

Índice

1. Objetivos y alcances	3
2. Justificación del problema	4
3. Tratamiento de aguas a través de tecnología solar y lumínica	7
3.1. Procesos de oxidación avanzados (Energía Solar directa y/o eléctrica renovable)	8
3.1.1. Fotocatálisis heterogénea	9
3.1.2. Procesos foto Fenton	11
3.1.3. Procesos acoplados	14
3.1.4. Electro-foto Fenton	19
3.2. Calentamiento del fluido	24
3.2.1. Sistemas solares de baja temperatura	24
3.3.2. Sistemas solares de alta temperatura	29
3.3.2.1. Nanofiltración y osmosis inversa	30
3.3.3.2. Destilación solar	33
3.3.3.3. Sistema acoplado de electrodiálisis y oxidación Avanzada	34
4. Energía Solar como alternativa energética de los sistemas de tratamiento de aguas	37
4.1. Sistemas fotovoltaicos	37
4.1.1. Sistemas acoplados de desalinización y fotovoltaica	40
4.1.2. Electrodiálisis apoyada por sistemas fotovoltaicos	41

4.1.3. Electrocoagulación apoyada por sistemas fotovoltaicos	43
4.2. Captadores solares planos	45
5. Actual solución al problema	48
6. Análisis de las alternativas	57
6.1. Escenario 1.	69
6.2. Escenario 2.	70
6.3. Escenario 3.	90
6.4. Escenario 4.	103
6.5. Escenario 5.	116
7. Emisiones de CO ₂ por energía demandada en el tratamiento de las aguas residuales	135
8. Evaluación económica	138
9. Análisis de sensibilidad	144
9.1. Análisis de sensibilidad a la variación del precio de la electricidad	144
9.2. Análisis de sensibilidad a la variación del precio del combustible	145
9.3. Análisis de sensibilidad a la variación la variación del tamaño de planta	147
10.- Conclusiones	150
9. Bibliografía	152

1. Objetivos y alcances

Las aguas residuales de la industria del cultivo del abalón puede generar problemas ambientales si no son tratadas adecuadamente, lo cual no siempre es conseguido con los sistemas de tratamiento tradicional, existiendo la posibilidad de utilizar una tecnología más eficiente que consiga obtener residuos líquidos inocuos para el medioambiente, empleando procesos que pueden utilizar energía solar como fuente de radiación ultravioleta y de energía. Por esta razón surge la motivación en desarrollar un estudio que evalúe las posibilidades de introducir la energía solar en los sistemas de tratamiento de este tipo de aguas residuales.

Este trabajo de investigación tuvo unos objetivos que son presentados a continuación:

- Analizar las posibilidades de introducción de instalaciones de energía solar en una planta de tratamiento de aguas residuales de un cultivo de abalón.
- Proponer alternativas de uso de energía solar en el tratamiento de aguas residuales del cultivo del abalón en el marco normativo y climático de Chile.
- Análisis de 5 sistemas de tratamiento de agua residual (escenarios) con diferentes alternativas energéticas.

2. Justificación del problema

El cultivo de abalón japonés, **Haliotis discus hannai**, se cultiva en estanque en tierra, cultivo que empieza con el acondicionamiento de los animales reproductores, la fecundación asistida, cultivo larval, fijación de larvas, metamorfosis de larvas, cultivos de postlarvas, cultivo de juveniles y de adultos.

El agua de mar que se utiliza en todo el proceso productivo se extrae del mar, y transportada a través de tuberías hasta estanque acumuladores para satisfacer las necesidades de la planta. El agua es impulsada por bombas centrífugas ubicadas normalmente cerca de la toma de agua. El agua antes de ingresar a los estanques debe ser limpiada, el grado de limpieza dependerá del organismo a la que valla destinada.

El agua de mar fluye con una renovación por hora en forma continua. Esta agua, al pasar por los estanques recibe principalmente aportes de materia orgánica y compuestos nitrogenados (amonio, nitrito y nitrato), que al estar presentes en altas concentraciones son nocivos para el medio ambiente, pudiendo contaminar la zona. Además, también existe la posibilidad que parte de esta agua sea succionada por las bombas para reingresarlas a proceso, ya que normalmente los centros de cultivo de abalones se ubican en lugares donde el agua tiene poca mezcla. Considerar también las cada vez más restrictivas normas ambientales que controlan estos procesos.

Existe preocupación acerca de los posibles efectos de las aguas residuales provenientes de los centros de cultivo que pueda causar tanto en el ecosistema como en la propia producción de los centros (Seginer et al, 2008).

Por otro lado, Chile, como casi todos los países en el mundo, ha ido aumentando las exigencias medioambientales hacia el vertido de aguas residuales, exigiendo cada vez mayor control en la calidad de estas aguas, imponiendo niveles de calidad mayores. Específicamente, se ha normado rigurosamente la calidad de las aguas residuales de la acuicultura, a través de un Reglamento Ambiental, en cual establece niveles mínimos a cumplir de forma obligatoria, además exige unos tratamientos de aguas especiales para

las instalaciones donde se cultives especies exóticas, como es el caso del abalón en Chile, especie no nativa.

Compuestos nitrogenados como el amonio son considerados los mayores contaminantes en este tipo de aguas residuales. Las operaciones en acuicultura producen principalmente tres residuos generales: materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo y sólidos suspendidos (Bergheim and Brinker, 2003).

La generación de bacterias y patógenos procedentes de operaciones de producción animal intensiva deben considerarse productos que deben ser controlados. La mayoría de los contaminantes generados, están presentes en sólidos filtrables o sedimentables, como alimento no consumido, materia fecal y otras partículas. Por lo tanto, una eliminación de los sólidos es crítica en los tratamientos de efluentes de la industria acuícola. La sedimentación convencional y los procesos de filtración mecánica son utilizados usualmente para eliminar sólidos, llegando a niveles de reducción del 50% a través de sedimentación y microfiltración (Davidson y Summerfelt, 2005).

En la mayoría de los centros de cultivo utilizan biofiltros para eliminar el nitrógeno total producido en forma de amonio, pero a menudo presentan problemas operativos y son ineficientes, además son sensibles a la naturaleza del agua, por lo tanto, al existir una toxina potente, los elementos biológicos presentes en el biofiltros podrían no sobrevivir. Los procesos de nitrificación desarrollados en los biofiltros ocurren cuando dos grupos distintos de bacterias autótrofas catabilizan el amonio no ionizado a nitrito y mineraliza el nitrito a nitrato (Chen et al., 2006).

Así mismo, se envían al mar o a ríos grandes cantidades de aguas residuales con altas cargas de materia orgánicas (en términos de carbono orgánico total, demanda bioquímica de oxígeno y demanda biológica de oxígeno) que algunos de los sistemas de tratamiento comúnmente utilizados no son capaces de degradar eficientemente, especialmente cuando en los centros de cultivo intensivo se utilizan antibióticos, sustancias de difícil tratamiento (Li et al, 2010).

Además, cuando estas aguas residuales son muy tóxicas causan que el sistema de tratamiento se estropee debido a la muerte de los microorganismos que participan y por la desestabilización química causada por estos compuestos (Giraldo et al, 2010), lo cual ha causado problemas de contaminación de costas, ríos y lagos además de interrupciones (temporales y a veces definitivas) de las operaciones del centro, causando, además de graves daños ambientales si el centro es grande, daños económicos a las empresas afectadas, como el centro de cultivo en cuestión y las empresas que se vean afectadas por las aguas contaminadas.

Existen compuestos químicos que causan graves problemas al medioambiente y a los organismos que están en el entorno donde se encuentran estos compuestos, por ejemplo los disruptores endocrinos como el bisfenol A, el que puede estar presente en algunos efluentes de acuicultura. Los tratamientos biológicos tradicionales de eliminación de contaminantes no son efectivos a la hora de degradar estos compuestos, ni tampoco la aplicación de radiación UVa por sí sola, pero si los son los tratamientos llevados a cabo con procesos de fotólisis empleando luz UVc o procesos de oxidación avanzados, pudiendo obtener mejores resultados en los tratamientos de aguas contaminadas con estos tóxicos y aumentando la sobrevivencia larval del cultivo (Chen et al, 2006).

En un cultivo intensivo, es decir, un cultivo donde se tienen una alta densidad de organismos por volumen de agua, la concentración de sustancias de desecho producidas es alta, por lo cual las aguas residuales provenientes de estos centros presentan una alta carga de contaminantes a tratar.

Así mismo, es habitual que en estos centros de producción, los organismos cultivados sean más propensos a sufrir infecciones y enfermedades, por lo que es común el uso de antibióticos y germicidas en los estanques de cultivo, sustancias que por sí mismas, o en interacción con las otras presentes en las aguas residuales hagan más costosa la tarea de depurarlas.

En muchos centros de cultivo se instalan procesos de tratamiento que constan de un sistema de filtración, tratamiento biológico y finalmente filtros ultravioleta

UVa. Otras operaciones habituales en los procesos principales de desinfección de las aguas de acuicultura son la cloración y la ozonización. Con ello se consigue la eliminación parcial o total de la materia orgánica recalcitrante, pero normalmente la cloración, para que surta efecto como agente desinfectante es aplicada en exceso, implicando que el agua residual contenga importantes cantidades de cloro. Las sustancias químicas organocloradas que acompañan a este proceso de desinfección pueden causar problemas de salud pública, poner en peligro la vida acuática y quedarse en el medio ambiente durante períodos prolongados.

Por otro lado, la aplicación de ozono como proceso de tratamiento de aguas en un proceso caro, especialmente en niveles de caudal medios o altos, además de presentar el problema que el exceso de ozono puede ser peligroso para el medioambiente y para las personas que estén involucradas en el cultivo. Por lo cual, algunos de los actuales métodos de tratamiento convencional no siempre demuestran ser adecuados para la eliminación de estas aguas industriales (Herney et al, 2010) existiendo la posibilidad de mejorar estos procesos, siendo interesante la posibilidad de evaluar la incorporación del uso de energías renovables en las mejoras tecnológicas posibles de desarrollar.

A continuación se describe el estado del arte de los sistemas de tratamiento de aguas que emplean tecnologías solares y fotoquímicas.

3. Tratamiento de aguas a través de tecnología solar y lumínica.

En el actual contexto de dificultoso suministro de energía y de los problemas de contaminación de aguas es muy importante considerar la posibilidad de utilizar fuentes energéticas renovables para descontaminar las aguas. Así mismo, debido a la alta relación entre agua y energía, la escasez de agua puede contribuir a aumentar los problemas energéticos y agravar sus consecuencias. Además, consideraciones ambientales, como el calentamiento global, aumentará la presión al problema de forma significativa. Las consecuencias de ese análisis son muy serias y el problema difícilmente puede ser resuelto sin considerar las implicaciones energéticas. Por lo tanto, es muy importante considerar la posibilidad de utilizar soluciones de sistemas de tratamiento de

aguas residuales a través de una fuerte participación de energías renovables en general, y energía solar en particular (Swenson, 2005).

La energía solar presenta un alto potencial, además considerando la coincidencia que a nivel mundial las zonas que tienen un los mayores niveles de radiación solar son también los que tienen mayor escasez de agua y por tanto requieren mayor tratamiento de aguas residuales. (Blanco et al, 2009).

Se deben desarrollar tecnologías adecuadas que permitan el uso de energía solar que simultáneamente permita resolver problemas de energía y de aguas. Los principales aspectos que se pueden evaluar con energía solar son la desalación solar, la detoxificación y la desinfección.

Existen variadas posibilidades en cuanto al uso de instalaciones de energía solar en una planta de tratamiento de aguas residuales.

3.1. Procesos de oxidación avanzados

Los procesos de oxidación avanzados (POAs), considerados tratamientos terciarios, son una importante forma de eliminar los compuestos orgánicos recalcitrantes presentes en aguas residuales, logrando degradar la carga orgánica presente en estas aguas que no logra ser eliminada por tratamientos biológicos convencionales, debido a su alta estabilidad química o a su baja biodegradabilidad.

Estos procesos tienen como particularidad la producción de radicales hidroxilos, HO•. Este radical es un poderoso, altamente reactivo y no selectivo oxidante con un potencial de oxidación de 2.80 V. Es capaz de oxidar una gran variedad compuestos orgánicos, incluyendo moléculas de células de las paredes celulares e intracelulares de microorganismos, a CO₂, iones inorgánicos y agua.

Existen contaminantes que están presentes en aguas superficiales y subterráneas que pueden generar grandes deterioros en los ecosistemas. Dentro de estos se encuentran los pesticidas. Los sistema biológicos

tradicionalmente empleados en los tratamientos de aguas no son capaces de eliminar estos agentes químicos del medioambiente, esto se debe a que no son biodegradables y son recalcitrantes. Sin embargo, estos procesos si son capaces de eliminar estos compuestos del ambiente. Estos procesos son considerados económicamente costosos y una de las principales razones de su alto costo es el uso de energía eléctrica para generar UV, necesaria para la mayoría de estos procesos. Este costo puede ser reducido casi al mínimo si se utiliza luz solar como fuente de fotones UV. Los resultados obtenidos al utilizar procesos de oxidación avanzada a través de luz solar muestran la efectividad en la degradación de los compuestos orgánicos recalcitrantes.

Los POAs más efectivos en la degradación de compuestos orgánicos y toxinas existentes en aguas residuales son la fotocatalisis heterogénea y foto Fenton (fotocatalisis homogénea).

3.1.1. Fotocatalisis heterogénea

La fotocatalisis heterogénea se desarrollan por la iluminación de un semiconductor (normalmente TiO_2) en suspensión acuosa con irradiación luminosa con una energía mayor que la energía del ancho de banda (band gap) del semiconductor (3,2 eV para el caso de TiO_2) generando huecos en la banda de valencia y electrones en la banda de conducción, esta energía es conseguida con iluminación UV por debajo de 385 nm. Con ello se consigue que se generen radicales hidroxilo, lo que, como se señalo anteriormente, tienen la capacidad de oxidar una gran cantidad de compuestos orgánicos.

Para conseguir obtener una reacción de fotocatalisis heterogénea es necesario un fotorreactor, en el cual se introduce la solución a degradar (agua contaminada), una fuente de luz ultravioleta (natural o artificial) y un semiconductor (TiO_2).

Con esta técnica se es capaz de depurar cualquier agua contaminada con compuestos orgánicos y uno de los requisitos más importantes del procesos es que el agua este libre de partículas en suspensión, para evitar la presencia de sobras y obstáculos para el paso de los fotones, por lo cual es necesario la presencia de un tratamiento primario de decantación y filtración.

