, mediante la utilización del indicador VAN. Con los resultados obtenidos, se establecerá la viabilidad económica de la producción de energía a partir de las aguas residuales mediante celdas de combustibles microbiana en plantas de aguas residuales, además de determinar la efectividad y eficiencia del proyecto.

2 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es una investigación que tiene como objetivo evaluar económicamente la implementación o instalación de celdas de combustibles microbianas en plantas de aguas residuales para obtener energía y destinar el consumo de la energía para la misma planta de agua residual como comunidades aledañas.

En Chile predominan los recursos fósiles en la matriz energética primaria, con un porcentaje representativo del 68%, este porcentaje corresponde a la suma del 30% del petróleo crudo, 22% del carbón mineral y el 16% del gas natural. Le sigue en menor proporción la energía proveniente de la biomasa con un 23%, luego las de origen hídrico con un 5%, solar con un 2% y la eólica con un 1%. Si bien se han implementado en el país políticas públicas e incentivos para producir más energía renovable y verde, el porcentaje de este tipo de energía sigue siendo menor. Ante esto se propone la obtención de energía a partir de las aguas residuales mediante celdas de combustibles microbianas en plantas de aguas servidas.

Por habitante se produce en promedio 10 litros de aguas servidas de tipo rural, esto se estima o calcula en una proporción con el consumo de agua potable abastecida para la población, según Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental UdeC.

Las celdas de combustibles microbianas son unos dispositivos que utilizan microorganismos para convertir la energía química contenida en la materia orgánica en energía eléctrica. Estas celdas son diseñadas y adaptadas a la infraestructura de una planta de agua residual y su principal fuente es el agua residual de la planta.

Los desechos orgánicos biodegradables que se encuentran en el agua residual son la alimentación de microorganismo que se localizan en la materia fecal, estos producen electrones que se transfieren a un electrodo para generar electricidad.

La Comisión Nacional de Energía (CNE) estimó en el 2021 que el crecimiento de la demanda eléctrica para el 2022 será de un 5,2% respecto al año anterior, pasando de 73.941 GWh a 77.787 GWh.

Energía 2050 conduce hacia horizontes más amplios, como la participación de un 70% de las fuentes renovables en la generación eléctrica, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir los precios de la energía al nivel de los países desarrollados, entre otras.

Esta propuesta busca fundamentalmente implementar políticas que aborden paralelamente dos grandes desafíos. Impulsar una matriz energética renovable y el desarrollo de lineamientos para abordar los impactos medioambientales, locales y globales.

En el presente trabajo se abordan distintos capítulos y temas. Inicialmente se presenta el problema de investigación, abarcando a grandes rasgos información sobre el tema a tratar.

Lo primero a tratar será la problemática abarcada en el presente trabajo, continuando con los distintos objetivos que se desean alcanzar.

A continuación, se encontrarán los alcances del proyecto; seguido del marco teórico, en donde, se explicarán partes importantes y fundamentales sobre el proyecto.

Posteriormente se encuentra la metodología del proyecto junto a los resultados.

Finalmente se desarrollarán los análisis de resultados y recomendaciones; discusiones, limitaciones y referencias correspondientes a la investigación que fue necesaria para la realización del trabajo.

3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Desde el origen de la vida en la Tierra, el agua ha sido indispensable en todas las funciones, ya sea del ecosistema como del ser humano. Todos los seres vivos somos algún porcentaje, mayor o menor, agua y es importante tener que consumirla.

Una vez utilizada el agua, esta vuelve al ecosistema contaminada o sucia, la cual podemos llamar agua residual, o también llamada negra o fecal, tiene diferentes orígenes, que pueden ser domésticos o en mayor parte industriales. Está compuesta químicamente por: carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, compuestos orgánicos volátiles, cloruros, metales pesados, nitrógeno, contaminantes prioritarios, azufre, sulfuro de hidrógeno, entre otros (*Ecomar*, 2020).

Durante la edad media, existieron grandes cantidades de enfermedades, causados por el problema de higiene en el agua y sus sistemas de distribución. Esto debido, a que las personas tiraban sus desechos al sistema de distribución de agua potable, por lo que, las personas empezaron a preferir el consumo de fuentes de aguas alejadas de la ciudad.

La primera instalación de saneamiento fue el pozo ciego o pozo negro que apareció en Babilonia hacia 4000 a.C. (*We are water*, 2017), la cual consistía, en una sencilla excavación, donde se almacenan todos los desechos y una vez que se llenaba, se tapaba y se hacía otro pozo negro. Este sistema se masificó en muchos países. Con el tiempo los babilonios desarrollaron un sistema para el traslado de las aguas negras y crearon las primeras tuberías de arcilla. Este sistema se fue perfeccionando y mejorando, hasta lo que conocemos hoy en día como sistema de alcantarillado.

A diciembre de 2018 en Chile, la cobertura de agua potable en los territorios urbanos y

concesionados a nivel nacional es de un 99,93% y la de alcantarillado es de 97,17%; mientras que la cobertura de tratamiento de aguas servidas es de un 99,98%, respecto a las de aguas servidas recolectadas (*Superintendencia de servicios sanitarios, s.f.*).

De forma paralela, pero no por eso menos importante, la electricidad para el hombre ha sido muy beneficiaria, ya que, con la invención de esta, la vida del ser humano se ha podido simplificar enormemente. El descubrimiento de la electricidad se le atribuye a Tales de Mileto (siglo VI a.C.), quien vio que frotar un pequeño trozo de ámbar enérgicamente, este adquiría la propiedad de atraer pequeñas partículas. Precisamente, la palabra electricidad deriva del griego *elektron*, que significa “ámbar” (*visual led, s.f.*). Al pasar el tiempo diferentes científicos fueron haciendo descubrimiento y aportando al concepto de electricidad, dentro de este tiempo se desarrolló la batería Volt y esto dio paso a otros tipos de baterías.

En Chile, la electricidad que movía por ejemplo los ferrocarriles, tranvía, máquinas agrícolas, etc., durante el siglo XIX, fue el carbón. A inicios de 1851, la electricidad hizo su aparición en el país al mismo tiempo de los impulsos eléctricos que comunicaban los telégrafos de Santiago y Valparaíso. En 1883, cuando la luz eléctrica iluminó la Plaza de Armas de la capital, la llegada de la energía eléctrica marcó un antes y un después en los chilenos (*Memoria Chilena, s.f.*). A enero de 2022, el 57,1% de la energía eléctrica corresponde a fuente renovable, de la cual se compone por: 23,5% hidráulica o más conocidas por hidroeléctricas; 19,8% solar; 11,7% eólica; 1,9% biomasa y 0,2% geotérmica. Mientras que el 42,9% corresponde a fuentes térmicas, las que son: 16,1% carbón; 15,9% gas natural y 10,9% petróleo (*Generadoras De Chile, s.f.*).

Debido a la contingencia ambiental a nivel mundial, es que diferentes países buscan la forma de obtener energía eléctrica amigable con el medio ambiente, ya sea, por tratados internacionales, o por una conciencia social y ambiental. Chile no se queda atrás con este desafío y cada vez implementa nuevas plantas de energía renovable. En el 2021, 5 empresas se adjudicaron

un nuevo y exitoso proceso que ofertó 2.310 Gwh/año de energía, permitiendo abastecer miles de hogares y pymes a partir del 2026 (*Ministerio De Energía*, 2021).

Otros países han innovado en la producción de electricidad renovable a partir de un nuevo uso de las plantas de aguas residuales, la cual se conoce como electricidad a través de aguas residuales por celda de combustible microbiana. Ayudando a generar o producir electricidad y aprovechando los residuos que generan las industrias y los hogares, además este sistema se está masificando en diferentes países.

Luego de la información descrita, surge la necesidad de responder las siguientes preguntas: ¿Es viable económicamente la obtención de electricidad a través de aguas residuales?, ¿Cuáles serán los beneficios sociales de producir electricidad a través de aguas residuales?, ¿Cómo afectará la producción de electricidad a través de aguas residuales en la disminución de energía térmica? Y por último, si se produjera electricidad a través de aguas servidas, ¿Cuáles son los beneficios que tendrá para Chile?

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Desarrollar una evaluación económica para la aplicación de un sistema de energía a partir de aguas residuales con el fin de entregar una propuesta para disminuir el consumo de electricidad térmica en Chile.

4.2 Objetivo Específicos

Analizar el impacto del desarrollo sostenible de la instalación o reformas en las diferentes plantas de aguas residuales y en los desafíos futuros que se tienen al respecto como país, con el fin de comprender los efectos en las plantas y en el país.

Describir los diferentes procesos que existen a nivel mundial para tratar las aguas residuales urbanas y, de paso, obtener energía limpia, mediante estudios, informes y noticias, realizadas en otros países.

Evaluar el efecto de integrar una celda de combustible microbiana en el rendimiento de una planta de aguas servidas en la depuración de las aguas, con el fin de determinar y medir la evaluación del proyecto.