En un trabajo desarrollado por Oyama et al (2009) se evaluó la degradación y mineralización de compuestos orgánicos no biodegradables y tóxicos a través del uso de fotocatalisis heterogénea y ozono en una planta piloto irradiada con luz solar, los resultados obtenidos bajo esas condiciones los comparó con los obtenidos en laboratorio empleando lámparas de muy alta presión de mercurio como fuente de luz y un sistema fotovoltaico como fuente de energía eléctrica.

Los resultados obtenidos por los investigadores muestran que existe una significativa mineralización por la aplicación conjunta de $\text{TiO}_2/\text{O}_3/\text{UV}$ comparada con la aplicación de O_3/UV . Los radicales hidroxilo generados tienden a ser más eficientes en presencia de Ozono. En la siguiente figura se presenta un esquema del sistema con fotorreactor solar.

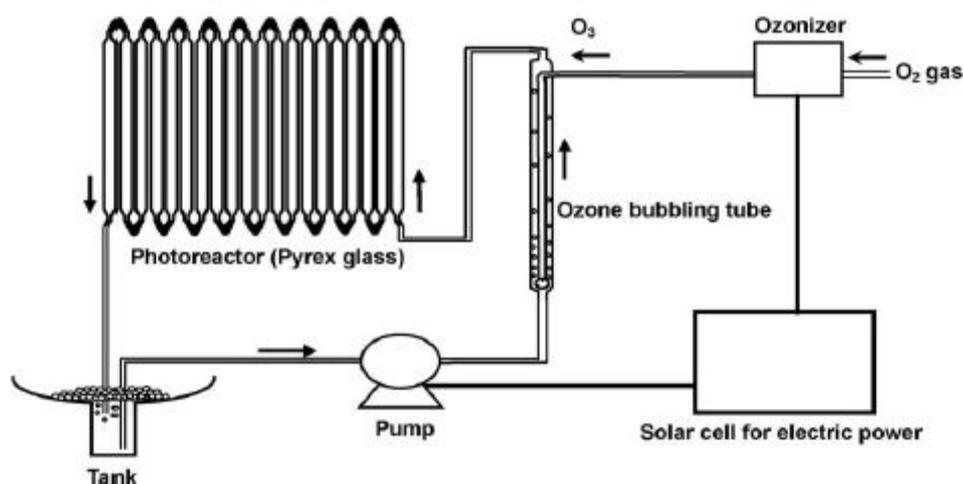


Fig. 3.1. Esquema del sistema de tratamiento solar.

Los experimentos en laboratorio obtenidos por los investigadores demuestran que la irradiación de TiO_2 combinada con ozonación ($\text{TiO}_2/\text{O}_3/\text{UV}$) con la lámpara de mercurio de muy alta presión presenta una ruta de degradación y mineralización casi completa, consiguiendo una total limpieza del agua. Esta metodología combinada consigue aumentar la mineralización que se consigue si se utiliza la ozonización en la oscuridad, ozonización con UV y TiO_2/UV . Los experimentos bajo irradiación solar consiguen también una depuración y mineralización casi completa pero toma más tiempo para ello.

Los experimentos desarrollados por los investigadores utilizando el fotorreactor solar se desarrollaron para un volumen de 14 litros requiriéndose 15 kJ/L de

energía solar para conseguir una degradación casi total y de 230 kJ/L para hace funcionar los sistemas auxiliares del fotorreactor, energía que fue aportada por un sistema fotovoltaico. Los experimentos utilizando luz UV artificial necesitaron el uso de un aireador y de un agitador, el cual en un fotorreactor de 127 mL requirieron de 6000 kJ/L.

Por lo anteriormente expuesto se observa claramente que la posibilidad de incorporar energía solar a este tipo de sistema es cierta, demostrado por los resultados en la depuración de los compuestos presentes en el agua. Este tipo de tecnología está desarrollada a nivel de planta piloto no siendo aún comercial.

3.1.2. Procesos foto Fenton

Además de la fotocatalisis heterogénea existe otro interesante proceso de oxidación avanzada, se trata de los procesos Fenton y foto Fenton. Este proceso implica la generación de radicales hidroxilo, al igual que la fotocatalisis heterogénea, pero en este caso, esto se consigue por la transformación de Fe^{+2} en Fe^{+3} en presencia de H_2O_2 , reacción Fenton, proceso que es catalizado si existe irradiación lumínica, reacción foto Fenton.

Para conseguir obtener la reacción foto Fenton es necesario, tal como en el caso de la fotocatalisis heterogénea, un fotorreactor, en el cual se introduce la solución a degradar (agua contaminada), una fuente de luz ultravioleta (natural o artificial), pero además requiere agentes químicos como hierro y peróxido de hidrógeno.

Con este proceso es posible tratar cualquier agua contaminada con compuestos orgánicos requiriéndose también la presencia de un tratamiento primario de decantación y filtración para facilitar el paso de los fotones UV y como se señaló anteriormente, los procesos Fenton y foto Fenton son útiles para la depuración de aguas residuales con presencia de pesticidas, logrando descontaminar el agua así como aumentar su biodegradabilidad.

Es así que en un trabajo publicado por Shawaqfeh y Al Momani (2010) se muestra la degradación de pesticidas utilizando diversas técnicas de oxidación como fotólisis con UV, UV/H₂O₂, UV/Fe(III) y foto Fenton. La fotólisis fue desarrollada empleando UV artificial (Figura 3.2) y solar (Figura 3.3).

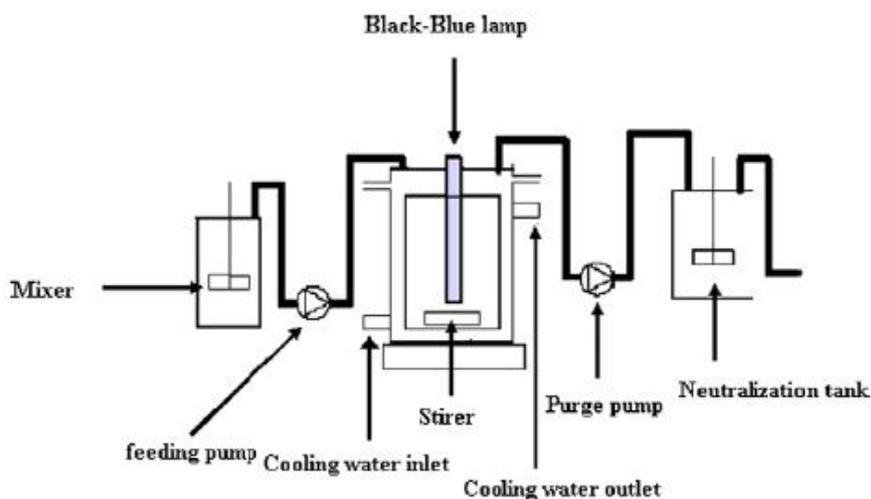


Fig. 3.2. Sistema fotocatalítico utilizando UV artificial.

En esa etapa de la investigación se emplearon dos tipos de lámparas UV, una de 254 nm (UVc) y otra de 350 nm (UVa).

Los experimentos realizados empleando UV solar se llevaron a cabo en un sistema de fotorreactores CPC, el cual es presentado en la Fig.3.4., el seguimiento del sol se realizó manualmente.

Los investigadores observaron un bajo nivel de degradación al emplear solamente UV. Sin embargo al aplicar procesos foto Fenton la degradación es mucho más eficiente. Se obtuvo más eliminación del pesticida, Vydine, con UVc y con el fotorreactor solar en verano que con UVa y con el fotorreactor solar en invierno. El proceso foto Fenton fue el que logró mas degradación del compuesto además observaron que al aumentar la radiación solar se acelera la tasa de degradación del pesticida.

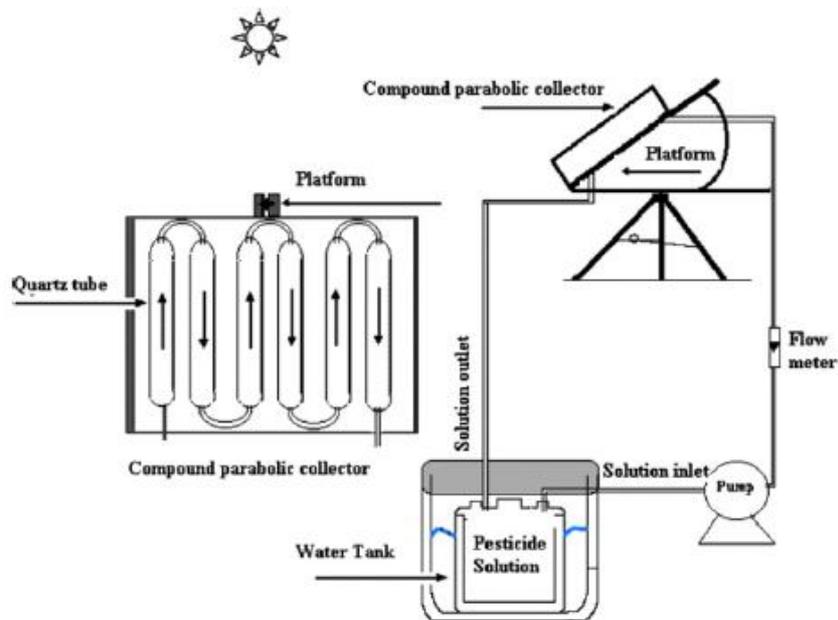


Fig. 3.3. Sistema fotocatalítico utilizando UV solar.

Para lograr la depuración requerida al emplear lámparas de 254 nm aproximadamente se emplearían 300 kJ/l para un volumen de solución de 1.5 l, en cambio al emplear radiación solar se requieren 100 kJ/l, también para un volumen de 1.5 l los cuales provienen de los fotones del sol y 340 kJ/l para hacer funcionar los sistemas auxiliares al fotorreactor solar. Este proceso está en fase de investigación a pequeña escala.

En un trabajo de Zapata et al., (2010) se estudio la degradación de una mezcla de pesticidas en aguas residuales de la industria agrícola a través de foto Fenton solar utilizando un grupo de 6 fotorreactores CPC puestos en serie, con el objetivo de descontaminar parcialmente el agua y aumentar su biodegradabilidad con el objeto de continuar el tratamiento por procesos biológicos tradicionales. En la Fig. 3.4 se presente un fotorreactor solar CPC. Los investigadores obtuvieron una gran depuración del agua, eliminando la toxicidad de este y aumentando su biodegradabilidad. El consumo de energía para hacer funcional los equipos del fotorreactor fue de aproximadamente 190 kJ/L considerando un volumen de agua de 75 L y de aproximadamente 120 kJ/l

de energía solar para la degradación fotónica. La tecnología está en etapa de experimentación en planta piloto.



Fig. 3.4. Fotorreactor solar CPC

3.1.3. Procesos acoplados

En áreas lejanas de una red eléctrica una fuente de energía renovable provee una atractiva opción para satisfacer necesidades eléctricas. Como fuente de energía confiable el bombeo de agua a través de sistemas fotovoltaicos ha contribuido a suministrar agua a comunidades rural ayudando a solucionar problemas ambientales. Para tratamiento de agua de pequeña escala los sistemas fotovoltaicos pueden ser una interesante solución bajo este contexto de lejanía de una red eléctrica convencional.

Ya que los paneles de silicio convierten la luz visible proveniente de la radiación solar en electricidad y ya que la degradación fotocatalítica necesita irradiación UV, una utilización simultánea de ambos procesos, es decir, un sistema fotocatalítico-fotovoltaico híbrido, puede ser ventajosa. El sistema fotocatalítico utiliza irradiación UV para promover la degradación de contaminantes orgánicos y absorbe la irradiación infrarroja, con lo cual lograría proteger los sistemas fotovoltaicos alargando su vida útil. El sistema fotovoltaico convierte la luz solar en electricidad, la que puede ser utilizada in

situ o bien ser acumulada en baterías. Esta aplicación representa una solución autónoma y ambientalmente sustentable para el tratamiento de contaminantes recalcitrantes. La siguiente figura muestra un esquema del sistema.

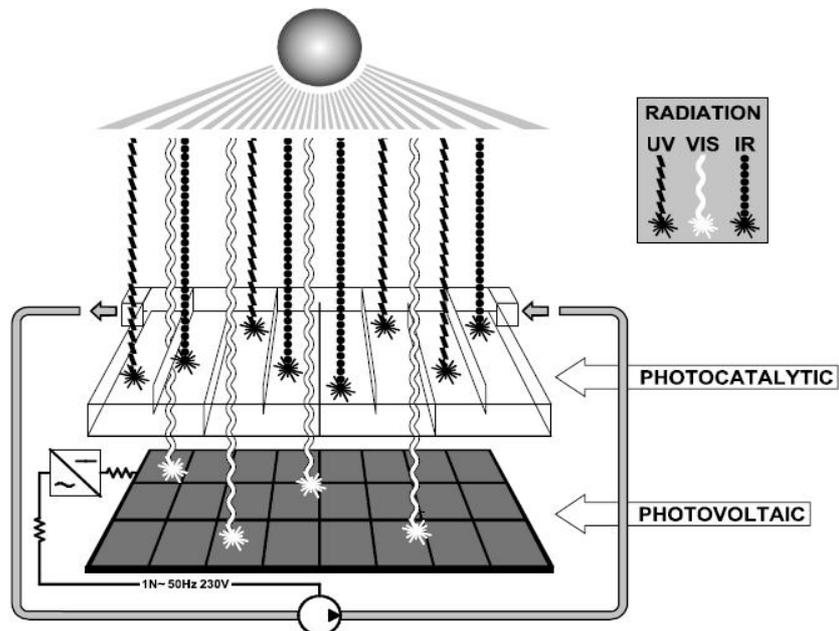


Fig. 3.5. Esquema del sistema híbrido fotocatalítico-fotovoltaico.

La radiación solar, compuesta por radiación ultravioleta, infrarroja y visible llegan al reactor fotoquímico, el cual utiliza la irradiación UV para degradar los contaminantes. El agua atrapa la irradiación IR, por lo que solo llega irradiación visible al módulo fotovoltaico (Sarría et al., 2005).

En un trabajo de Sarría et al., (2005) se evaluó la degradación fotocatalítica del 5-amino-6-methyl-2-benzimidazole (AMBI) y se comparó la eficiencia de ese proceso de degradación con el conseguido por un captador parabólico compuesto. Los resultados obtenidos mostraron que la potencia eléctrica producida fue solo un poco menor al introducirse el sistema fotocatalítico y el reactor CPC presenta un mayor rendimiento en cuanto a la degradación del contaminante y el sistema híbrido es autónomo en cuanto a su autoconsumo. Es sistema consumió 125 kJ/L de energía en la degradación de 25 L de agua con AMBI.