Analizar económica y financieramente el proyecto, con el fin de determinar si es factible la implementación una celda de combustible microbiana en las plantas de aguas residuales en Chile.

5 ALCANCES

5.1 Evaluación del Proyecto

El presente estudio busca disminuir el consumo de energía térmica mediante la aplicación de un sistema que permite obtener energía a través de aguas residuales en las plantas de aguas residuales. A fin de lograrlo es necesario instalar este sistema, llamado celdas de combustibles microbianas (CCMs). Una CCMs es un dispositivo que utiliza microorganismo para convertir la energía química presente en el agua residual en un sustrato energía eléctrica, esto se logra cuando los microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrón. Para instalar y producir las CCMs, se requiere de mano de obra calificada.

Con el fin de determinar que la instalación de las celdas de aguas residuales en las plantas de aguas residuales es o no beneficiosas para la sociedad, se evaluará el proyecto de manera social, usando el Valor Actual Neto (VAN), a través del enfoque costo-beneficio.

5.2 Agua Residual

Debido a que la obtención de energía sigue siendo en gran parte a energía térmica, se busca disminuir el consumo y producción de este, reemplazando por energía a través de las aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas en plantas de aguas residuales.

Se entenderá por agua residual como aguas con impurezas procedentes de vertidos de diferentes orígenes domésticos e industriales, principalmente.

5.3 Horizonte de Estudio

Para la realización económica del proyecto, se utilizará un horizonte de valorización correspondiente a 8 años dado que el estudio propone un escenario pesimista, donde los agentes involucrados desean tener resultados de la manera más pronta posible.

5.4 Efectos

Lo que se busca mediante este proyecto es disminuir el consumo energético tradicional (energía térmica) y aumentar el consumo energético nacional, además de darle otro uso al tratado de aguas residuales emitidas.

5.5 Mejoras

La primera mejora será disminuir el consumo energético tradicional en los alrededores de las plantas de aguas residuales, además de llegar a más lugares con electricidad que antes no poseían algún método energético. En forma paralela ayudará al entorno y medio ambiente dado que es una forma más ecológica y eficiente de obtener energía.

Lo óptimo es que en cada planta de agua residual se instale celdas de combustible microbiana para generar electricidad, para generar como mínimo la electricidad suficiente con el fin de abastecer los consumos de la propia planta. No obstante, la producción mínima de electricidad por CCM es considerado una mejora, dado que, se deja de producir la misma cantidad de energía térmica.

Una mejora esperada es que, al aumentar la producción de energía verde o alternativa, el valor a pagar por el consumo energético sea menor, es decir, que existirá un beneficio económico social, al utilizar y preferir la energía producidas en las plantas de aguas residuales.

6 MARCO TEÓRICO

6.1 Tratamiento de Aguas Residuales

Para hablar de Energía a partir de Aguas Residuales mediante celdas de Combustibles microbianas en plantas de aguas servidas es imprescindible mencionar el tratamiento de aguas residuales o servidas.

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano e industrial. Esto se hace con el fin de producir efluentes tratados, reutilizables en el ambiente y un residuo sólido, comúnmente llamado biosólido o lodo. Es muy habitual llamar a este proceso como depuración de aguas residuales, para distinguirlo del tratamiento de agua potable.

El tratamiento de aguas residuales comienza con la etapa preliminar, se le denomina así porque es el receptor de las aguas residuales. En este proceso se regula y mide el caudal de agua que ingresan a la planta. Además, en este tratamiento se remueven los sólidos flotantes de gran tamaño, la arena y la grasa presente en el agua.

Estas partículas y compuestos son eliminados mediante un proceso de filtración, este es indispensable para el correcto desarrollo de la etapa preliminar. Además, se puede realizar una pre-aireación, con el fin de eliminar compuestos volátiles que se encuentran presente en el agua negra.

En la etapa primaria se eliminan los sólidos en suspensión, realizado por medio de un proceso de sedimentación simple por gravedad o asistidas por sustancias químicas.

El agua residual es depositada en grandes decantadores y queda retenida allí de 1 a 2 horas.

De forma adicional, se agregan compuestos químicos como aluminio, polielectrolitos floculantes y sales de hierro para completar el proceso. Además, se logra la precipitación de

fósforo, los sólidos en estado de coloides en un 70% o en suspensión muy finos. Esto se desarrolla a través del uso de maquinaria hidráulica, por lo que se le reconoce como tratamiento mecánico (*Tratamientos de aguas residuales*, s.f.).

La etapa dos o mejor conocida como oxidación total, la cual es una modificación del proceso de lodos activos. Lo fundamental de este proceso, es disminuir la cantidad de lodo recosidual. Como consecuencia, todo el lodo degradable formado se consume mediante respiración endógena (*R. S. Ramalho, 1996, capt. 5*).

La etapa final o llamada etapa terciaria, es donde se realizan una serie de procesos, entre ellos la eliminación de agentes patógenos como bacterias fecales y de los nutrientes. Estos procesos aumentan a estándares requeridos la calidad del agua para ser descargada en mares, ríos, lagos y demás cuencas hidrográficas (*Tratamiento de aguas residuales*, s.f.).

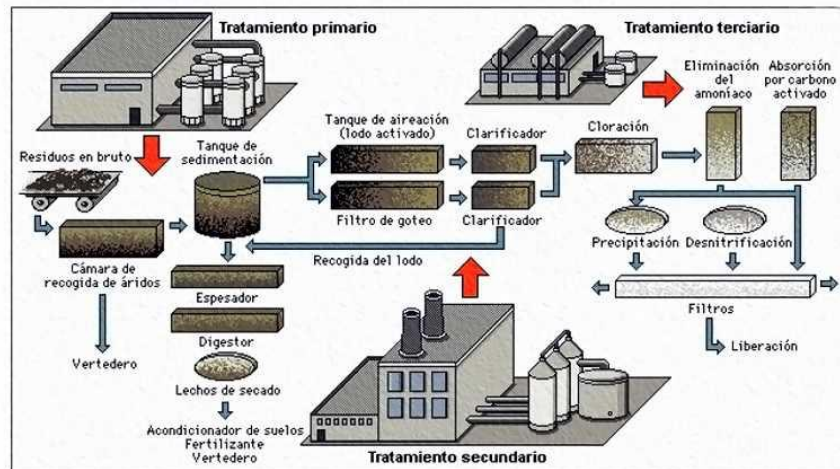


Ilustración 1: Esquema de una planta convencional de tratamiento de aguas residuales. INGELINK (2019).

Este sistema de tratamiento de aguas servidas se ocupa de forma global en los diversos países del mundo. Algunos países mejoran los procesos o le dan mayor importancia en alguna fase. Es por esto que Chile tiene un sistema de Tratamiento de Aguas Residuales similar, pero que se diferencia en ciertos aspectos.

6.2 Tratamiento de Aguas Residuales en Chile

En Chile, el sistema de tratamientos de aguas residuales fue implementado el año 2000 a través del Decreto N°90 que regula el curso de aguas y superficiales al mar. En el caso de los residuos industriales, el 2002 apareció una norma que regula las descargas hacia aguas subterráneas mediante obras de infiltración (*Mancilla, 2015*).

En palabras del ex jefe de la Unidad Ambiental de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (*G. Zamorano, entrevista radial, 13 de febrero de 2015*), el tratamiento de aguas servidas, en el caso de Chile es notable en términos de cobertura, porque hasta el año 2000, prácticamente, no había tratamiento de aguas servidas en las casas y en la actualidad sí, y en un 100%. El 2013 se logró la cobertura total. De esta forma en pocos años se hicieron muchas inversiones.

Pese a las falencias que contiene el sistema de tratamientos de aguas residuales, en comparación con otros países del continente, tiene un buen estándar de tratamiento de aguas y ha puesto como ejemplo con sus procesos.

Esto debido al sistema desarrollado en el año 1990 por la Universidad de Chile, el cual fue liderado por el Doctor José Tohá, que basa su funcionamiento en la utilización de un filtro percolador compuesto de diferentes estratos filtrantes y lombrices, con el cual se logró posicionar a nuestro país nivel internacional (*Mancilla, 2015*).

En sistemas de tratamiento de aguas servidas se invirtieron más de US\$2.500 millones. Las industrias tuvieron que reconvertir procesos, incorporar sistemas de producción limpia o hacer sus propias plantas de tratamiento para dar cumplimiento a las nuevas normas sobre emisión (*Saldivia, 2020*).

La Ley núm. 21.075 regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises.

La presente ley establece y regula los sistemas de reutilización de las aguas grises,

aplicables a áreas urbanas y rurales (*Ley N°21075, artículo 1*).

Para los efectos de lo previsto en esta ley se entenderá por: “aguas grises”, aguas servidas domésticas residuales proveniente de las tinajas de baño, ducha, lavaderos, lavatorios y otros, excluyendo las aguas negras. “aguas negras”, agua residual que contienen excretas (*Ley N°21075, artículo 2*).

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones establecerá las edificaciones en que será obligatorio contar con sistemas de reutilización de aguas grises. Dicha determinación tendrá por finalidad asegurar la utilización eficiente de los recursos hídricos en estos proyectos y se hará en consideración a la ubicación geográfica, déficit de recursos hídricos, carga de ocupación o uso potencial del agua (*Ley N°21075, artículo 14*).

Como se declara a lo largo de este punto, antes del año 2000, existía mucha contaminación, debido al mal o nulo tratamiento de las aguas residuales. Con los años se implementaron nuevas formas de poder sanear el agua, la cual nos posicionó como la mejor en Latinoamérica. Esto nos permitió mejorar la calidad de vida de las personas y del entorno.

Con el transcurso de los años, se fueron implementando normativas y leyes como lo es la ley 21075, para regularizar, mejorar o solucionar problemáticas ambientales, que surgían con el tiempo. Hoy en día esas normativas, si bien ayudan, no mejoran en su totalidad o en gran parte los problemas emergentes.

6.3 Problemáticas Ambientales

El mundo se ha visto envuelto en una elevada preocupación en las últimas décadas y está tratando de mitigar o resolver los efectos y problemas relacionados con la disposición de los efluentes líquidos proveniente del uso doméstico, comercial e industrial de las aguas de abastecimiento.

La primera prioridad que demanda una comunidad es el suministro del agua, con calidad

adecuada y cantidad suficiente. Ya logrado este objetivo, surge otro no menos importante que consiste en la adecuada eliminación de las aguas ya utilizadas que convierten en potenciales vehículos de muchas enfermedades y trastorno del medio ambiente (*Héctor Rodríguez, 2017*).

Esto no es lo único que está afectando al medio ambiente, también se encuentra la disminución de los recursos no renovables, emisiones de contaminantes y el impacto en los paisajes. Lo mencionado anteriormente son algunas de todas las consecuencias que están afectando a nuestro planeta.

Las organizaciones privadas y públicas, además de las instituciones de los Estados, evalúan cada vez más las consecuencias de los sectores energéticos en el impacto ambiental. Existen diversos daños que frenan las tendencias sustentables, aquellos que derivan de la producción, consumo y transporte de diferentes fuentes de energía, como, por ejemplo:

- La disminución progresiva de recursos no renovables.
- Las emisiones dirigidas a la atmósfera, como el óxido de azufre, monóxido de carbono, metales pesados y otros contaminantes.
- Los impactos sobre paisajes y patrimonios locales, debido a la extracción de recursos por parte de empresas cuyo objetivo es satisfacer la demanda de energía local.
- La contaminación acústica y visual de fuentes energéticas, así como la contaminación directa al agua, suelos y otros factores que impactan en la salud tanto del medio ambiente como de las comunidades.
- Los residuos derivados del consumo energético, los cuales son difíciles de tratar a través del tiempo.

(*Conexión ESAN, s.f.*)

El modelo de generación, transporte y consumo actual, absolutamente dependiente de los combustibles fósiles, es insostenible como consecuencia del cambio climático que supone. Según los estudios más recientes, las consecuencias en el Estado español serán el aumento del número de “olas de calor”, con temperaturas cada vez más extremas, y el aumento progresivo de la desertificación.

En la actualidad, el incremento de la demanda y consumo de energía y las dificultades que existen para satisfacer estas demandas con las fuentes de energía disponible, están prefigurando un escenario de crisis energética global (*ISTAS, s. f.*).

Paralelamente al desarrollo de la vida humana, la población ha ido creciendo considerablemente, hecho que ha provocado, entre otras cosas, un aumento de la demanda de energía. Esta demanda “aunque cada vez menos”, es en gran medida satisfecha a través de combustibles fósiles. Esto nos ha llevado a una situación de insostenibilidad energética y con un gran impacto medioambiental y para la salud de las personas (*Primagas, 2020*).

Hoy en día, 789 millones de personas viven sin electricidad, y cientos de millones más tienen acceso a un suministro insuficiente o poco confiable. Aproximadamente 3000 millones de personas cocinan o calefaccionan sus hogares con combustibles contaminantes, como leña u otros tipos de biomasa, provocando contaminación del aire interior y exterior que tiene amplias repercusiones en la salud.

El Banco Mundial formó en 2019 la Alianza para el Almacenamiento de Energía en que participan más de 35 organizaciones dispuestas a contribuir a la ampliación del almacenamiento de energía y las energías renovables en los países en desarrollo mediante la creación de soluciones de almacenamiento de energía adaptadas a sus necesidades (*Banco Mundial, s.f.*).

A nivel mundial, se está viviendo grandes cambios ambientales, los cuales están afectando con mayor intensidad al ecosistema y la calidad de vida de las personas. Como se mencionó, la

producción de energía es un gran factor contaminante ambiental, pero también es un gran problema económico en el presente y futuro.

6.4 Problemas Económicos

A nivel mundial, se vive una importante preocupación, no solo por problemas ambientales que se mencionaron antes, sino por los diferentes problemas económicos que se están generando, debido a la producción de energía, sobre todo por las termoeléctricas, que es una de las más ocupadas a nivel mundial.

El inicio de la crisis energética se remonta al último semestre de 1973, cuando el cártel de los países exportadores de petróleo (OPEP) subió drásticamente los precios del crudo, en más de un 300% en total, limitando al mismo tiempo (de forma temporal) la oferta de este. Un encarecimiento tan significativo de esta materia prima energética básica, que ocasionó a su vez un gran encarecimiento de otros energéticos, provocando un aumento generalizado de los costos de producción en todas las ramas de la economía, ocasionando asimismo considerables cambios en la estructura y, en consecuencia, una sensible aceleración del crecimiento del nivel general de precios, característica de la situación económica de los países capitalistas durante la reactivación generalizada de los años 1972-1973 (*Szeworski A, 1984*).

La energía, su precio y el abastecimiento, vienen ocupando las portadas de todos los medios de comunicación tanto generalistas como económicos. La preocupación de los ciudadanos y las empresas es alta dado el precio que estamos viviendo. El encarecimiento de la energía tendrá consecuencias negativas para la ansiada recuperación económica post pandemia, máxime si en el invierno no existen reservas suficientes y hay escasez de suministros.

La energía generada por el gas es muy costosa, por el alto precio del mismo en estos momentos. La que dé precio al resto de las otras fuentes generadoras, es el efecto de la subasta

marginal. La subasta marginal es aquella donde la energía más cara es la que da precio al resto, independientemente del coste de producción de cada una de ellas (*Miguel Ángel Bernal, 2021*).

El mundo está a puertas de una crisis energética debido a la alta demanda por combustibles fósiles en Europa y Asia, que amenaza con una crisis económica que puede afectar fundamentalmente a los países dependientes de estos combustibles, como Chile.

La utilización abundante de energías fósiles y que han permitido unificar la economía mundial, disminuir la pobreza, aumentar la producción de alimentos y el promedio de vida de las personas, y expandirnos por todo el planeta hasta alcanzar una población que sobrepasará muy pronto los 8.000 millones de seres humanos.

Cada vez que la energía obtenida de los combustibles fósiles deja de ser abundante y barata, la economía mundial entra en pánico y los efectos negativos se sienten prácticamente en todos los países, incluyendo Chile.

La falta de suministros de gas natural en los mercados internacionales está generando en Europa un aumento de los precios de la energía con impacto en otros continentes. Unas de las razones, menos viento y, con ellos, menos generación de electricidad pronosticado para el periodo primavera-verano.

En Asia, la reactivación económica post pandemia, la estrechez de inventarios de carbón térmico y la necesidad de asegurar el suministro de electricidad durante el invierno ha disparado los precios de todos los combustibles fósiles (*Nelson Muñoz G, 2021*).

Los mayores precios de la electricidad han afectado a industrias intensivas en este insumo y a la economía en su conjunto, a través de diferentes mecanismos.

En primer lugar, las exportaciones y las industrias que compiten con importaciones se hacen menos competitivas, y se producen fugas de inversiones hacia economías donde el precio de la electricidad es menor. Esto merma la actividad y la capacidad de producción futura, lo cual

reduce el ingreso disponible de los hogares, los ingresos fiscales y el empleo.

En segundo orden de importancia, el consumo se ve afectado pues los hogares, al enfrentar un aumento del precio de la electricidad, cuentan con un menor ingreso real disponible y tienden a reducir la compra de bienes intensivos en electricidad, así como también de otros bienes. Ante los cambios en patrones de consumo, las firmas reasignan su producción, causando flujos y desempleo de recursos, amplificando así el efecto del aumento en el costo de la electricidad.

En tercer lugar, los recursos desplazados se emplean en sectores menos productivos, disminuyendo así la eficiencia agregada. Asimismo, mayores costos eléctricos afectan la intensidad del uso del capital, volviendo obsoleto al capital menos eficiente en electricidad.