La energía solar concentrada es utilizada en procesos de detoxificación debido a que los fotones con alta energía son proyectados directamente en el fluido a descontaminar. Con ese objetivo, se desarrolla una técnica que utiliza un tubo transparente instalado en la línea focal de un reflector metálico constituyendo un fotorreactor (Garcia et al, 2010).

Debido a que los sistemas fotocatalíticos heterogéneos solo utilizan radiación UV, que solo es una pequeña fracción del espectro solar, la mayor parte de la energía lumínica proveniente del sol es desechada como calor. Se han realizado algunas aproximaciones que han aumentado la utilización del espectro solar de estos sistemas con el consiguiente aumento en la eficiencia del proceso fotocatalítico y reducción de costes. Con ese objetivo se han desarrollado investigaciones que buscan extender la absorción del dióxido de titanio en la parte visible del espectro solar. Esa aproximación incluye el dopaje del TiO_2 con metales nobles, lantánidos y metales alcalinos (Lui et al 2009 y Han et al, 2009). Incluso una pequeña extensión dentro del espectro visible puede aumentar sustancialmente la eficiencia fotocatalítica.

En un trabajo de Vivar et al (2010) se evaluó un captador solar plano, que es presentado en la siguiente figura, en el que se aprecia que el módulo principal es transparente al UV y atrapa la luz solar. Una segunda cubierta es transparente a la luz solar y entre las superficies internas del módulo fotocatalítico es una cubierta transparente.

Las celdas solares fotovoltaicas están encapsuladas en la parte trasera de la segunda cubierta utiliza encapsulantes rectangulares como silicona, EVA o algún enfriador líquido seleccionado para adaptarse a los índices de reflectividad entre la cubierta transparente y las celdas solares. El agua es bombeada a través del espacio entre las dos cubiertas transparentes.

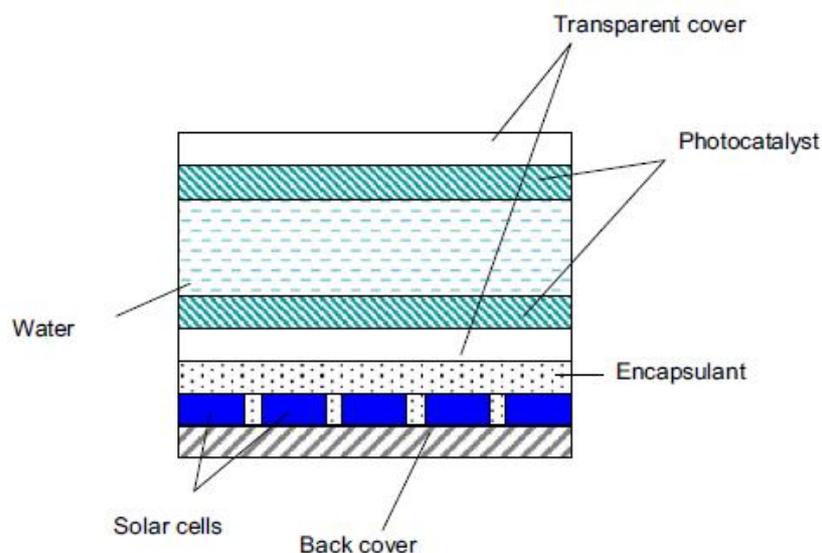


Fig. 3.6. Sistema integrado híbrido fotocatalítico-fotovoltaico plano.

La Figura 3.7 muestra que una alta porción de la componente UV de la radiación solar incidente es recibida por el sistema híbrido, esta es absorbida por el fotocatalizador en la parte frontal del submódulo.

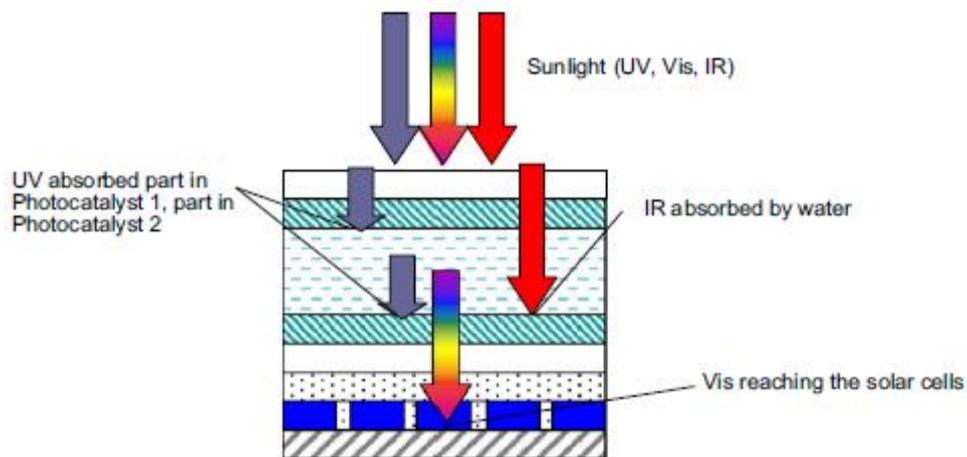


Fig. 3.7. Espectro de absorbancia en el sistema integrado.

La componente infrarroja lejana es parcialmente absorbida por el agua bombeada entre las superficies del fotorreactor catalítico. Los índices de reflectividad del agua de la cubierta y de los materiales encapsulante son muy similares por lo que la luz infrarroja cercana y la visible se propagan prácticamente sin sufrir alteraciones a través del receptor hasta que es absorbido y convertido en electricidad por las celdas solares fotovoltaicas.

La energía eléctrica solar es utilizada para bombear y también para aumentar la eficiencia de la fotodegradación de la contaminación presente en el agua utilizando electrodos.

El diseño tubular introduce una ventaja para los sistemas fotocatalítico en términos del mejorar el flujo de agua, reduciendo los costes del sistema, manteniendo la presión y reduciendo el área requerida. La clave de este tipo de diseño es que puede integrarse en un amplio espectro de los sistemas fotocatalíticos existente como los sistemas sin concentración solar, sistemas con baja concentración, como los CPCs y sistema de concentración media.

De acuerdo a distintos criterios y especificaciones, las posiciones de las celdas, su orientación y encapsulación puede variar generando diversas posibilidades, una de las cuales es presentada en la siguiente figura.

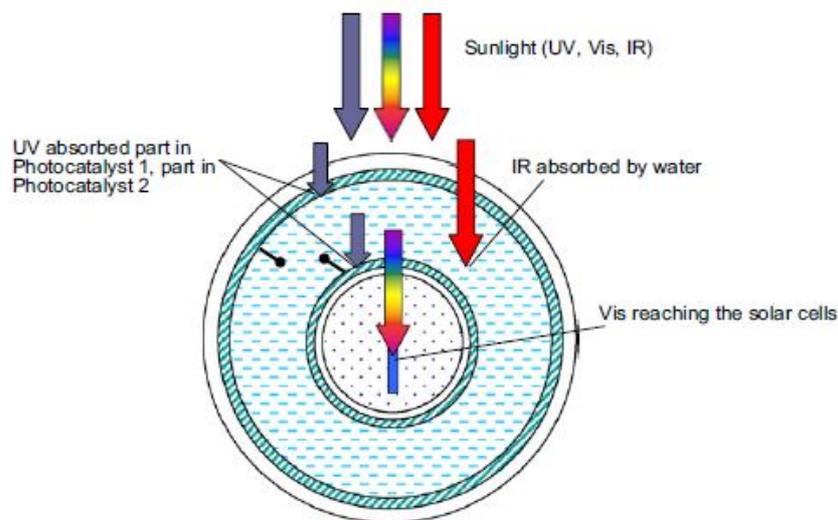


Fig. 3.8. Sistema integrado tubular con presencia de electrodos.

En general este sistema integra las funciones de purificar agua y generar electricidad renovable en un dispositivo autónomo y compacto. En principio, no se requiere fuentes de alimentación externas para asistir al tratamiento fotocatalítico. Por otro lado, cualquier exceso de energía es un bono, que puede ser almacenado en baterías o conectada a la red, tal como se muestra en la Figura 3.9.

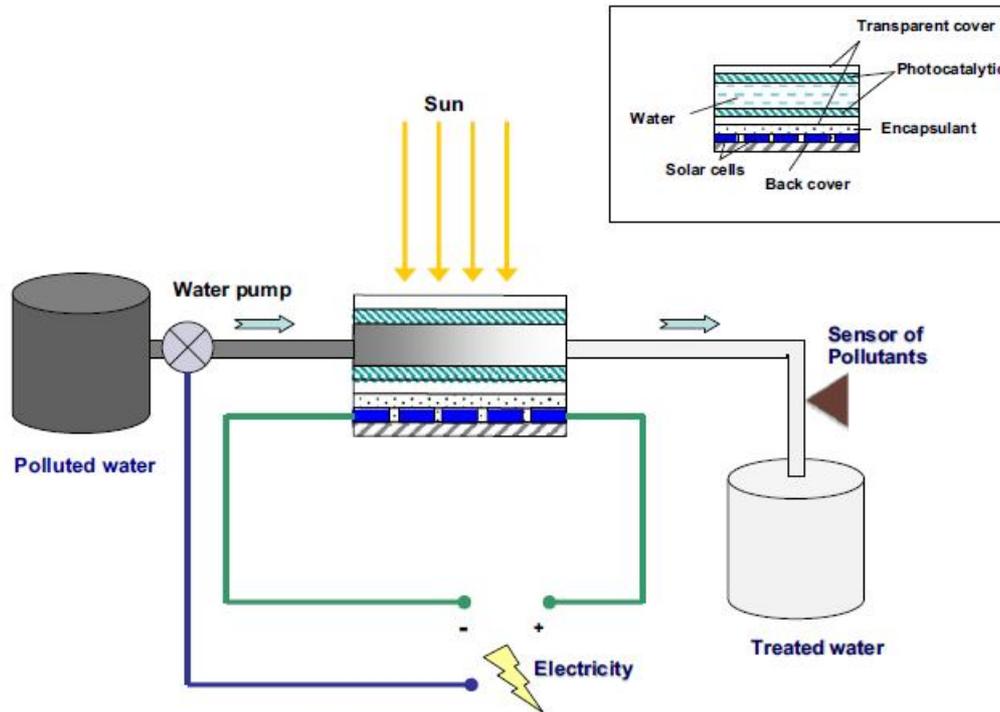


Fig. 3.9. Sistema prototipo experimental bajo luz solar.

El sistema minimiza las pérdidas ópticas por la adaptación selectiva de los índices de refracción a través de los materiales (Vivar et al, 2010).

Para este sistema se requiere aproximadamente de 150 kJ/l de energía (proveniente de los fotones solares) para alcanzar una degradación requerida y de 0.5 kJ/l para hacer funcionar la bomba que mueve el agua por los fotorreactores solares, energía que es provista por los sistemas fotovoltaicos, para un volumen aproximado de 25 l.

3.1.4. Electro-foto Fenton

La gran desventaja de estas reacciones foto Fenton es el alto costo de los reactivos, especialmente H_2O_2 . Una interesante forma de obtener esta reacción sin tener que incurrir en los altos costos del peróxido de hidrógeno es generarlo in situ a través de una electroproducción catódica llamada electro foto Fenton, Ecuación 1.



La electroproducción de agentes de la reacción Fenton involucra dos procesos electrolíticos, resultando producción de peróxido de hidrógeno en el cátodo y evolución de oxígeno en el ánodo. Una alternativa a esta vía es cambiar la reacción el ánodo consiguiendo menos demanda de energía, se trata de la oxidación del hierro.



Bajo ese concepto Boye et al (2006) llevaron a cabo la oxidación de ácido gálico a través de Fenton donde los reactivos fueron producidos electroquímicamente, donde el Fe^{+2} fue producido en un ánodo de hierro y el peróxido de hidrógeno lo fue a través de un cátodo de carbón.

Para este sistema se requiere aproximadamente de 525 kJ/l de energía (aportada por sistemas fotovoltaicos) para un volumen de 200 ml. Esta tecnología está en fase de investigación.

En un estudio de Figueroa et al (2009) se demostró que FeO^{+2} puede ser indirectamente electroproducido con suministros baratos y abundantes, es decir, oxígeno saturado proveniente de efluentes industriales y energía solar. H_2O_2 es electroproducido desde reducción catódica de O_2 en el reactor. La diferencia de potencia entre el cátodo y el ánodo fue suministrada por paneles fotovoltaicos. En la Figura 3.10 se muestra la configuración del sistema, donde se aprecia que la celda electroquímica se compone de cuatro bloques de acrílico y una lámina de silicona entre ellos para evitar mezclas.

Los dispositivos electroquímicos fueron alimentado eléctricamente por paneles fotovoltaicos (50 Watts, 17 V, 2.9 A, Model BP 350U). La diferencia de potencial aplicada entre el cátodo y el ánodo fue realizada utilizando un regulador de voltaje y un cargador eléctrico.

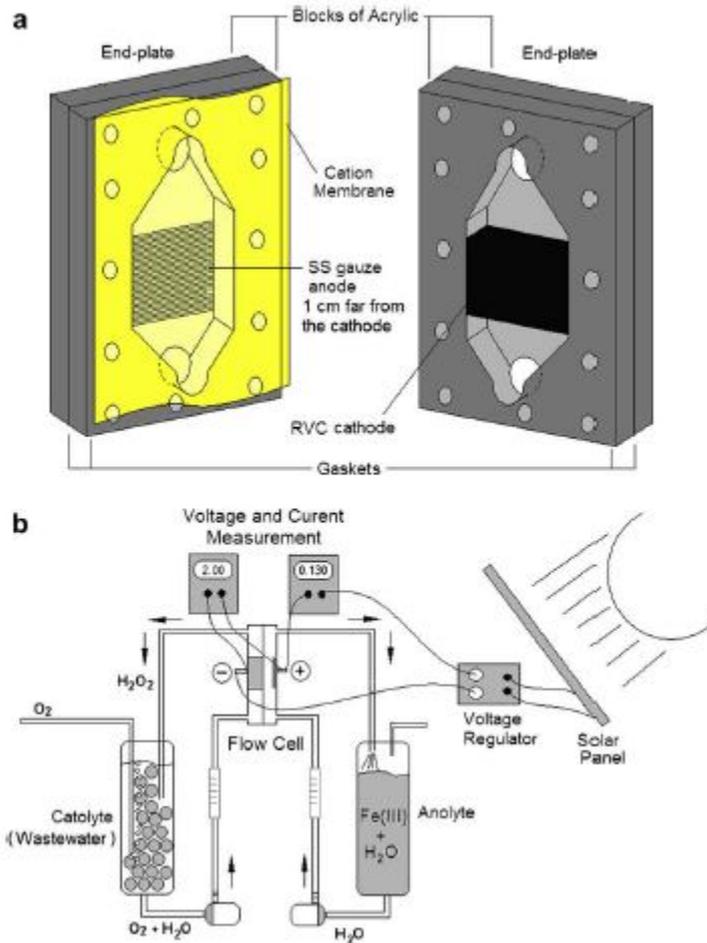


Fig. 3.10. a) Partes principales del dispositivo electroquímico y b) circuito hidráulico del sistema.

Con este dispositivo se consigue depurar los efluentes líquidos de una industria textil eliminando los residuos, la turbidez del agua y componentes tóxicos producidos, requiriendo de 22 kJ/l en un volumen de 1.25 l de solución. Esta tecnología está en fase de investigación.

Serra et al (2009) estudiaron la degradación de α metilfenilglicina (α MPG) por Fenton, foto Fenton y electro-foto Fenton. α MPG es un compuesto químico utilizado comúnmente como precursor en productos farmacéuticos presentando características no biodegradables, es decir, que si fuera sometido a un tratamiento secundario (biológico), el tratamiento no sería capaz de depurarlo.

Entre las estudiadas, la reacción más rápida, en términos de eliminación de carbono orgánico total (COT), fue la lograda por electro-foto Fenton. La presencia de luz solar mejoró la eficiencia del proceso principalmente debido al rol jugado por el fotofenton y por la existencia de fotólisis complejos de Fe^{+3} formado con compuestos intermedios de la reacción.

El consumo de energía del equipo en cuanto al sistema electroquímico fue de aproximadamente 60 kJ/l y de 120 kJ/l de consumo de energía solar como aporte de luz (fotones) al sistema, el cual fue de 250 ml de solución.

Resumen

Se han indicado diferentes alternativas de uso de aprovechamiento de la radiación solar en los procesos de oxidación avanzados, en los que se observa que es posible la inclusión de la energía solar en los sistemas de tratamientos abordados. Los cuales fueron el uso de luz solar directa con uso de fotocatalizadores (procesos fotocatalíticos), procesos electrofotocatalíticos y sistemas acoplados. A continuación se resumirán los beneficios y desventajas de cada uno de ellos.

- a) Sistemas fotocatalíticos: estos procesos de oxidación avanzada presentan altos índices de depuración de aguas residuales pudiendo llegar a una depuración casi total, su consumo de energía es medio (en comparación con los otros procesos evaluados). Se observa que en estos sistemas se puede aprovechar la energía solar tanto como fuente de fotones (en lugar de lámparas UV) y también como fuente de energía (sistemas fotovoltaicos).

La ventaja de estos sistemas es que al usarse energía solar el consumo energético es abastecido con fuente de energía renovable implicando esto una mejoría desde el punto de vista ambiental. Así mismo, permite trabajar con volúmenes más grandes de aguas contaminadas, ya que los sistemas que utilizan como fuentes de fotones lámparas artificiales trabajan con volúmenes de aguas pequeños.

Una desventaja del proceso con uso de energía solar es la temporalidad y alta fluctuación de este recurso, recurso que no se puede predecir su disponibilidad. Esta tecnología está desarrollada a nivel de planta piloto y se espera que a mediano plazo, cuando las exigencias ambientales y el precio de la energía eléctrica sean más altas, esté desarrollada a nivel comercial.

- b) Procesos electrofotocatalíticos: estos procesos presentan altos índices de depuración de aguas residuales pudiendo llegar a una degradación del contaminante más alta que los procesos fotocatalíticos anteriormente resumidos, su consumo de energía es también más elevado. Estos sistemas puede aprovechar la energía solar tanto como fuente de fotones (en lugar de lámparas UV) y también como fuente de energía (sistemas fotovoltaicos), lo cual tiene una gran importancia en estos sistemas ya que el consumo de energía del sistema electroquímico es alto.

La ventaja de estos sistemas, tal como en el caso anterior, al usarse energía solar el consumo energético es abastecido con fuente de energía renovable implicando esto una mejoría desde el punto de vista ambiental, Otra ventaja es que se requiere de menor cantidad de reactivos químicos, ya que uno de ellos, el peróxido de hidrógeno, es producido eléctricamente.

Una desventaja de estos procesos, es que su operación es compleja, debido a que se deben controlar una serie de parámetros como el oxígeno disuelto en el agua y la dosis específica de peróxido de hidrógeno en solución. Esto ha llevado a que esta tecnología está desarrollada solo a nivel de laboratorio.

- c) Sistemas acoplados: estos sistemas aprovechan el hecho que los procesos fotocatalíticos requieren de luz UV y que los sistemas fotovoltaicos utilizan luz visible, con lo cual es posible acoplar estos procesos de forma simultánea, con lo cual se consigue mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos ya que el agua de entrada al proceso enfría al panel.

Estos sistemas presentan niveles de depuración altos y también son energéticamente autosuficientes. Los estudios realizados son en condiciones particulares, con altos niveles de radiación, poca concentración del contaminante y altas temperaturas, por lo cual un control de esta es interesante.

Así mismo, los estudios solo se han realizado en pequeños volúmenes de agua contaminada. Estos procesos presentan como inconveniente que si la columna de agua es alta o si esta es turbia o presenta un contaminante concentrado el rendimiento del sistema fotovoltaico sería bajo, ya que una parte de la luz no lograría atravesar la columna de agua. La técnica solo se ha desarrollado a nivel de laboratorio y bajo condiciones muy particulares.

Los procesos que no consideran el uso de fotocatalizadores y solo utilizan radiación UV directa (solar o artificial) no presentan importantes capacidades de depuración de agua, no logrando alcanzar niveles significativos de descontaminación, no son considerados procesos de oxidación avanzados.

No se ha considerado el uso de energía térmica debido a que los procesos de oxidación avanzados, como se explicó anteriormente, se basan en la producción del radical hidroxilo, el cual es el agente oxidante en cuestión. Este radical funciona adecuadamente hasta la temperatura de 40 °C, al sobrepasarse esta, su potencial oxidante es inhibido.

3.2. Calentamiento del fluido

Ciertos tratamientos de aguas residuales requieren de un sistema de calentamiento para optimizar el proceso, por lo cual, a continuación se presentan algunas alternativas en la que este proceso es llevado a cabo.

3.2.1. Sistemas solares de baja temperatura

Los sistemas solares térmicos de baja temperatura constituyen la utilización de la energía solar para aprovecharla como energía térmica en procesos de calefacción, producción de agua caliente, agua de proceso en la industria o

cualquier otra aplicación que permita elevar la temperatura de un fluido. Para tales efectos se emplean sistemas pasivos, lo cual implica que la energía solar se capta, almacena y se distribuye de forma natural, sin la necesidad de partes móviles ni sistemas de seguimiento solar. Un fluido interesante de calentar es el lodo generado en los sistemas de tratamientos de aguas residuales, ya que estos representan la mayor parte de los residuos sólidos generados en los procesos de tratamiento de aguas residuales, por lo cual es importante desarrollar procesos que reduzca la cantidad de lodos al final del proceso. Uno de los procesos más interesantes para ese propósito es la digestión anaeróbica o metanización. Este mecanismo implica la estabilización de los lodos por conversión de parte de su materia orgánica a biogás. Este proceso puede ser optimizado si se eleva la temperatura del lodo.

En una investigación de Yiannopoulos et al, (2008) se evaluó la utilización de un sistema que comprendía el uso de captadores solares para elevar la temperatura del lodo y cumplir con el objetivo del tratamiento de aguas. Para lo cual emplearon el captador solar, un intercambiador de calor, un estanque de almacenamiento de agua caliente y un reactor anaeróbico. En la Figura 3.11 se presenta un diagrama esquemático del sistema.

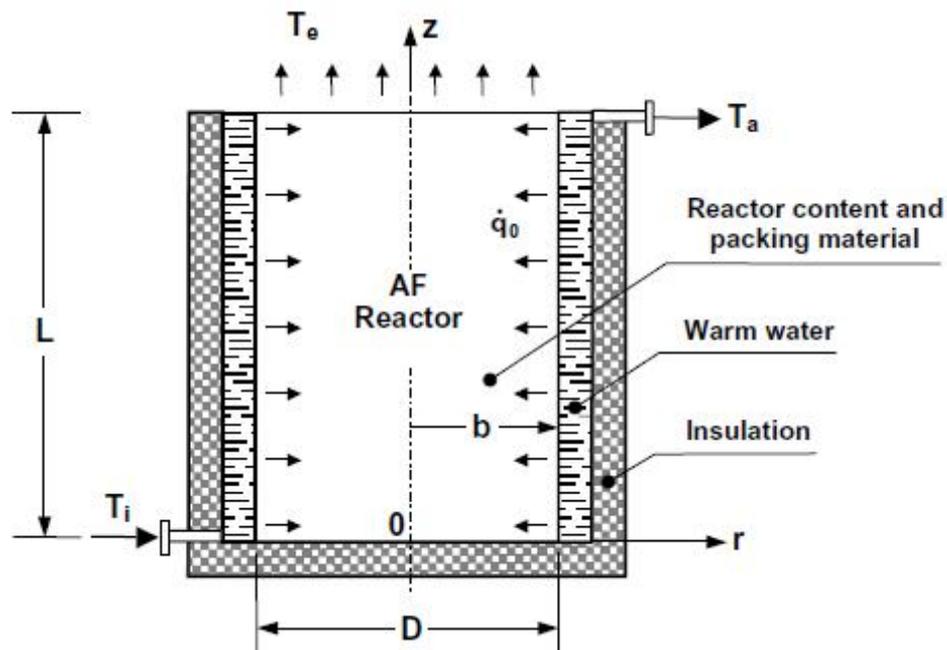


Fig. 3.11. Diagrama esquemático del reactor

El agua caliente proveniente del estanque almacenador recircula por las paredes del reactor. El agua existente en el sistema es calentada por un módulo de paneles solares conectados en paralelo. El captador solar calienta el fluido que circula por él, que está compuesto por una mezcla de agua y etilén glicol. El objetivo de esa mezcla es evitar que el sistema se congele al existir temperaturas bajo cero.

El módulo de captadores fue cubierto con una superficie absorbente orientada hacia el ecuador inclinada con un ángulo óptimo. Debido a la que la energía del sol recibida por el captador solar es variable, los investigadores instalaron un estanque de agua aislado para almacenar el exceso de calor y poder utilizarlo durante periodos con poca o sin radiación solar. El agua caliente almacenada en el estanque es transferida al reactor a través de un sistema de tuberías y la demanda de energía del reactor depende de las pérdidas térmicas de este.

Considerando la tecnología desarrollada por los investigadores se requiere de aproximadamente 22 kJ/L en un volumen aproximado de 20 m³ para lograr que los lodos generados estén a la temperatura de 35° C, óptimo para desarrollar procesos de biodigestión anaeróbica. Esta tecnología está desarrollada a nivel de planta piloto.

Otro de los problemas que presentan los lodos generados en los procesos de tratamiento de aguas residuales es su alto contenido en humedad ya que la forma más común de disponer los residuos son los vertederos, los cuales no admiten residuos con contenidos altos de humedad. Por lo cual los lodos deben ser deshidratados. Los procesos térmicos que implican la deshidratación de estos lodos implican altos costes. Pero una interesante alternativa es el secado solar.

En un trabajo de Salihoglu et al (2007) se presenta una investigación en la que se muestra esta alternativa. Desarrollaron una planta piloto para el sacado de lodos en un túnel invernadero transparente. La planta fue construida con el objetivo de aumentar la presión de vapor del lodo para obtener una efectiva

deshidratación. El aire caliente acumulado en la planta durante el día es dirigido mediante un ventilador a un lecho de rocas para conseguir acumular la energía. En la siguiente figura se muestra un esquema de la planta piloto.

El efecto invernadero obtenido en la planta descrita por los investigadores es conseguido por energía solar. El suelo de concreto impermeable de la planta es calentada con agua que pasa a través de tuberías conectadas a dos paneles solares planos. Los investigadores lograron una reducción del 40% de la humedad de lodo, con lo cual se obtiene una reducción de los costes de transporte, manipulación de de disposición en el vertedero. Además se consiguió la eliminación de una parte importante de los patógenos presentes en el lodo.

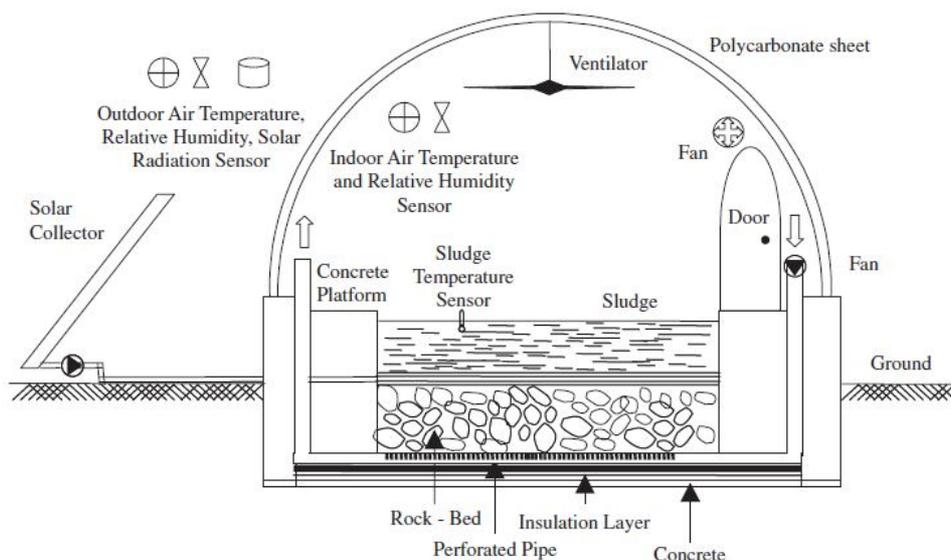


Fig. 3.12. Esquema del desecador de lodos solar.

Este tipo de tecnología no se requiere para el caso particular del centro de cultivo ya que los lodos no se requieren secar.