Finalmente, el aumento en los costos marginales de producción y la incertidumbre sobre la evolución futura de los precios de la electricidad asociados al retraso de proyectos eléctricos frena inversiones en firmas intensivas en energía eléctrica, afectando particularmente a la minería (*Agustín Hurtado y Vittorio Corbo, 2014*).

La energía es fundamental en la vida del ser humano y en el que hacer de su día a día, pero si la sociedad sigue consumiendo los recursos naturales para abastecer esta necesidad, el mundo tendrá problemas ambientales y económicos afectando en todas las escalas.

Para poder seguir consumiendo energía, es importante buscar otra fuente y que no afecte con el medio ambiente, como lo son los microbios en la limpieza del agua y en la obtención de energía.

6.5 Microbios en la limpieza del Agua y en la Obtención de Energía

Existen multitud de microorganismos en nuestro entorno y sobre todo en los desechos que expulsamos por las cañerías de los hogares e industrias. El hombre ha utilizado estos microorganismos en los procesos de descontaminación biológica, pero quizás uno de los más

sorprendentes es el *Geobacter sulfurreducens*.

Esta bacteria no se ciñe exclusivamente a su asombrosa capacidad para eliminar residuos contaminantes, sino que, durante este proceso el microorganismo produce, además, pequeñas cantidades de electricidad (*El mundo, 2009*).

El *Geobacter* se puede encontrar en sedimentos de agua dulce, sedimentos marinos anóxicos, sedimentos de sal de pantano, ambientes subterráneos, y acuíferos. Estos ambientes se caracterizan principalmente por ser ricos en nitratos y sulfatos, pero al mismo tiempo deben ser espacios libres de oxígeno puro.

En general el metabolismo celular de los microorganismos para degradar los contaminantes depende de la forma de energía de éstos, de esta forma se clasifican: los que utilizan luz, se denominan fotótrofos; los que utilizan compuestos orgánicos, se denominan quimioorganótrofos; y los que son capaces de utilizar compuestos inorgánicos, se denominan quimiolitótrofos. En particular el metabolismo celular de la especie *Geobacter* es quimioorganótrofo anaerobio, es decir, utilizan compuestos orgánicos como fuente de energía y de carbono para su crecimiento y desarrollo (*Alba Romero, Jorge Vásquez y Armando González, 2012*)

Geobacter sulfurreducens también llamado “electricigens” puede formar biopelículas metabólicamente activas de más de 50 μm de espesor que ayudan a convertir el acetato en electricidad. Su propiedad como nanocables microbianos es importante para la transferencia de electrones de largo alcance a través de las biopelículas.

La cepa *G. sulfurreducens* KN400 puede producir las densidades de corriente más altas conocidas en cultivos puros (*Indian J, 2011*).

Es así como el *Geobacter* es capaz de transformar de forma interna la energía química en energía eléctrica, transfiriendo los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos a electrodos y así construir una celda de combustible microbiana.

6.6 Celdas de Combustible Microbianas

El primer intento de utilizar microbios para producir electricidad fue llevado a cabo por el botánico inglés M.C. Potter. Estos resultados fueron difundidos en 1931 cuando el Químico americano B. Cohen, apoyándose en el conocimiento generado por sus colegas investigadores durante el siglo previo, creó las primeras medias pilas microbianas, que al conectarse en serie fueron capaces de proporcionar un voltaje de 35 v a una corriente de 2mA.

El primer prototipo de pila de combustible microbiana (microbial fuel cell, MFC) similar a las configuraciones actuales fue lanzado por S. Suzuki en 1973. Al final de la década de los 70, se generó el primer modelo computacional de pila de combustible biológica. En la década de los 80, el interés alrededor de las pilas de combustible microbianas creció de forma significativa y las bases reguladoras del consorcio microbiano como catalizador anódico empezaron a ser investigadas. La primera MFC a escala piloto fue instalada en 2007 en Brisbane, Australia, y pequeñas empresas empiezan a emerger fruto del avance de esta tecnología (*Madrid Blogs*, 2012).

6.6.1 Principio de funcionamiento

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs) son un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno).

Una CCM típicamente está compuesta por dos cámaras, una anaeróbica y otra aeróbica en medio de las cuales hay un separador. La cámara anaeróbica contiene sustratos orgánicos que, al oxidarse por acción de los microorganismos, generan electrones, protones y CO₂. En cada una de las cámaras se coloca un electrodo, el ánodo en la cámara anaeróbica y el cátodo en la cámara

aeróbica, una vez los electrones se liberan en la cámara anódica, éstos son captados por el ánodo y posteriormente transferidos hacia el cátodo mediante un circuito externo. Simultáneamente, en la cámara anódica se generan protones que migran hacia la cámara catódica a través del separador, donde se combinan con el oxígeno del aire para reducir a agua con los electrones que captan directamente del cátodo, debido a que esta reacción no está catalizada por microorganismos el cátodo se refiere como abiótico (Revelo D; Hurtado N; Ruiz J., 2013).

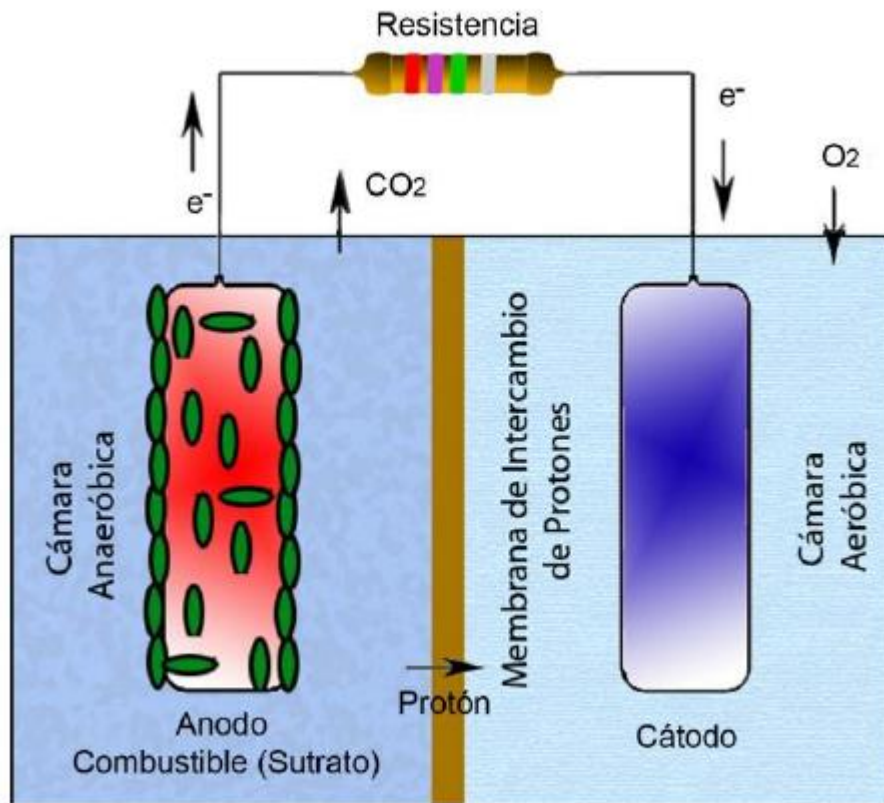


Ilustración 2: Detalles principales de una CMM de cámara doble. Modificada a partir de Du al. ResearchGate (2007).

6.6.2 La celda de combustible en las plantas de tratamiento de aguas residuales

Una planta de tratamiento de agua residual está formada por las etapas ya descritas y mostradas en el punto 6.1. En la cual se describen los tratamientos primarios, secundarios y terciarios.

La ubicación de un CCM dentro de la planta deberá estar ubicada antes del reactor biológico, es decir, del tratamiento secundario. Existen en la actualidad dos posibilidades para su ubicación:

- Antes del Sedimentador primario
- Después del Sedimentador primario

En el primer caso y ante la situación de que la CCM se tiene aguas residuales con mucho menor contenido de materia orgánica, el tiempo de retención hidráulica será menor en todos los procesos posteriores. Por otro lado, su implementación en instalaciones existentes es muy sencilla.

En el segundo caso, se coloca posterior a los sedimentadores en los cuales se produce la coagulación para su posterior floculación. Esta situación tiene una ventaja de que la materia orgánica presente se encuentra más concentrada y, por lo tanto, los niveles de energía serán mayores. Esta situación es más difícil de implementar en plantas que ya están funcionando (*Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, 2010*).

Las celdas de combustibles microbianas en el último tiempo han sido de gran interés para muchas universidades, pero sobre todo para diferentes países, que buscan una alternativa para mitigar la contaminación y a su vez conseguir electricidad.

6.7 Modelo y Resultados de otros países

El proceso de producción de energía a través de aguas residuales ha sido de gran impacto en la ciencia a nivel mundial, provocando que muchos países deseen incorporar este sistema para obtener electricidad.

“El potencial de mejora de eficiencia energética en América Latina es elevadísimo”. Hay muchas plantas de tratamiento de agua en la región con problemas de abastecimiento de energía, pero que, con un manejo adecuado, podrían incluso vender energía a las empresas de electricidad.