Slim et al (2008) desarrollaron otra planta piloto, también destinada al secado de lodos con aporte solar, con la diferencia que ellos utilizaron una bomba de calor en su sistema. En su sistema el lodo húmedo es uniformemente disperso sobre un suelo de concreto bajo una techo transparente modo invernadero. El

lodo es intermitentemente mezclado para permitir que el aire, impulsado por un ventilador eléctrico, circule entre el.

La bomba de calor instalada en el sistema cumple el objetivo de asegurar que el secado funcione en los periodos de condiciones climáticas desfavorables. La bomba de calor cumple dos funciones específicas, por un lado calienta el agua del circuito integrado en el suelo del invernadero y por otro lado calienta el aire que entra al sistema. En la siguiente figura se muestra un esquema del funcionamiento del sistema.

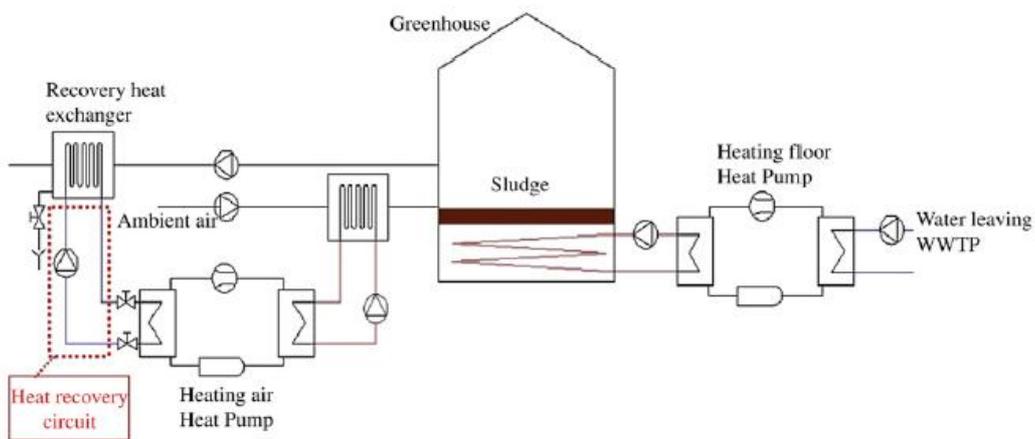


Fig. 3.13. Esquema del sistema de secado de lodos.

Resumen

Los sistemas solares de baja temperatura, al ser sistemas que utilizan la energía solar para aprovecharla como energía térmica elevando la temperatura de un fluido, pueden ser utilizados para tratar los lodos generados en los tratamientos de aguas residuales. Estos lodos presentan una importante cantidad de materia orgánica, la cual puede ser convenientemente aprovechada si es sometida a un alza de temperatura, consiguiendo la generación de gas metano. Se observa que el uso de energía solar en sistemas térmicos pasivos logran ese objetivo haciendo circular por las paredes de los depósitos de lodos agua caliente. Estos sistemas térmicos también se han aprovechado para eliminar gran parte de la humedad de los lodos a través de técnicas de deshidratación con uso de energía solar por medio de invernaderos generando procesos de convección a baja temperatura.

Estos sistemas cuentan con la ventaja de ser una forma económicamente poco costosa de tratar los lodos generados en los procesos de tratamiento de aguas residuales, al tratarse de un sistemas que eleva la temperatura del fluido moderadamente el aislamiento térmico es más sencillo que si se tratase de mayores incrementos de temperatura, pudiendo utilizarse sencillos sistemas de almacenamiento térmico.

Una de las principales desventajas de los sistema térmicos de baja temperatura es que al ser utilizados en sistemas de tratamiento de lodos los procesos toman un mayor tiempo, luego si la generación de lodos es alta se requerirá de un sistema de gran volumen, que permita mantener tiempos de retención adecuados así como un área importante de captación solar.

La tecnología está desarrollada a nivel de planta piloto y probablemente este nivel sea mayor cuando aumente el precio del gas, siendo más rentable el aprovechamiento de gas metano a través de esta técnica. El hecho de mayores exigencias ambientales en la gestión de residuos sólidos también pueden hacer que esta tecnología se desarrolla a niveles mayores, al aumentar las exigencia en cuando al porcentaje máximo de humedad existente en los lodos que se envían a vertederos.

3.3.2. Sistemas solares de alta temperatura

Los sistemas solares de alta temperatura es una tecnología que tiene como principal aplicación la producción de energía eléctrica electricidad mediante vía termodinámica, trabajando con fluidos sobre los 300 °C, basándose en los mismos principios que los existentes en una central eléctrica convencional que utiliza combustibles fósiles. Se consigue que la radiación solar caliente a alta temperatura un fluido caloportador para generar vapor poniendo en marcha una turbina acoplada a un alternador. En algunos casos, es el propio fluido primario el que, convertido en vapor, acciona la turbina. En estos procesos se genera una gran cantidad de calor residual que puede ser aprovechado para evaporar y desalinizar aguas, por lo cual existe una potencial ventaja de la utilización de concentradores solares en la eliminación de contaminantes en aguas

residuales ya que cuando las aguas residuales o lixiviados son sometidas a altas temperaturas (mayores de 200 °C) el agua se evapora y se generan sólidos.

La mayoría de la bibliografía encontrada en el ámbito del uso de sistemas solares de alta temperatura en tratamientos de agua se refiere a procesos de desalinización de aguas, lo cual no tiene aplicabilidad en este trabajo de investigación, ya que no se contempla la alternativa de desalinización de aguas residuales de la acuicultura de agua de mar.

3.3.2.1. Nanofiltración y osmosis inversa

La eliminación de aguas residuales al medioambiente puede implicar un ingreso indeseado de excesivas cantidades de sales y contaminantes inorgánicos como arsénico, calcio, cloro, cobre, flúor, magnesio, manganeso, sulfatos y otros compuestos y elementos que pueden afectar negativamente al medioambiente especialmente si esta eliminación se prolonga en el tiempo. La nanofiltración y la osmosis inversa NF/OI es capaz de retener muchas de esas sales in contaminantes inorgánicos, además estos procesos acoplados a una fuente de energía renovable puede ayudar a conseguir una descontaminación de aguas en zonas sin tendido eléctrico.

En un trabajo presentado por Richard et al (2010) se evaluó la utilización de esta técnica en cuanto al impacto de las fluctuaciones de energía solar en la retención de sales, el rol del pH en el proceso y los mecanismos predominantes de retención en aguas contaminadas.

Observaron que los periodos con alta irradiación solar la potencia de la bomba de impulsión del sistema aumentó, entregando mayor presión y caudal de agua, lo contrario ocurrió en periodos de cielos nublados. Estas variaciones en potencia, presión y caudal afectan a la retención de solutos. En días de alta irradiación se obtienen altos niveles de retención de algunas sales y compuestos inorgánicos, aunque la retención de algunas elementos como estroncio, calcio y uranio no son afectados por las cambio de irradiación solar. En las condiciones de experimentación, pH 7,2, las especies predominantes de

estroncio y calcio con Sr^{2+} y Ca^{2+} , respectivamente. Ambas especies químicas tienen un radio de hidratación alto (0.412 nm), lo que sigue que la retención de estas especies debe predominantemente a su tamaño de exclusión.

La retención de las otras sales y contaminantes fue efectivamente afectada por cambios en la irradiancia solar. La retención de nitrato, potasio, y sodio depende fuertemente de la tendencia de la irradiación, donde los niveles más bajos de retención ocurrieron durante bajos niveles de retención, es decir, en las mañanas y en el atardecer. El radio de hidratación del nitrato, potasio, y del sodio son relativamente bajos por lo cual las condiciones de operación están más influenciadas por la retención que por el tamaño hidratado de los iones. La convección y difusión dominan el mecanismo de retención de nitratos, potasio y sodio, lo que se ve evidenciado por incrementos en los niveles de retención al aumentar la presión.

En un estudio realizado por Kosmadakis et al (2010) se presentan un análisis paramétrico de un sistema de desalinización solar a través de ciclo Rankine por osmosis inversa, donde los principales parámetros estudiados fueron el número total de tubos instalados y la pendiente de los captadores.

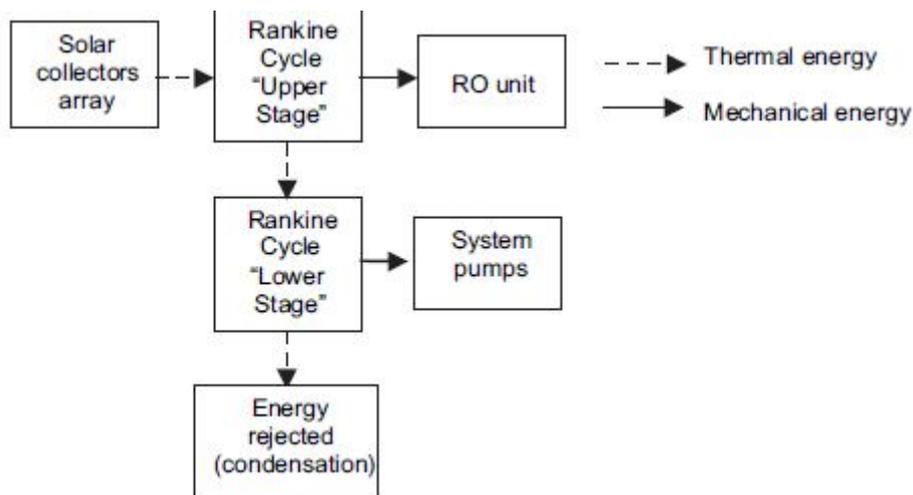


Fig. 3.14. Diagrama de bloques del proceso.

El proceso tiene un productor de calor que atrapa la energía solar y la transforma en energía mecánica a través de un ciclo orgánico de Rankine de

alta temperatura. La energía mecánica generada hace funcionar una bomba de osmosis inversa de alta presión. Durante la condensación se desarrolla un intercambio de calor generándose un proceso denominado ciclo orgánico de Rankine de baja temperatura. La energía mecánica generada en este último ciclo es aprovechada en los demás sistemas de bombeo. La última etapa del sistema de intercambio de calor es aprovechado para precalentar el agua. En la siguiente figura se muestra un diagrama layout del proceso.

Los investigadores observaron que el ajuste de la pendiente de los captadores es de gran importancia en el rendimiento del proceso y que existe un número de captadores óptimo respecto de la eficiencia del sistema, al sobrepasar este punto óptimo la eficiencia cae fuertemente. El sistema también mostró que se mejora el rendimiento económico del proceso al adecuarse el suministro de calor implicando una mayor área de captación solar y operar por más tiempo al día. Este hecho tiene un impacto positivo en el tratamiento de agua. También observaron que se puede mejorar sustancialmente el ciclo Rankine utilizado por ejemplo optimizando el rendimiento del expansor.

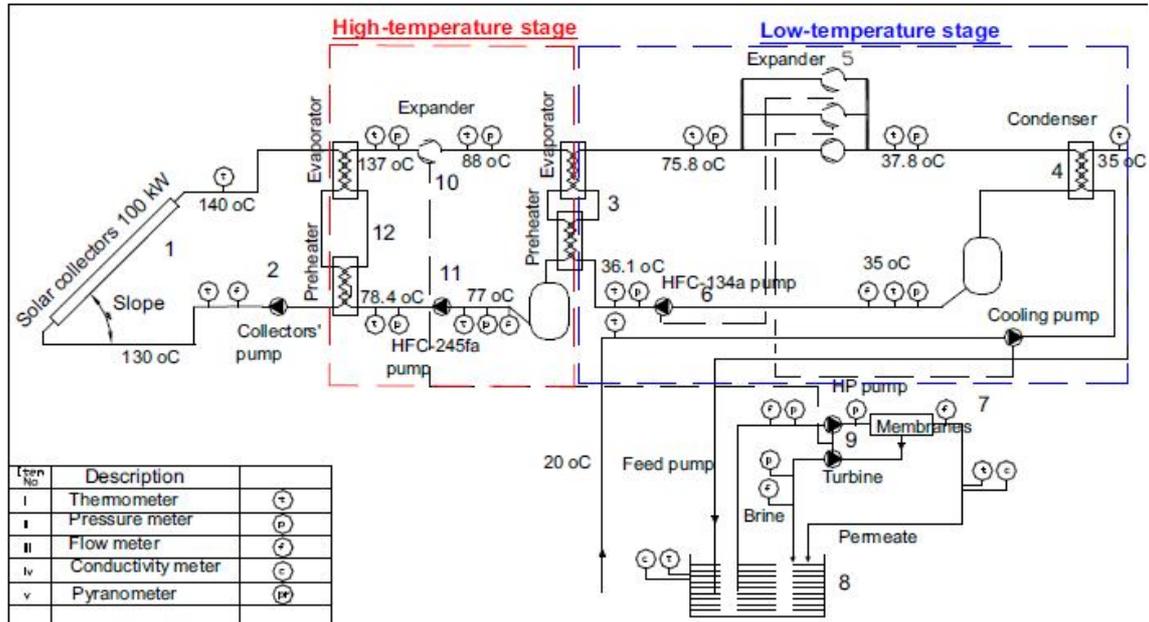


Fig. 3.15. Diagrama del ciclo Rankine.

Este tipo de equipos no es requerido para el ejemplo puntual de tratamiento de aguas que se está abordando en este estudio ya que no es necesario desalinizar en agua ni someterlos a procesos de diálisis.

3.3.3.2. Destilación solar.

La destilación por membranas es térmicamente realizada por membranas en la cuales sus microporosa hidrofóbico separa el vapor. La naturaleza hidrofóbica de la membrana previene en paso de agua a través de los poros. Un dispositivo de destilación esencialmente separa agua salina en dos vías, una con bajas concentraciones de solventes y otra donde las sales quedan retenidas. La diferencia de presión produce un gradiente de presión que causa que el vapor pase a través de la membrana y condense en una superficie más fría, el resultado en un destilado con una alta pureza.

El uso de energías renovables como solar o eólica para utilizarlos como fuente de alimentación de potencia en los sistemas de destilación está aumentando mientras que el costo de implementación de esas tecnologías está decreciendo Eltawil et al (2009).

Un ejemplo del uso de energía solar para usos térmicos de alta temperatura es la tecnología lineal de Fresnel que consiste en un sistema que atrapa la radiación solar concentrándola en un tubo o captador solar. El sistema cuenta con un seguidor solar en el cual cumple con la función de que los espejos siempre estén orientados al sol. Un tubo absorbedor es situado en el foco de los espejos para que los rayos solares sean reflejados en el, Fig. 3.16.



Fig. 3.16. Tecnología lineal de Fresnel.

El agua es bombeada a través del sistema de tuberías y al pasar por los absorbedores la temperatura y presión aumenta significativamente, generándose vapor. Este vapor hace funcionar una turbina generando electricidad (pye, 2008).

La destilación multiefecto consiste en un proceso en el que el agua con alta presencia de sales ingresa en la primera cámara o efecto donde es evaporada mientras que el vapor de baja presión condensa en un intercambiador de presión. El vapor generado es usado en el segundo efecto es utilizado para evaporar los residuos de la salmuera del primer efecto. Otra vez el vapor generado es utilizado en subsecuentes efectos para tener una salmuera más concentrada.

Este tipo de equipos no es requerido para el ejemplo puntual de tratamiento de aguas que se está abordando en este estudio ya que no es necesario desalinizar en agua ni someterlos a procesos de diálisis.

3.3.3.3. Sistema acoplado de electrodiálisis y oxidación avanzada

Recientemente, la oxidación avanzada, llevada a cabo utilizando catalizadores como TiO_2 ha recibido creciente atención. Esta técnica puede descomponer compuestos orgánicos y microorganismos en sustancias no tóxicas como subproductos intermedios, CO_2 y agua, o incluso puede conseguirse una mineralización completa con el uso de lámparas UV o utilizando irradiación solar. Por otro lado, la electrólisis de electrodos de boro dopados con diamante (BDD) también puede conseguir descomponer sustancias orgánicas.

El amplio potencial de esta técnica hace posible generar varios oxidantes altamente activos como persulfato. Por lo que la utilización de ambas técnicas tiene un alto potencial de purificación. Sin embargo la electrólisis con electrodos BDD presenta como desventaja que requiere un alto consumo de energía eléctrica.

Ochiai et al (2010) presentó una investigación en la cual se empleó de forma acoplada la electrólisis con electrodos BDD y fotocátalisis heterogénea solar con TiO_2 . Aguas residuales altamente contaminadas son depuradas con electrólisis y luego purificadas con fotocátalisis. La potencia eléctrica del sistema fue suministrada por módulos fotovoltaicos. El sistema complete funciona totalmente por energía solar.

En la siguiente figura se presenta una fotografía a) y un esquema del sistema b), el cual consiste en un prefiltro, una unidad de electrólisis, una unidad fotocatalítica, un filtro final y un filtro con intercambio iónico, todo esto alimentado por un sistema fotovoltaico. El filtro final es utilizado para retener los sólidos suspendidos más finos. El filtro de intercambio es empleado para eliminar los electrolitos y subproductos de descomposición iónica como NO_3^- . Los investigadores utilizaron tres módulos fotovoltaicos (V_{pmax} , 17.4 V; I_{pmax} , 7.20 A) para suministrar energía eléctrica. La energía suministrada durante el día es cargada en baterías para proveer energía en los días nublados o por la noche.

Se obtuvieron altos niveles de rendimiento en la degradación de compuestos orgánicos, expresados en DQO, lo que implicó una mineralización de estos compuestos. El sistema fotovoltaico consiguió entregar adecuadamente la energía al sistema.

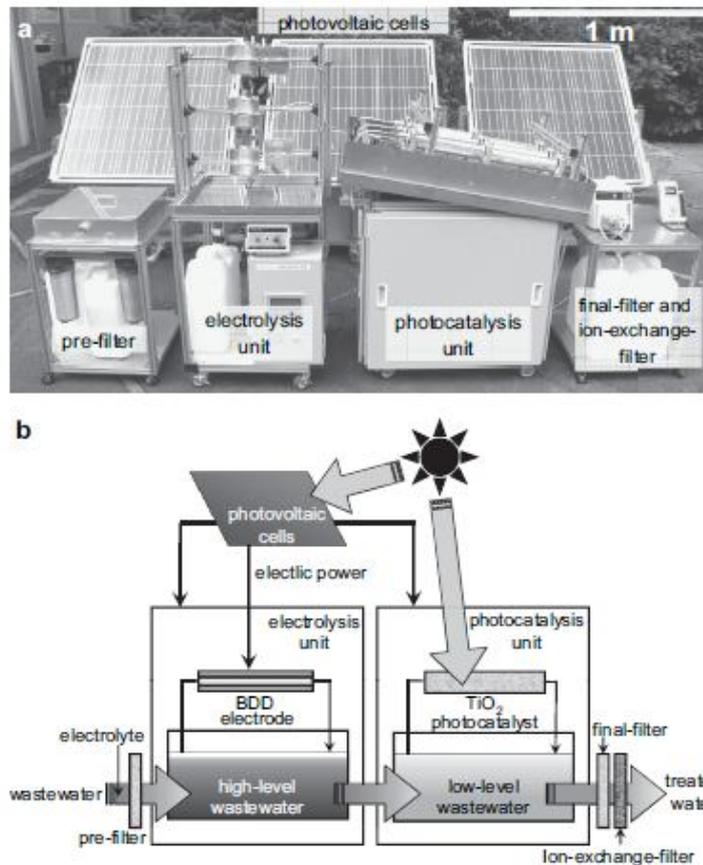


Fig. 3.17. a) Fotografía del sistema y b) diagrama de bloques del proceso.

Resumen.

Los sistemas solares de alta temperatura son una tecnología que se utiliza principalmente para producir electricidad, generándose en este proceso una gran cantidad de calor residual, el cual puede ser aprovechado presentando una gran utilidad en el tratamiento de aguas de afluentes y efluentes de aguas, utilizando su energía térmica para evaporar aguas con contenidos indeseados de sales, a través de diversas técnicas como destilación solar, nanofiltración, osmosis inversa y electrodiálisis. Estas técnicas, como se expresó anteriormente tienen como objetivo eliminar sales del agua evaporándola y filtrándola, por lo tanto no tienen aplicación dentro de este trabajo de investigación.

Una de las ventajas principales de esta tecnología es su comparativamente alto rendimiento y su rapidez en términos del tiempo que requiere para lograr evaporar agua y eliminar sales, por otro lado, debido a que requiere de

sistemas de alta concentración solar y de sistemas de seguimiento, su costo de inversión es elevado, así mismo requiere de una mano de obra especializada y cualificada, siendo estas sus principales desventajas.

La tecnología de desalación a alta temperatura está en una fase de planta piloto y se están desarrollando importantes esfuerzos para llevarlos a una escala comercial.

4. Energía Solar como alternativa energética de los sistemas de tratamiento de aguas.

Existen diversas estrategias para abastecer de energía los sistemas de tratamientos de aguas donde la alternativa usualmente más utilizada es la energía eléctrica obtenida desde la red eléctrica existiendo la posibilidad también de abastecer de electricidad con sistemas fotovoltaicos (u otros renovables como eólico, minihidráulico, etc.) y/o de aprovechar el calor proveniente del sol para calentar aguas o lodos además del uso de la radiación solar directamente con fotocatalizadores.

A continuación se presentan algunos ejemplos de tecnologías de tratamiento que han sido abastecidas utilizando la energía solar. En este trabajo de investigación no se ha considerado el uso de energía eólica debido a que la zona donde esta posicionada el recurso eólico no es muy importante siendo una zona de poco viento.

4.1. Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos se presentan como una interesante tecnología a tener en consideración a la hora de evaluar tratamientos de aguas residuales con uso de energía solar. En medio de la actual crisis energética el precio de la energía eléctrica aportada por la red ha aumentado significativamente. Lo cual ha impulsado a reducir la dependencia de esta red y uno de los factores afectado por esta política ha sido el sector de las plantas de tratamiento de

aguas, viendo aumentadas las instalaciones que funcionan con energía solar con sistemas fotovoltaicos.

En áreas lejanas de una red eléctrica una fuente de energía renovable provee una atractiva opción para satisfacer necesidades eléctricas. Como fuente de energía confiable el bombeo de agua a través de sistemas fotovoltaicos ha contribuido a suministrar agua a comunidades rural ayudando a solucionar problemas ambientales. Para tratamiento de agua de pequeña escala los sistemas fotovoltaicos pueden ser una interesante solución bajo este contexto de lejanía de una red eléctrica convencional.

La Figura 4.1 muestra la descripción general de un sistema de tratamiento desarrollada por Ghali (2009), el cual consiste de tres componentes principales. Uno de los componentes es un módulo fotovoltaico que suministra energía eléctrica necesaria para operar las bombas y sistemas de control del proceso de tratamiento. Un segundo componente es la unidad de tratamiento de aguas residuales y el tercer componente es el sistema de bombeo.

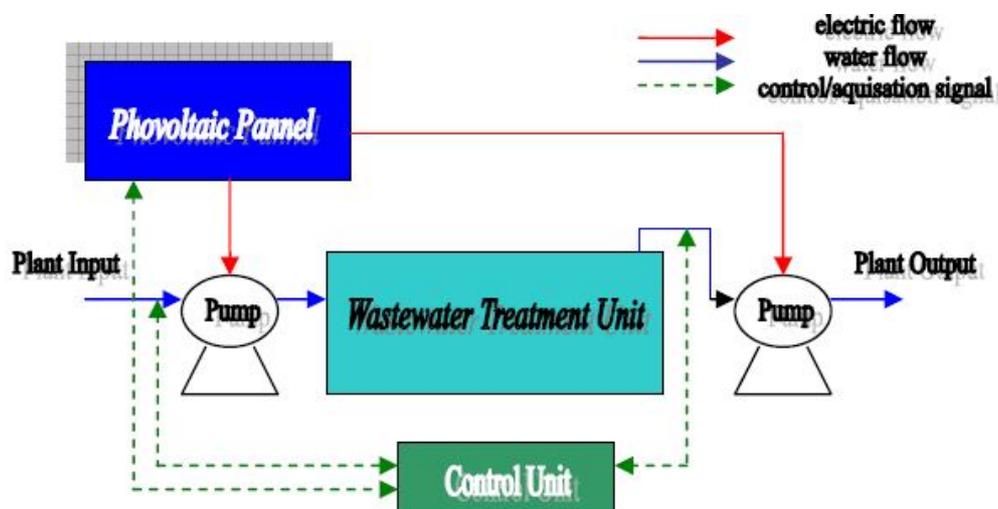


Fig. 4.1. Planta de tratamiento de aguas de pequeña escala.

Con este equipamiento los investigadores observaron que el sistema logra funcionar adecuadamente a lo largo de todo el proceso y de que es posible lograr aguas de buena calidad sin la necesidad de conectarse a la red eléctrica convencional, permitiendo con ello una independencia y autonomía energética. Este sistema se diseñó para tratar aguas residuales principalmente con

presencia de sólidos suspendidos a un caudal de 300 L/h para lo cual consume una energía de 660 J/L.

Se han desarrollado interesantes equipos para el tratamiento de aguas de la industrial de la acuicultura incorporando tecnología fotovoltaica. Por ejemplo, la empresa SolarBee Inc. ha desarrollado un producto comercial denominado SolarBee® un sistema flotante potenciado por energía solar, el cual es capaz de hacer elevar desde el fondo del mar o de un lago 10000 galones de agua por minuto, es decir, 37800 L/min. SolarBee® posee un sistema de almacenamiento de energía en baterías que le permiten operar con baja radiación solar. En la siguiente figura se presenta una fotografía de SolarBee® instalado en una laguna de tratamiento de aguas.



Fig. 4.2. SolarBee® desarrollado por SolarBee Inc.

El proceso funciona a través de un sistema de impulsores en forma de hélices que al girar levantan el material del fondo marino o lacustre (alimento no ingerido, fecas, restos de animales y otros elementos orgánicos generados por los procesos acuícolas), bajo en oxígeno disuelto y fría, hacia la superficie, con mayor concentración de oxígeno y más caliente, con el objetivo de airear esa agua oxigenándola mejorando parámetros de calidad del agua como la concentración de oxígeno disuelto en el agua, la demanda bioquímica de oxígeno y reducir los lodos generados, control de olores, eliminar niveles de ácido sulfhídrico reducir la presencia de sólidos totales y las concentración de amonio en el agua debido a la oxidación desarrollada por el proceso de aireación las sustancias oxigenadas. Al aumentar la temperatura de esta agua,

por el hecho de pasar de una zona fría a una más caliente, hace que su densidad sea menor, con ello se consigue que no sedimente rápidamente, estando más tiempo en zonas superficiales, mejorando en rendimiento de la aireación.

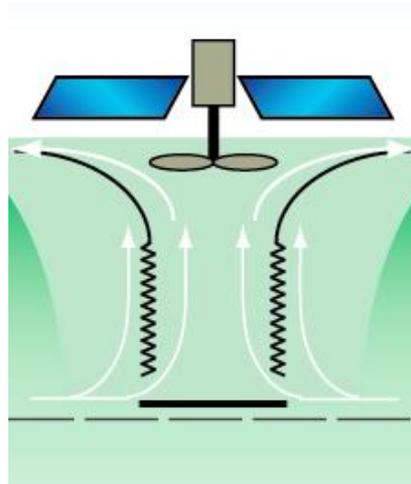


Fig. 4.3. Movimiento del agua bajo la acción de SolarBee.

La energía que el sistema utiliza la obtiene de tres paneles fotovoltaicos de 80 Watt orientados entorno a un patrón triangular. Estos paneles están protegidos de los pájaros y sus excreciones a través de un sistema disuasorio de aves. Como se mencionó anteriormente, el sistema está diseñado para elevar desde el fondo del mar o de un lago una flujo de 37800 L/min llevándolo hasta la superficie, consiguiendo con ello oxigenarlo, aumentando su oxigenación, el sistema tiene un radio de acción aproximado de 3 metros para una profundidad de 15 m, es decir, en torno a 420 m³ de agua.

4.1.1. Sistemas acoplados de desalinización y fotovoltaica.

Una alternativa en las tecnologías de desalinización es la basada en osmosis inversa asociado a sistemas fotovoltaicos. El sistema de desalinización descrito por Karellas et al (2011) consiste en una serie de subsistemas integrados en uno. Como se muestra en la Figura 4.4, la irradiación solar es captada por captadores solares del sistema de seguimiento parabólico haciendo aumentar la temperatura del aceite que se encuentra en su interior.