En Colombia, por ejemplo, Empresas Públicas de Medellín-EMP controla la utilización de energía en sus instalaciones, especialmente a nivel de las bombas de agua donde más se puede ahorrar electricidad, y logró ahorrar el 2,32% de energía de 2010 a 2013, equivalente a 455.000 dólares.

También en Uruguay y Nicaragua se está trabajando, con apoyo del Banco Mundial, en la reducción de agua no contabilizada (la que se pierde antes de llegar a los usuarios) y de eficiencia energética, que incluye análisis y auditorías energéticas, además de reemplazo de equipos por otros más eficientes (*Isabel Schaefer, 2015*).

Investigadores en Bioelectroquímica del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) han conseguido mejorar la eficiencia energética de las celdas. Los resultados, a nivel de laboratorio y publicados en la revista *Water Research* son muy prometedores y demuestran que estos sistemas tendrían un nicho de mercado a escala industrial, según sus autores.

Los científicos, coordinados por los profesores Alberto Guisasola y Juan Antonio Baeza, han utilizado aguas residuales reales, en lugar de aguas sintéticas muy biodegradables utilizadas en la mayor parte de los experimentos (*UAB, 2015*).

En Alemania, el aprovechamiento energético de residuos urbanos tiene una larga tradición. En Alemania hay dos grandes regiones, en las que se reutiliza el agua tratada, por un lado, en la de Braunschweig, con la planta de tratamiento de aguas residuales y por otro la ciudad vecina de Wolfsburg. Estas dos plantas son las únicas depuradoras grandes que reutilizan agua tratada en Alemania.

Los restos que se sedimentan en el proceso de tratamiento de aguas residuales conforman el lodo activado, este contiene grandes cantidades de bacterias que se usan para depurar el agua, pero también restos domésticos mediante la descomposición del lodo activado, se obtiene biogás, en el proceso de descomposición participan microorganismos como las bacterias (anteriormente mencionado), en ausencia de oxígenos, los microorganismos transforman materia orgánica en metano, es decir, en biogás.

En las plantas hay 8 generadores de energía eléctrica, los cuales, en su totalidad generan el 100% de la energía que requiere la planta (*DW made for minds, 2017*).

Son varios países los que han estudiado y aplicado la obtención de energía eléctrica a través de aguas residuales mediante celdas de combustión microbiana en plantas de aguas residuales. En los países en los cuales se ha implementado, se han visto beneficiados, tanto en la producción de energía como en la limpieza y reutilización del agua.

7 METODOLOGÍA

El proyecto se evaluará económicamente, mediante el análisis de costo beneficio generado, al implementar una celda de combustible microbiana en plantas de tratamientos de aguas residuales. Para obtener esto, lo primero que se determinará son los costos económicos de realizar el proyecto, continuando con una valoración económica de los beneficios asociados a la disminución del consumo de agua potable. Con estos datos, se podrá realizar el cálculo del Van, a fin de determinar si el proyecto es beneficioso económicamente o no, para que el estado pueda instalar e implementar el sistema en diferentes plantas de aguas residuales a lo largo del país.

7.1 Recopilación de Información Relevante

La información fue recopilada a partir de técnicas de agrupación y clasificación, en las

cuales además se encuentra combinación de palabras claves (por ejemplo: celdas de combustibles, agua residual, energía, etc.) y operadores de diferentes buscadores como SciELO, Google académico, Scopus, Sciencedirect, entre otros. Esta búsqueda y recopilación de información fue necesaria para determinar partes y componentes de las celdas de combustible microbiana, sus orígenes y otra información de importancia.

7.2 Criterio de Aprobación para la Ejecución del Proyecto

A fin de comprobar si la ejecución del proyecto es conveniente económicamente, se empleará el método del VAN Social o VANS, además de establecer la efectividad y eficiencia. Es por ello que se detallarán de forma clara los métodos a emplear:

- **VAN Social o VANS:** Es el método más utilizado, que busca estimar el valor actual de los flujos del proyecto. Si el proyecto social tiene un VANS positivo, entonces es rentable y conveniente para la sociedad.
- **Efectividad de la ejecución del proyecto:** Se asocia directamente con el logro de los objetivos estratégicos, y se traduce en criterios de éxito que se ven reflejados por el grado de penetración en la sociedad.
- **Eficiencia del proyecto:** Son los beneficios a partir de los costos en un momento determinado, en otras palabras, son los beneficios obtenidos en cada periodo en relación con los costos que se desembolsaron en determinado periodo.

7.3 Emisión de agua servida por habitante

La cantidad de agua servida generada por una población es proporcional con el consumo de agua potable abastecida para las personas. En Chile se estima que la producción promedio de aguas servidas de tipo rural es de 160 litros por habitante.

7.4 Análisis económico

Se considerarán dos ítems de costos, el primero es la inversión inicial, correspondiente a los costos de adquisición, instalación y puesta en marcha. El segundo costo corresponde a los gastos necesarios para la mantención de las celdas. A continuación, se detallarán los distintos costos asociados al proyecto de obtención de energía a través de aguas residuales mediante celda de combustible microbianas en plantas de aguas residuales:

1. **Inversión inicial:** Son todos los costos de la tecnología lista para la puesta en marcha, que incluyen los siguientes ítems:

- Diseño, supervisión de ingeniería y construcción.
- Todos los materiales de la CCM y su instalación.
- Tuberías, instrumentación y sistemas de control.
- Edificación y estructura.
- Instalaciones auxiliares, tales como servicios públicos, terrenos y obras de ingeniería civil.

Para efectos de este estudio, la celda de combustible microbiana será un modelo, que ya se ha realizado en diferentes lugares y laboratorios, la cual es posible encontrarlas en un tamaño o capacidad de ml menor a la que se necesita en una planta de agua residual promedio, por lo que se deberá de construir en base a las CCM ya existente, pero mejorando la capacidad de agua residual a tratar. A continuación, se presenta el modelo CCM de 50 ml existente en el mercado.



Ilustración 3: Diseño celda de combustible microbiana. Elaborado por SAIDKOCC.

Cabe destacar que este modelo no es el único, existen diversas formas de estructura y con diferentes materiales, dependiendo de la necesidad y precio que se desea invertir, sin embargo, fue escogida para simplicidad del estudio dado a tratarse del sistema con los costos operacionales en el mercado conocidos a diferencias de los otros modelos.

Debido a que existen diversas plantas de aguas residuales a lo largo de Chile, con diferente capacidad de aguas a tratar por segundo. Se estima que en promedio una planta pequeña de agua residual puede tratar entre 2 a 3 litros por segundo, mientras que una planta grande como la Farfana trata aproximadamente 300 litros por segundo. Para efectos del estudio, se estimará un promedio de 100 litros por segundo para la estimación de los costos e inversión.

Dicho modelo de CCM es adquirida en el mercado por un valor de \$187.047 para 50 ml, por lo cual, al llevar el costo a 360.000litros, la celda tendrá un valor de \$374.094.000, a este valor se le debe agregar la instalación, lo cual aumentara su valor considerablemente dependiendo de las acciones y modificaciones necesarias en las plantas de aguas residuales ya establecidas, a fin de tener un costo más aproximado y obteniendo la mayor capacidad de la CCM, está será ubicada después del sedimentador primario. Debido a las modificaciones e instalación correspondiente de

la CCM, el valor puede aumentar en \$200.000.000, por lo tanto, el valor final de la celda de combustible microbiana instalada podría sobrepasar los \$574.094.000.

2. **Costos fijos:** Se considerarán como costos fijos, como todos aquellos costos que permanecen constante sin importar la variación de producción.

- **Mantenimiento:** Es uno de los gastos más importante para el funcionamiento de una CCM. La cual se realizará cada dos años, donde se verifica que la estructura se encuentre en buen estado y si hay que cambiar algún material o pieza.
- **Mano de obra:** Se considera la mano de obra que se encuentra directamente involucrada en la ejecución del proceso (supervisores, especialistas, etc.), además de ser necesaria para dejar funcionando la celda de combustible microbiana. Los cuales se encontrarán desarrollando y trabajando en el proyecto en un periodo de 5 meses. Donde el sueldo destinado a recursos humanos será de \$18.000.000, lo que significará un gasto mensual de \$3.600.000 en mano de obra.

De esta manera se tienen los siguientes costos:

$$\text{Inversión inicial} = \$574.094.000$$

$$\text{Mano de obra} = \$18.000.000$$

$$\text{Costo de mantención} = \$5.000.000$$

7.5 Estimación de Beneficios (Enfoque Social)

A partir de la aplicación del proyecto, es factible encontrar beneficios sociales directos que

se pueden monetizar, los cuales corresponden en la disminución del consumo de energía eléctrica geotérmica (energía tradicional). Una planta geotérmica en Chile como lo es Cerro Pabellón (primera planta geotérmica de Chile), produce 58 GW por años, mientras que solo una CCM con capacidad de 360000 L en una planta de agua residual produce 18,0396 GWh por año, lo que equivale a 18.039.600 kWh por año.