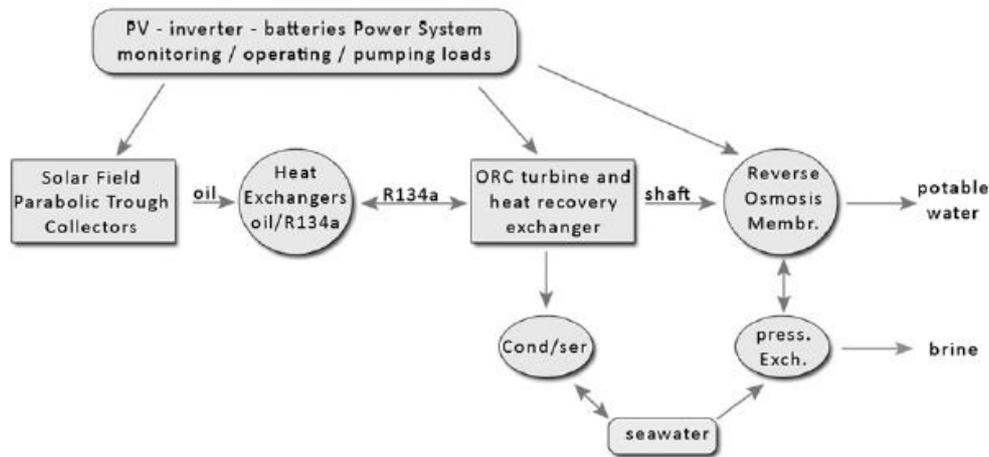


Fig. 4.4. Diagrama del sistema de desalinización

El calor es transferido a un intercambiador de calor para calentar otro fluido orgánico (R134a). El vapor generado por el fluido calentado es expandido en una turbina produciendo potencia eléctrica y es condensado en un sistema enfriado con agua de mar. El torque producido es entregado a una bomba de ósmosis inversa elevando la presión del agua de mar a desalinizar.

Existe un subsistema fotovoltaico auxiliar que provee electricidad a los componentes que el sistema requiera como el circulador de aceite del campo solar, las bombas de alimentación de agua de mar, las luminarias y los sistemas de control PLC. El simulador IPSE Pro predice el consumo de electricidad del sistema y genera perfiles de consumo anuales. Utilizando una herramienta de programación llamada HOMER desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de los Estados Unidos de América se determinan las características del sistema fotovoltaico. El software encuentra la mejor solución de acuerdo a los perfiles de demanda que se tendrán e incorporando criterios meteorológicos.

4.1.2. Electrodiálisis apoyada por sistemas fotovoltaicos.

La electrodiálisis es una técnica basada en el transporte de iones a través de membranas selectivas bajo la influencia de un campo electromagnético. Esta técnica provee de facilidad y de un alto rendimiento en la desalinización de

aguas salobres, la desalinización de aminoácidos y otras soluciones orgánicas, útil para tratamiento de efluentes y el reciclaje de aguas industriales.

En el sistema convencional, las membranas de intercambio aniónico y catiónico están alternadamente ubicadas entre el cátodo y el ánodo. Cuando se aplica una diferencia de potencial entre ambos electrodos los cationes se mueven hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo. Los cationes migran hacia las membranas de intercambio catiónico que tienen fijadas grupos negativos y las membranas de intercambio aniónico, que tienen un grupo positivo retienen los aniones. Este transporte y captura produce un aumento de las concentraciones de sales en los compartimientos de concentración y una reducción de la concentración en las zonas adyacentes o zona diluida.

Para lograr este transporte de iones el electrodiálizador necesita una potencia eléctrica (corriente directa), que normalmente es suministrada por la red eléctrica, sin embargo esta puede ser reemplazada por fuentes alternativas de energía. Generalmente los sistemas fotovoltaicos cuentan de un grupo de paneles, baterías, un regulador o controlador y un inversor.

Sin embargo, la energía que entrega el sistema fotovoltaico puede ser suministrada directamente al sistema electrolítico sin el uso de baterías, produciendo agua más limpia durante las horas de sol. Incluso la bomba centrífuga que el sistema requiere también pueden ser abastecidas energéticamente por fotovoltaica.

Obviamente, la ausencia de baterías implica que la producción de agua depende de la variabilidad de la irradiación solar y por ende de las condiciones meteorológicas, de la localización geográfica y de la época del año. La desalinización de aguas salobres utilizando electrodiálisis directamente con sistemas fotovoltaicos presentan importantes ventajas respecto de los sistemas de osmosis inversa con fotovoltaica como por ejemplo desde el punto de vista de la desalinización logra una alta depuración de aguas incluso con altos contenidos de sulfato, mayor vida útil de las membranas debido a una mayor estabilidad química y mecánica, menor incrustación y menos necesidad de pretratamiento, puesta en marcha y parada más sencilla.

Desde el punto de vista del uso de los sistemas fotovoltaicos como fuente de energía el electrodiálizador y el sistema de bombeo pueden funcionar directamente con corriente directa, por lo que el inversor es innecesario. En los sistemas de osmosis inversa alimentados con paneles fotovoltaicos, estos convierten la luz del sol en electricidad y luego la electricidad se transforma en energía mecánica para elevar la presión del agua, con las respectivas pérdidas energéticas.

En una investigación desarrollada por Ortiz et al (2007) se demostró la aplicabilidad de la desalinización a través de esta vía empleando sistemas fotovoltaicos. En la siguiente figura se presenta un esquema del proceso.

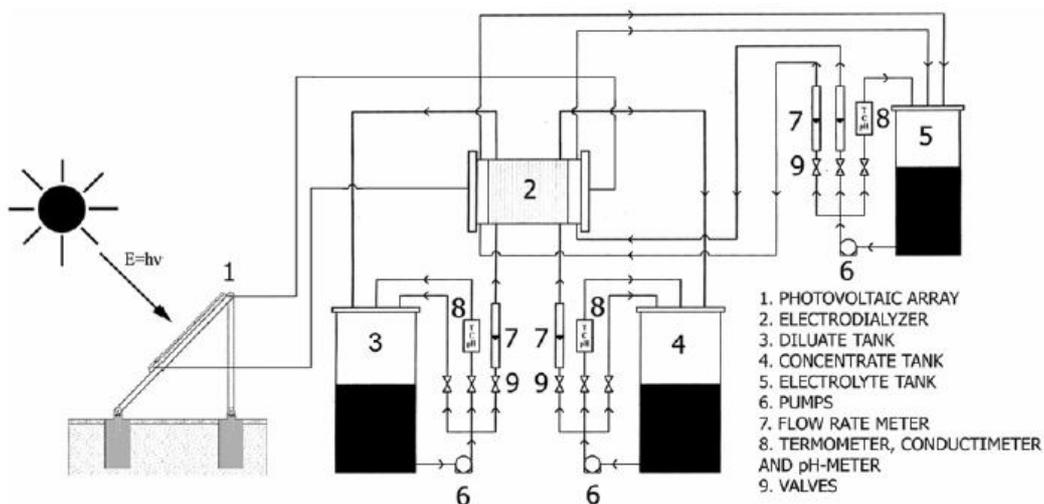


Fig. 4.5. Ilustración esquemática del sistema de electrodiálisis fotovoltaica.

Los resultados experimentales obtenidos por los investigadores con los equipos con los que operaron muestran que el sistema puede ser operado eficientemente en diferentes condiciones meteorológicas mientras que la irradiación solar este por sobre 200 W/m^2 .

4.1.3. Electrocoagulación apoyada por sistemas fotovoltaicos.

En muchos procesos industriales, con un control adecuado es posible depurar las aguas residuales generadas a través de tratamientos biológicos, sin embargo, algunos efluentes, como los de las industrias textiles, por ejemplo,

presentan problemas asociados a altas concentraciones de demanda química de oxígeno y compuestos orgánicos que no son biodegradables, los cuales, como su nombre lo indica, no pueden ser tratados biológicamente. La electrocoagulación es una técnica relativa a la coagulación química que involucra un suministro de electricidad a un ánodo (ubicado en un tanque con el agua a tratar), esta corriente eléctrica hace que se generen iones de aluminio (aluminio presente en el ánodo) actuando como un coagulador. El lodo generado producto de la coagulación es separado por filtración. Una de las ventajas de esta técnica es que los requerimientos de aportes de químicos son mínimos.

Esta técnica de la posibilidad de acoplársele un sistema fotovoltaico como fuente de suministro de energía eléctrica, la que puede ser aplicada directamente al electrocoagulador sin la necesidad de un inversor ni de baterías.

Valero et al (2008) realizaron un estudio de este proceso empleando sistemas fotovoltaicos sin baterías para la depuración de aguas residuales con presencia de colorantes en un sistema diseñado para trabajar en continuo, en la siguiente figura se presenta un esquema experimental del proceso.

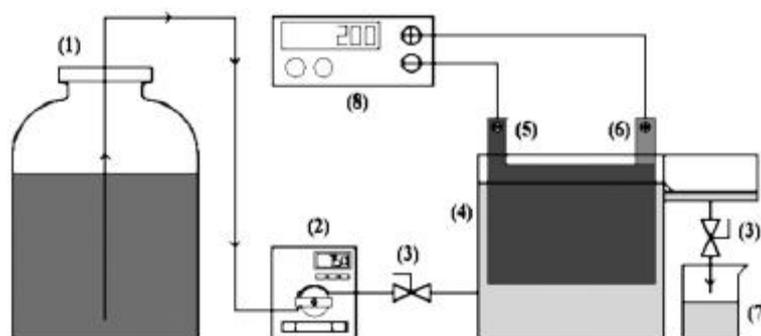


Fig. 4.6. Esquema del sistema experimental.

Se aprecia que los principales componentes del sistema son el depósito o estanque con la solución a tratar, una bomba peristáltica, un sistema de válvulas, el electrocoagulador, un cátodo y el suministro de energía. Se evaluaron distintas configuraciones de paneles fotovoltaicos disponiéndolos en

serie o paralelo. El proceso también fue realizado empleando energía proveniente de la red eléctrica.

Se observó que cuando la conductividad del agua a tratar es bajo es uso de los sistemas fotovoltaicos es ventajoso respecto de la red eléctrica convencional. Cuando se emplea esta los electrolitos ingresan a la solución aumentando la conductividad. En contraste, el sistema fotovoltaico permite trabajar con efluentes de baja conductividad sin la adición previa de electrolitos. El ratio corriente/caudal óptimo depende de la irradiación solar, por lo tanto, el volumen la solución a tratar es variable. Esta situación es desventajosa cuando en ubicaciones geográficas o estaciones del año en los cuales los picos de irradiación son bajos. Los investigadores observaron que la productividad y el rendimiento del sistema aumentan significativamente de la temperatura del agua de ingreso y de su presión.

4.2. Captadores solares planos

En algunas regiones, donde existe una importante radiación solar a lo largo de todo el año, la energía solar se presenta como una real alternativa para diversas aplicaciones. En estos lugares este tipo de energía puede ser aplicada para diversos usos como para el calentamiento de agua, destilación solar, calor en invernaderos, secado de lodos y en el calentamiento de procesos anaeróbicos en tratamientos de aguas residuales.

En una investigación de Yiannopoulos et al, (2008) se evaluó la utilización de un sistema que comprendía el uso de captadores solares para elevar la temperatura del lodo y cumplir con el objetivo del tratamiento de aguas. Para lo cual emplearon el captador solar, un intercambiador de calor, un estanque de almacenamiento de agua caliente y un reactor anaeróbico. En la Figura 4.8 se presenta un diagrama esquemático del sistema.

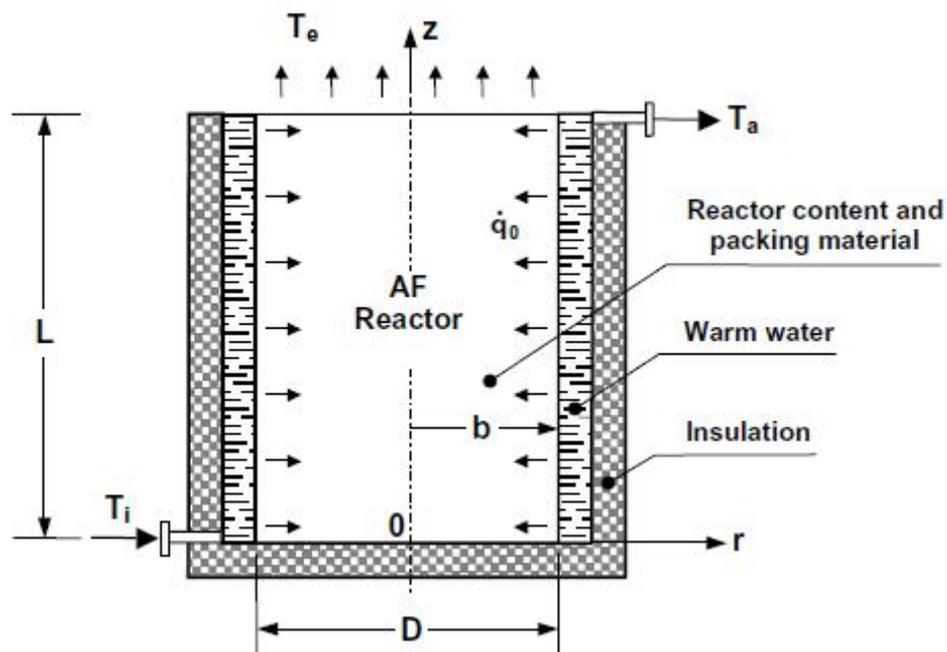


Fig. 4.7. Diagrama esquemático del reactor

El agua caliente proveniente del estanque almacenador recircula por las paredes del reactor. El agua existente en el sistema es calentada por un módulo de paneles solares conectados en paralelo. El captador solar calienta el fluido que circula por él, que está compuesto por una mezcla de agua y etilén glicol. El objetivo de esa mezcla es evitar que el sistema se congele al existir temperaturas bajo cero. El módulo de captadores fue cubierto con una superficie absorbente orientada hacia el ecuador inclinada con un ángulo óptimo. Debido a la que la energía del sol recibida por el captador solar es variable, los investigadores instalaron un estanque de agua aislado para almacenar el exceso de calor y poder utilizarlo durante periodos con poca o sin radiación solar. El agua caliente almacenada en el estanque es transferida al reactor a través de un sistema de tuberías y la demanda de energía del reactor depende de las pérdidas térmicas de este.

Considerando la tecnología desarrollada por los investigadores se requiere de aproximadamente 22 kJ/L para lograr que los lodos generados estén a la temperatura de 35° C, en un volumen de estos de 2 m³ óptimo para desarrollar procesos de biodigestión anaeróbica.

Resumen.

Los sistemas de tratamiento de aguas presentan consumos de energía que normalmente están satisfechos por la red eléctrica. Sin embargo, existe una clara tendencia a diversificar la fuente de energía utilizada, donde las energías renovables han avanzado considerablemente. Dentro de ellas, el recurso solar se presenta como una interesante opción para satisfacer de energía los sistemas de tratamiento de aguas residuales en zonas de alta radiación, donde el aprovechamiento térmico para calentamiento de lodos y los sistemas fotovoltaicos para aportar electricidad a los equipos son dos alternativas muy aplicables.