Producir un kW de energía térmica tiene un costo de 20 USD/kW en promedio por años, si este valor lo llevamos a los 58GW producido por la planta en Cerro Pabellón, será de USD 1.160 millones.

Para definir el ahorro anual de producción de energía geotérmica, es necesario realizar el cálculo que se presenta a continuación:

$$\text{Ahorro energético} = E \times N^{\circ}ccm \times N^{\circ}p \times 20 \text{ USD}$$

Donde:

E= energía producida

N°ccm= número de celdas de combustible microbianas en una planta de agua residual

N°p= número de plantas con celdas de combustible microbiana

Para efectos del estudio usaremos solo una celda de combustible microbiana en una planta de tratamiento de agua residual.

$$\text{Ahorro energético} = 18039600 \times 1 \times 1 \times 20 \text{ USD}$$

$$\text{Ahorro energético} = 360.792.000 \text{ USD}$$

Esto es lo que se ahorraría en un año produciendo electricidad a través de una celda de combustible microbiana en una planta de agua residual, si este valor se lleva a pesos chilenos, se obtiene lo siguiente:

$$\text{Ahorro energético en pesos} = 360.792.000 \times \text{valor dolar en pesos chilenos}$$

Se considerará el valor del dólar en 909.05 pesos.

$$\text{Ahorro energético en pesos} = 360.792.000 \times 909.05$$

$$\text{Ahorro energético en pesos} = \$327.977.967.600$$

Además de este beneficio de ahorro en la producción de electricidad por CCM en vez de producir electricidad geotérmica, tenemos beneficios de vender los kWh producidos por las celdas de combustibles microbianas a la sociedad.

$$\text{Ingresos} = E \times \text{precio del kWh} \times \%$$

Donde:

E= kWh producidos por la celda de combustible microbiana

Precio del kWh= en el año 2022 se encuentra en un promedio de \$100

%= variación del aumento del precio del kWh

7.6 VAN Social

Para valorar el proyecto de manera social se realizó el cálculo del VAN_{social} mediante las siguientes formulas:

$$\text{VANs} = -\text{IS} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{BSNt}}{(1 + r^s)^t}$$

Donde:

IS= Inversión Social

BSN= Beneficios Sociales Neto

r^s = Tasa social de descuento

$$\text{BSNt} = \text{Ahorro}_{\text{anual}} - \text{Costos}_{\text{anuales}}$$

$$\text{BSNt} = \text{Ingresos}_{\text{anual}} - \text{Costos}_{\text{anuales}}$$

Mediante la disminución de electricidad geotérmica al ejecutar el proyecto, es posible

disminuir los gastos destinados a ese tipo de fuente, e invertirlo en adaptar y generar las celdas de combustible microbianas en diferentes plantas de aguas residuales. Además de recibir beneficios en los ingresos por venta de la kWh producidos en las plantas de tratamiento de agua residual. Cabe destacar que se considera el aumento de las tarifas de kWh en un 5% año a año, en base al precio de \$100 por kWh consumido.

INGRESOS				
Año	%	q electricidad	q precio	total
1	1,05	18039600	105	\$1.894.158.000
2	1,05	18039600	110	\$1.988.865.900
3	1,05	18039600	116	\$2.088.309.195
4	1,05	18039600	122	\$2.192.724.655
5	1,05	18039600	128	\$2.302.360.887
6	1,05	18039600	134	\$2.417.478.932
7	1,05	18039600	141	\$2.538.352.878
8	1,05	18039600	148	\$2.665.270.522

Tabla 1: Ingresos (beneficios) anuales tras aplicar la CCM. Elaboración propia.

AHORRO				
Año	q electricidad	q precio en USD	precio en \$	total
1	18039600	20	909,05	\$ 327.977.967.600
2	18039600	20	909,05	\$ 327.977.967.600
3	18039600	20	909,05	\$ 327.977.967.600
4	18039600	20	909,05	\$ 327.977.967.600
5	18039600	20	909,05	\$ 327.977.967.600
6	18039600	20	909,05	\$ 327.977.967.600
7	18039600	20	909,05	\$ 327.977.967.600
8	18039600	20	909,05	\$ 327.977.967.600

Tabla 2: Ahorro (beneficios) anuales tras aplicar CCM. Elaboración propia.

Por otro lado, se encuentran los costos asociados a la instalación de la celda de combustible microbiana en la planta de tratamiento de agua residual, en este caso corresponde netamente a la mantención anual de la instalación de la CCM en la planta, el cual tiene un costo anual de \$5.000.000. A continuación, se presentan tales costos asociados.

COSTOS			
Año	q de CCM	valor	total
1	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
2	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
3	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
4	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
5	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
6	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
7	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
8	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000

Tabla 3: Costos anuales tras aplicar la CCM. Elaboración propia

De esta manera es posible calcular los beneficios para cada uno de los casos descritos anteriormente. Se presentan las tablas con los beneficios anuales (beneficios – costos).

BENEFICIOS	
Año	total
1	\$1.889.158.000
2	\$1.983.865.900
3	\$2.083.309.195
4	\$2.187.724.655
5	\$2.297.360.887
6	\$2.412.478.932
7	\$2.533.352.878
8	\$2.660.270.522

Tabla 5: Beneficio (ingreso -costos) tras aplicar la CCM. Elaboración propia.

BENEFICIOS	
Año	total
1	\$ 327.972.967.600
2	\$ 327.972.967.600
3	\$ 327.972.967.600
4	\$ 327.972.967.600
5	\$ 327.972.967.600
6	\$ 327.972.967.600
7	\$ 327.972.967.600
8	\$ 327.972.967.600

Tabla 7: Beneficio (ahorro- costos) tras aplicar la CCM. Elaboración propia.

7.7 Efectividad del proyecto

Actualmente la planta energética geotérmica de Cerro Pabellón produce 58 GW al año, lo que es equivalente a 58.000.000 kW, consumido en su totalidad por el país, esto sin contar la cantidad de energía producida por otras fuentes. Como se mencionó anteriormente, al momento de aplicar la celda de combustible microbiana en una planta de tratamiento de agua residual, es posible producir el 31% de energía de una planta geotérmica. Estos valores son correspondientes a la instalación de una celda de combustible microbiana en una planta de tratamiento de agua residual, si se instalaran más CCM en más planta, el porcentaje de producción de energía alternativos sería aún mayor.

7.8 Eficiencia del proyecto

$$Eficiencia = \frac{Beneficio}{Costo}$$

En el actual estudio, es factible calcular la eficiencia según la formula expresada en un comienzo. Se considerará eficiente, cuando el resultado de la división sea mayor a 1 en el periodo determinado t, traduciéndose esto en que los beneficios son mayores a los costos asociados.

Mientras más elevado sea el valor obtenido, más eficiente será el proyecto. A continuación, se presenta la eficiencia para los distintos periodos del proyecto.

EFICIENCIA = BENEFICIOS(ahorro)/COSTOS			
Año	Beneficio	Costo	Eficiencia
1	\$ 327.972.967.600	\$ 5.000.000	65594,59352
2	\$ 327.972.967.600	\$ 5.000.000	65594,59352
3	\$ 327.972.967.600	\$ 5.000.000	65594,59352
4	\$ 327.972.967.600	\$ 5.000.000	65594,59352
5	\$ 327.972.967.600	\$ 5.000.000	65594,59352
6	\$ 327.972.967.600	\$ 5.000.000	65594,59352
7	\$ 327.972.967.600	\$ 5.000.000	65594,59352
8	\$ 327.972.967.600	\$ 5.000.000	65594,59352

Tabla 11: Índices de eficiencia en relación con los ahorros de la CCM. Elaboración propia.

EFICIENCIA = BENEFICIOS(ingresos)/COSTOS			
Año	Beneficio	Costo	Eficiencia
1	\$ 1.889.158.000	\$ 5.000.000	377,8316
2	\$ 1.983.865.900	\$ 5.000.000	396,77318
3	\$ 2.083.309.195	\$ 5.000.000	416,661839
4	\$ 2.187.724.655	\$ 5.000.000	437,544931
5	\$ 2.297.360.887	\$ 5.000.000	459,472177
6	\$ 2.412.478.932	\$ 5.000.000	482,495786
7	\$ 2.533.352.878	\$ 5.000.000	506,670576
8	\$ 2.660.270.522	\$ 5.000.000	532,054104

Tabla 9: índices de eficiencia en relación con los ingresos de la CCM. Elaboración propia.

8 RESULTADOS

Al momento de determinar el Van del proyecto, se tomaron dos casos, el primero fue con los beneficios en relación con los ingresos por venta de los kW producido por las CCM, y el segundo caso son los beneficios en relación con los que se ahorra por producir electricidad en una planta geotérmica (energía tradicional). Se utilizaron los beneficios (beneficios – costos) anuales, descontado a una tasa anual del 6%, debido a que es un proyecto social. A continuación, se ilustra la tabla correspondiente a tales beneficios descontados.

FLUJO DE CAJA		Tasa	6%						
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ingresos		\$ 1.894.158.000	\$ 1.988.865.900	\$ 2.088.309.195	\$ 2.192.724.655	\$ 2.302.360.887	\$ 2.417.478.932	\$ 2.538.352.878	\$ 2.665.270.522
Egresos	\$ 592.094.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
Flujo de Caja	\$ -592.094.000	\$ 1.889.158.000	\$ 1.983.865.900	\$ 2.083.309.195	\$ 2.187.724.655	\$ 2.297.360.887	\$ 2.412.478.932	\$ 2.533.352.878	\$ 2.660.270.522
VAN	\$12.461.479.873,71								

Tabla 13: Flujos anuales (ingresos) descontados a tasa del 6% con su respectivo VAN tras la aplicación de la CCM. Elaboración propia.

FLUJO DE CAJA		Tasa	6%						
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ahorros		\$ 327.977.967.600	\$ 327.977.967.600	\$ 327.977.967.600	\$ 327.977.967.600	\$ 327.977.967.600	\$ 327.977.967.600	\$ 327.977.967.600	\$ 327.977.967.600
Egresos	\$ 592.094.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
Flujo de Caja	\$ -592.094.000	\$ 327.972.967.600	\$ 327.972.967.600	\$ 327.972.967.600	\$ 327.972.967.600	\$ 327.972.967.600	\$ 327.972.967.600	\$ 327.972.967.600	\$ 327.972.967.600
VAN	\$1.920.804.160.724,34								

Tabla 15: Flujos anuales (ahorros) descontados a tasa del 6% con su respectivo VAN tras la aplicación de la CCM. Elaboración propia.

9 ANALISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

En cuanto a la efectividad del proyecto, es posible afirmar que, en los dos casos se logra observar una considerable disminución en la utilización de energía geotérmica (energía tradicional). Esta variación es equivalente a la cantidad de kWh producido por la CCM, por lo que la producción de energía geotérmica, en este caso de la planta Cerro Pabellón, ya no es necesario seguir invirtiendo para producir electricidad tradicional.

En el caso 1, donde se consideran los ingresos por la venta de los kWh producida en la planta de tratamiento de agua residual, es el caso más objetivo y llevado a la realidad, puesto que, esta electricidad pasará a comercializarse al mismo precio que la electricidad producida por otras fuentes renovables. El caso 2, solo se consideraría si fuera 100% gratuita la electricidad producida y entregada a los habitantes del país.

Ahora bien, considerando los dos casos de forma separada, el proyecto es efectivo en todos los escenarios, ya que logra disminuir y reemplazar la producción de kW producidos en una planta geotérmica.

En relación con la eficiencia del proyecto, se puede observar en las tablas 6 y 7 altos valores en cada uno de los periodos, por lo que en ambos casos se considera que el proyecto es eficiente. Esto se debe principalmente a que los costos de mantención anual son relativamente bajos en comparación a la inversión inicial y a lo que se obtiene por ingresos o ahorro (en sus respectivos casos), siendo este punto una cualidad muy atractiva, logrando mantener beneficios más altos y siendo altamente eficiente.

Con respecto al cálculo del VAN, es posible afirmar que para las mayorías de las plantas

de tratamiento de agua residual es conveniente realizar el proyecto, dado que para todas las plantas o en su mayoría, el VAN siempre es mayor a cero, siendo un proyecto viable económicamente para los interesados (en este caso para el estado y concesiones). Debido a que la electricidad se cobrará de la misma forma que se cobra la energía producida por otras fuentes de energía renovable, el VAN que se considerará es el de los ingresos.

Se recomienda dar a conocer esta alternativa al estado y a las diferentes plantas de tratamiento de agua residual en diferentes partes del país, ya que además de contribuir con el medio ambiente, con esto nos referimos, a la disminución gases contaminantes y a la ocupación de materiales no renovables; es una buena opción económicamente hablando, debido a que ingresará dinero por la distribución de los kWh producidos por las CCM y por el ahorro de invertir en energía geotérmica.

Es necesario tener en consideración la cantidad de agua residual que ingresa a la planta por segundo, debido a que, elaborar e instalar la celda de combustible microbiana en el lugar correcto, requiere de una inversión inicial elevada, pero que, de manera rápida se recupera, esto no siempre ocurrirá, ya que depende de los kWh producidos.

Ante la información entregada, es posible acervar que, para planta con menor capacidad de agua residual, comenzarán a ver reflejada su inversión en meses posteriores a plantas con mayor capacidad de agua residual.

Finalmente, respecto a la TIR es posible afirmar que la rentabilidad esperada por el estado y/o concesiones es muy alta en proyecto de energía alternativa, esto se puede observar en el caso donde se recibe ingresos por la entrega de los kWh producidos y por los ahorros al momento de tener una CCM. Los cuales se muestran a continuación.

TIR caso de ingresos	324%
TIR caso de ahorro	147073%

Tabla 17: TIR del proyecto. Elaboración propia.

Es importante mencionar que la celda de combustible microbiana que se presenta en el proyecto tiene una vida útil de 15 años, y a su vez, tiene los menores costos de operación existente y con los materiales más efectivo, para almacenar y producir energía. Si bien el modelo de CCM presentado a lo largo del proyecto, no es de fácil elaboración, es el más idóneo para la producción de energía a través de las aguas residuales.

10 DISCUSIÓN

El presente estudio se realizó con los valores más pesimistas que se encuentran en el mercado, tanto a nivel nacional como internacional. Esto debido a que se quería demostrar que, a pesar de encontrarse en los peores escenarios posibles, es un proyecto viable. Dado a esto se puede corroborar que para las plantas de tratamiento de agua residual que quieran implementar las celdas de combustible microbiana este proyecto es totalmente viable, sin embargo, en el caso que la planta de tratamiento tenga una capacidad menor (es decir 2 o 3 litros por segundo aproximadamente), tendrá más tiempo en recuperar la inversión inicial de la CCM y su instalación, en comparación a una planta con mayor capacidad. Esta última información puede ser analizada en un próximo estudio, analizando en profundidad la capacidad de la celda de combustible microbiana, materiales, ubicación dentro de la planta, entre otras cosas; y así disminuir los costos, manteniendo la tasa de 6% y cambiando el horizonte de tiempo del estudio.

Por otra parte, al tratarse de un proyecto con objetivo social y ambiental, se podría tomar en cuenta los beneficios privados, tras la implementación de las celdas de combustible microbiana

en plantas de tratamientos de aguas residual, es decir, sin cuantificar los beneficios económicos de la disminución de producción de energía geotérmica en Chile y aumentando la tasa del 6% a una tasa del 30%.

En el caso de realizar el proyecto desde otro enfoque, es decir, con un proveedor o cambiando los materiales de la CCM, pero manteniendo el horizonte de tiempo de 8 años y la tasa de un 6%, será necesario considerar el nuevo valor de la inversión inicial, es decir, el valor del proveedor por entregar la CCM y la mano de obra de la instalación; o el valor de los nuevos materiales para elaborar la celda de combustible microbiana, además de los materiales para la instalación en la planta y las personas que trabajarán en el proyecto. Ante lo mencionado, para que el proyecto sea rentable, se debe recordar que el VAN debe ser mayor o igual a cero, por lo que los valores en la inversión no deberán sobrepasar los ingreso por venta de los kWh y el ahorro que se genera al instalar la CCM, los cuales se muestran a continuación.

Años	Inversion inicial maxima
1	\$ 1.894.158.000
2	\$ 1.988.865.900
3	\$ 2.088.309.195
4	\$ 2.192.724.655
5	\$ 2.302.360.887
6	\$ 2.417.478.932
7	\$ 2.538.352.878
8	\$ 2.665.270.522
todos los años	\$ 327.977.967.600

Tabla 19: Inversión inicial máxima donde el proyecto es rentable. Elaboración propia.

Con lo cual, todas aquellas plantas de tratamiento de agua residual que deseen implementar las celdas de combustible microbiana deben tener un costo o inversión menor a los indicados en la tabla 11, siendo viables en un horizonte de 8 años.

11 LIMITACIONES

Una de las limitaciones clara del estudio es que se sigue el dato del valor del dólar como \$909,05 como un dato duro, es decir, como si este no cambiara, sin embargo, este es sólo un valor dado al día que se hicieron los estudios y flujos de caja, el valor del dólar va fluctuando día a día, semana tras semana y año tras año, por lo que no se puede predecir de forma exacta si los otros años el valor del dólar será mayor o menor al entregado. De esta manera es posible que el ahorro producido por los kWh producidos en las celdas de combustible microbiana aumente o disminuye según el periodo que se esté evaluando.

Otra de las limitaciones que se encuentran en el estudio, es que se considera la entrega total de los kWh producido en una planta de tratamiento de agua residual, hacia la sociedad. Sin contabilizar un porcentaje año a año sobre lo que se entrega. Esto puede cambiar en los resultados de ingreso por kWh.

Finalizando una de la limitación más importante y por la cual puede variar la rentabilidad del proyecto es la capacidad de todas las plantas de aguas residuales que se encuentran dentro del país, ya que hay planta que contienen menos capacidad de agua residual por segundo. Lo que se traduciría en menos producción de kWh en un año. Esto no se consideró dentro del proyecto, para realizarlo de manera más simplificada o acotada.

12 REFERENCIAS

AliExpress. (n.d.). *Reactor microbiano de laboratorio de alta calidad, célula de combustible microbiana de alta transparencia 50 ml.*

<https://es.aliexpress.com/item/1005004825813522.html>

Banco Mundial. (n.d.). *Energía.*

<https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview#2>

Bernal, M. Á. (2021, octubre 08). *Las causas del problema energético.* El Economista.

<https://www.eleconomista.es/opinion-blogs/noticias/11424462/10/21/Las-causas-del-problema-energetico.html>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2018, febrero 15). Ley N°21075.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2021, febrero 13). Ley N°21305.

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2021, septiembre). *Matriz energética y eléctrica en Chile.*

[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN_Matriz_energetica_electrica_en_Chile.pdf#:~:text=En%20la%20matriz%20energ%C3%A9tica%20primaria,y%20gas%20natural%20\(16%25\).](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN_Matriz_energetica_electrica_en_Chile.pdf#:~:text=En%20la%20matriz%20energ%C3%A9tica%20primaria,y%20gas%20natural%20(16%25).)

Comisión Nacional de Energía. (2022, mayo 19). *Ingresa Proyecto de Ley que permitirá que no aumenten precios de electricidad.*

<https://www.cne.cl/prensa/prensa-2022/04-mayo-2022/ingresa-proyecto-de-ley-que-permitira-que-no-aumenten-precios-de-electricidad/#:~:text=Usuarios%20que%20registren%20un%20consumo%20mensual%20mayor%20a%20250%20y,2%20C5%20pesos%20por%20kWh>

Conexión ESAN. (n.d.). *El consumo energético: ¿cuál es su impacto ambiental a nivel mundial?*

<https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/el-consumo-energetico-cual-es-su-impacto->

[ambiental-a-nivel-mundial](#)

DW. (2017, mayo 26). *Energía sustentable a partir de aguas residuales*.

<https://www.dw.com/es/energ%C3%ADa-sustentable-a-partir-de-aguas-residuales/av-38987879>

Ecomar. (2020, Julio 9). *¿Qué son las aguas residuales?*

<https://fundacionecomar.org/que-son-las-aguas-residuales/>

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional. (n.d.). *Energías a partir de las aguas residuales*.

http://www.edutecne.utn.edu.ar/energia_aguas_residuales/energia_aguas_residuales.pdf

Electricidad la revista energética de Chile. (2021, junio 24). *CNE estima un crecimiento de la demanda eléctrica de 5,2% para el próximo año*

<https://www.revistaei.cl/2021/06/24/cne-estima-un-crecimiento-de-la-demanda-electrica-de-52-para-el-proximo-ano/#>

Generadoras de Chile. (n.d.). *Generación eléctrica en Chile*.
<http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

GIBA. (n.d.). *Las aguas servidas y su caracterización*.
http://www.eula.cl/giba/proyecto/images/contenidos/educacionambiental/Fichas_1_AS.pdf

Hurtado, A., & Corbo, V. (2014, noviembre). *Causas y consecuencias del problema energético en Chile: Una visión desde la macroeconomía*. CEP Chile.

Instituto Sindical del Trabajo, Ambiente y Salud. (n.d.). *Problema Ambiental del consumo de energía*.

<https://istas.net/istas/guias-interactivas/ahorro-y-eficiencia-energetica/problema-ambiental-del-consumo-de-energia>

J., I. (2011, junio). *Geobacter: ¡El microbio eléctrico! Pilas de combustible microbianas*

eficientes para generar electricidad limpia y barata. NIH.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3209890/#CR2>

Madrid blogs. (2012, diciembre 19). *Pilas de combustible microbianas de agua residual. Un poco de historia.*

[https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2012/12/19/131838#:~:text=El%20primer%20prototipo%20de%20pila,al.%2C%201979%20a%20y%20b\).](https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2012/12/19/131838#:~:text=El%20primer%20prototipo%20de%20pila,al.%2C%201979%20a%20y%20b).)

Mancilla, C. (2015, febrero 13). *Chile avanza en la descontaminación de aguas residuales.* Radio Universidad de Chile.

<https://radio.uchile.cl/2015/02/13/chile-avanza-en-la-descontaminacion-de-aguas-residuales/>

Memoria Chilena. (2021). *Los primeros años de la electricidad en Chile (1883-1930).*

<http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-683.html>

Ministerio de Energía. (n.d.). *Energía 2050.*

https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_politica_energetica_de_chile.pdf

Ministerio de Energía. (2020, abril 29). *Abren fondos por \$570 millones para proyectos de eficiencia energética y energías renovables*

<https://energia.gob.cl/noticias/atacama/abren-fondos-por-570-millones-para-proyectos-de-eficiencia-energetica-y-energias-renovables#:~:text=Abren%20fondos%20por%20%24570%20millones%20para%20proyectos%20de%20eficiencia%20energ%C3%A9tica%20y%20energ%C3%ADas%20renovables>

Ministerio de Energía. (2021, septiembre 07). *Gobierno y empresas logran precio promedio de 23,78 USD/MWH con energías renovables y almacenamiento.*

<https://energia.gob.cl/noticias/nacional/gobierno-y-empresas-logran-precio-promedio-de-2378-usdmwh-con-energias-renovables-y-almacenamiento>

Muñoz, N. (2021, octubre 12). *Crisis energética mundial: ¿cómo impacta en Chile?* El

Mostrador.

<https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/columnas/2021/10/12/crisis-energetica-mundial-como-impacta-en-chile>

Pinilla, J. A. (2019, noviembre 16). *El problema energético mundial. Energías renovables y cambio climático*. Energy Management.

<https://e-management.mx/2019/11/16/el-problema-energetico-mundial-energias-renovables-y-cambio-climatico/>

Primagas. (2020, Julio 21). *Impacto del consumo de energía en el medioambiente*.

<https://blog.primagas.es/impacto-del-consumo-de-energia-medioambiente>

Ramalho, R. S. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Reverté

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=T9MfEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=tratamientos+de+aguas+residuales&ots=3jJRhk_jta&sig=wqXfuv19OmARSS49ZGtwoHbFfoM#v=onepage&q=tratamientos%20de%20aguas%20residuales&f=false

ResearchGate. (2007). *Detalles principales de una CCM de cámara doble*.

https://www.researchgate.net/figure/Detalles-principales-de-una-CCM-de-camara-doble-Modificada-a-partir-de-Du-et-al-2007_fig1_262439170

Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013, junio 28). *Celdas de combustible microbianas (CCMS): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica*. Scielo.

https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000600004

Rodríguez, H. (2017, marzo 13). *Las aguas residuales y sus efectos contaminantes*. iagua.

<https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>

Saldivia, J. E. (2020, junio 5). *Tratamiento de aguas servidas: el mayor logro medioambiental de Chile*. El Mostrador.

<https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2020/06/05/tratamiento-de-aguas-servidas-el-mayor-logro-medioambiental-de-chile>

Schaefer, I. (2015, septiembre 17). *La electricidad se va por el desagüe*. El País.

https://elpais.com/internacional/2015/09/17/actualidad/1442519154_281899.html

SINC. (2015, febrero 26). *Obtienen energía a partir de aguas residuales*.

<https://www.agenciasinc.es/Noticias/Obtienen-energia-renovable-a-partir-de-aguas-residuales>

Super Intendencia de Servicios Sanitarios. (n.d.). *Coberturas*.

https://www.siss.gob.cl/586/articles-17553_recurso_4.pdf

Szeworski, A. (1984). *La crisis energética y el mercado capitalista mundial*. El trimestre Económico. Jstor

<http://www.jstor.org/stable/23396511>

Tratamiento de aguas residuales. (n.d.). *Etapas del proceso de tratamiento*.

<https://tratamientodeaguasresiduales.net/etapas-del-tratamiento-de-aguas-residuales/>

Universidad de Antioquia. (2020). *Celda de combustible microbiana*.

https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/extension/portafoliotecnologico/articulos/Celdas_de_combustible_microbiano#:~:text=Celda%20de%20Combustible%20Microbiana%2C%20es,materia%20org%C3%A1nica%20en%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica.

Visual Led. (2020, Julio 15). *Breve historia de la electricidad*.

<https://visualled.com/pantallas-led-info/breve-historia-de-la-electricidad/>

We Are Water Foundation. (2017, Marzo 22). *Aguas negras, el resto de nuestra historia*.

We Are Water Foundation.

https://www.wearewater.org/es/aguas-negras-el-rastro-de-nuestra-historia_281141