Los sistemas fotovoltaicos ofrecen la posibilidad de utilizar diferentes equipos y tecnologías de forma independiente de la red eléctrica, con lo cual los procesos se pueden desarrollar en sitios alejados de los tendidos eléctricos. Esta solución energética se ha probado para diversos sistemas de depuración de aguas como tecnologías de filtración avanzada, electrodiálisis, sistemas fotocatalíticos y electrocoagulación, presentando en todos ellos buenos resultados en cuanto a un adecuado funcionamiento y obtención de niveles de depuración satisfactorios.

Además de lo comentado una interesante ventaja de los sistemas fotovoltaicos para los procesos de tratamiento de aguas es que es posible hacer funcionar el sistema aún con falta del recurso solar e incluso de noche si se dispone de sistemas de almacenamiento, es decir, con el uso de baterías.

Como desventaja se observa que para que el sistema no sea excesivamente grande y caro solo se suele trabajar pequeños volúmenes de agua. Así mismo, si las aguas a tratar presentan un grado de contaminación o concentración de sal elevada, se requerirá entonces de equipos más grandes y potentes, con lo cual la depuración implicará un consumo mayor de energía, necesitándose finalmente de un sistema generador de energía más grande.

Por otro lado, el tratamiento de lodos procedentes de los tratamiento de aguas residuales puede ser optimizado si la temperatura de este se eleva hasta los 35 °C, por lo cual, en épocas frías, supone un problema, que normalmente es

resuelto utilizando sistemas eléctricos de calentamiento o con uso de calderas. La alternativa de utilizar energía solar para solucionar ese problema se ha probado con buenos resultados, consiguiendo que los lodos sean deshidratados o permitir una biodegradación anaeróbica óptima.

La principal desventaja de este proceso es que el sistema depende del recurso solar, que es muy temporal y difícil de pronosticar, luego se requiere considerar ese factor, que puede ser solucionado utilizando dispositivos de almacenamiento térmicos, como lo son sólidos con alta inercia térmica.

5. Actual solución al problema

En los centros de cultivo del abalón se utilizan técnicas de tratamientos de agua que presentan un coste que depende de la tecnología aplicada. Normalmente existe un tratamiento primario que consta de un sistema de decantación y filtración y un tratamiento secundario a través de biofiltros y un tratamiento avanzado.

La energía eléctrica en Chile, y en particular en Coquimbo, es abastecida por el Sistema Interconectado Central, SIC, el que utiliza principalmente plantas de ciclo combinado, con apoyo de centrales hidroeléctricas y petróleo y sus derivados. Además, ha habido un incremento en el costo de generación de energía eléctrica, lo que complica a los sectores exportadores por la pérdida de competitividad. En general el precio de la electricidad y de los combustibles en Chile tiene una clara tendencia al alza (Concha et al, 2009). Por otro lado, actualmente existe un déficit energético nacional, constantemente Chile debe comprar energía a Argentina, país que cuenta con cantidades limitadas de gas natural, por lo cual existe un riesgo de falta de energía en épocas de invierno u horas punta de demanda de electricidad.

Por lo cual, es interesante realizar un análisis que permita evaluar el uso de energías renovables, la cual, si bien es cierto, que pueden representar en la actualidad una inversión más elevada, es una alternativa que se podrá contemplar en un futuro, ya sea por motivos económicos, ambientales u otros.

El interés de este trabajo es de tipo ambiental y no económico, ya que al día de hoy la aplicación de tecnología solar para diferentes usos es económicamente más costosa que otros sistemas de suministrar energía, aunque esta situación en el futuro se prevé que cambiará. El interés ambiental de este trabajo de investigación está orientado a que el uso de estas tecnologías solares como fuente de energía para los sistemas de tratamiento de aguas residuales de un centro de cultivo de abalón radica en que es una tecnología limpia que emplea un recurso abundante y que no emite gases de efecto invernadero para su generación, siendo una clara alternativa al uso de combustibles fósiles para el abastecimiento de energía para los sistemas de tratamiento de aguas.

El coste de inversión y de operación implícitos en el tratamiento de estos centros de cultivo también depende del tamaño de producción. Este tamaño puede ser expresado en término de la cantidad de organismos de cultivo que se pueden obtener con talla comercial que a su vez se puede expresar en el caudal de agua residual que se genera en los estanques reproductores. Por otro lado también dependen de la calidad del agua a la salida del proceso productivo y de la calidad que la normativa vigente exija.

En ese contexto, la siguiente tabla presenta los rangos de los parámetros existentes en aguas residuales permitidos por la Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales D.S. N° 90 de 2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (DO 07.03.2001) y el promedio de los existentes en centros de cultivo intensivos de abalones.

Tabla 5.1. Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua dentro de la zona de protección litoral y el promedio de los existentes en centros de cultivo de abalones.

Parámetro	Exigido por la Norma	Existente promedio
pH	6-8	6-9
Sólidos susp. totales, mg/L	1000	5000
COT, mgO ₂ /L	60	1000
Nitrógeno total, mg/L	50	6900
Nitrito mas nitrato, mg/L	150	2300

Por otro lado, en las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales se produce una importante cantidad de gases de efecto invernadero (Monteith et al., 2005), debido al consumo de combustibles fósiles por parte de los equipos instalados y por la descomposición biológica de los lodos producidos en la planta. Respecto de estos lodos, actualmente, la industria de la acuicultura solo realiza una gestión transporte al vertedero, sin realizar ningún tipo de tratamiento de degradación que permita el atrapamiento y almacenamiento de los gases producidos, existiendo una biomasa susceptible de ser tratada y aprovechada.

Las razones expresadas anteriormente en relación a los sistemas de tratamiento comúnmente utilizados en la acuicultura, demuestran que existe una clara posibilidad de realizar una mejoría tratamiento del agua efluente y que es posible emplear tecnologías que empleen energías renovables para este fin, en especial la solar y biomasa.

Para un centro de producción de abalones en una modalidad intensiva es requerida la presencia de personal cualificado, un terreno más reducido que en centro de cultivo en modalidad extensiva, una infraestructura para el correcto funcionamiento de todas las instalaciones, incluyendo en sistema de tratamiento de aguas, equipos, estanques y tuberías, un consumo de energía eléctrica para el funcionamiento de todos los equipos, para un tamaño de producción de 120 m³/h se tiene que el porcentaje de los costes asociados a energía del sistema de tratamiento respecto al coste de energía de toda la planta es de un 43%.

En la Tabla 5.2 se tiene la relación de estos costes para un centro de cultivo completo la que considera un sistema de tratamiento de aguas tradicional, costes expresados en Euros. Los costes originales están expresados en pesos Chilenos (\$), a una equivalencia de 670 \$/€. El tamaño de la planta generaría un caudal de aguas residuales de 120 m³/h.

Tabla.5.2. Costes de inversión y operación del centro de cultivo.

	Inversión	Operación y mantenimiento		
Conceptos	Inversión	Asociado al Energético	Resto Mantenimiento	Total anual Operación y Mto.
	€	€/año	€/año	€/año
Terreno	1800000	0	0	0
Infraestructura	60700	0	0	0
Equipos e instalaciones	600000	4600	51000	55600
Costes admin.	60800	0		
Total	2521500	4600	51000	55600

En la Tabla 5.3 se presentan los costes de inversión y de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento tradicional de aguas residuales para un caudal de aguas 120 m³/h.

Tabla.5.3. Costes de inversión y operación del tratamiento de aguas residuales del centro de cultivo.

	Inversión	Operación y mantenimiento		
Conceptos	Inversión	Asociado al Energético	Resto Mantenimiento	Total anual Operación y Mto.
	€	€/año	€/año	€/año
Sistema de tratamiento	4300	980	69100	70080
Terreno	2000	0	0	0
Total	6300	980	69100	70080

En la Tabla 5.4 se presentan los costes de inversión, los consumos de electricidad y los costes asociados a estos consumos para el sistema de tratamiento de aguas tradicional. En ella se puede apreciar que los costes de inversión y de operación no son elevados, sin embargo es necesario tener en cuenta que los procesos llevados a cabo no siempre son adecuados, ya que, como se explicó anteriormente, existen algunas sustancias que pueden estar presentes en el agua residual, que no son eliminadas por estos métodos.

Tabla 5.4. Coste de inversión, vida útil, consumo de electricidad y coste de electricidad de los equipos e instalaciones para el sistema tradicional de tratamiento de aguas residuales

Equipos e instalaciones	Inversión (€)	Consumo electricidad kW·h/año	Coste combustible (L/año)	Coste energía (€/año)
Estanque sedimentador	1760	0		0
Bomba filtros	240	2628		342
Filtro 10 micras	30	0		0
Filtro 5 micras	40	0		0
Lámparas UVa	1000	1051		137
Biofiltros	850	0		0
Bomba biofiltro	180	1139		148
Grupo	200	0	350	117
Total	4300	4818		747

En la Tabla 5.5 se detallan los costes de mantenimiento del centro de cultivo, realizándose una separación de los costes incurridos en el sistema de tratamiento de aguas residuales y el coste de mantenimiento del resto de las instalaciones.

En esta tabla se puede apreciar que los costes de mantenimiento en el centro de cultivo es de € 51000 por año, esto incluyendo los costes en el sueldo del personal encargado de esas labores, y los materiales necesarios para los trabajos de mantenimiento. El personal para el mantenimiento del centro de cultivo consiste en un profesional a cargo de la supervisión de las labores, con un sueldo de 9 € por hora de trabajo, trabajando 8 horas al día y 5 días a la semana. Además constaría de un encargado (mando medio), con un sueldo de

5 € por hora de trabajo, trabajando 8 horas al día y 5 días a la semana y dos operarios con un 4 € por hora de trabajo, trabajando 6 horas al día y 5 días a la semana.

En la misma tabla se tienen los costes de mantenimiento del sistema de tratamiento de agua para el mismo centro. Se tiene un coste total de € 69100, esto incluyendo los costes en el sueldo del personal encargado de esas labores, y los materiales necesarios para los trabajos de mantenimiento.

El personal para el mantenimiento del centro de cultivo consiste en un profesional a cargo de la supervisión de las labores, dos encargados y tres operarios. Todos ellos con el mismo sueldo por hora que los del grupo anterior.

Tabla 5.5. Costes de mantenimiento no energético de un centro de cultivo

Equipos e instalaciones	Costes en mantenimiento (€/año)
Personal	45900
Materiales y repuestos	2000
Seguridad	900
Limpieza	800
Fungible	600
Oficina	800
Total	51000
Sistema de tratamiento de agua residual	€/año
Personal	59000
Materiales y repuestos	5200
Seguridad	2500
Limpieza	1300
Fungible	600
Oficina	500
Total	69100

En la Tabla 5.2 se consideran los costes administrativos del centro de cultivo, estos son debidos a los estudios iniciales (de mercado, factibilidad técnica y económica, financiero, legal), permisos, seguros, contratos, solicitudes de Evaluación de Impacto Ambiental, certificaciones, controles de calidad, Seguridad e Higiene, sistemas de seguridad. Estos costes están detallados en la Tabla 5.6 se detallas esos costes, también expresados en Euros.

Tabla 5.6. Costes administrativos asociados al centro de cultivo

Item	Costes (€)
Estudios iniciales	9300
Permisos	7700
Contratos	10000
Solicitudes	15400
Seguridad	5500
Certificaciones	6200
Controles de calidad	6700
Total	60800

Al duplicar el tamaño de producción a 240 m³/h se tiene los costes de inversión del tratamiento tradicional de las aguas residuales respecto al coste total de inversión del centro de cultivo es de un 0,4%, el porcentaje de los costes de energía eléctrica es de un 36,4% del total del centro y el porcentaje de los costes de mantenimiento es de un 61%.

Para un tamaño de producción de 480 m³/h los costes de inversión del tratamiento de aguas son un 0,4% del total, el coste de energía, el porcentaje de los costes de energía eléctrica es de un 32,3% del total del centro y el porcentaje de los costes de mantenimiento enfocados al sistema de tratamiento de aguas representan un 49,3% del total, datos mostrados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Porcentajes del sistema de tratamiento de aguas residuales respecto del total en diferentes tamaños de producción.

	Inversión	Energía	Mantenimiento
120 m³/h	0,3	45,9	57,5
240 m³/h	0,4	36,4	61,0
480 m³/h	0,4	32,3	49,3

En la siguiente figura se tiene un gráfico de los porcentajes de los costes del tratamiento de aguas residuales respecto del total para los diferentes tamaños de planta.

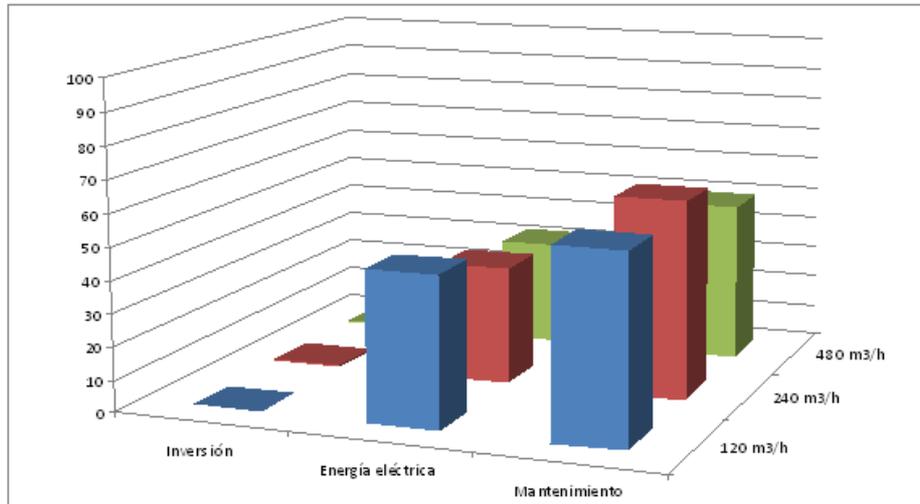


Fig. 5.1. Porcentaje de los costes del tratamiento respecto del total de la planta.

En un centro de cultivo intensivo de abalones dispuestos en estanques en suelo firme el centro opera todo el año debido a que el ciclo de acondicionamiento de los animales es de aproximadamente 12 meses, por lo cual la generación de aguas residuales proveniente de los estanques de acondicionamiento de reproductores, representan un caudal estable a lo largo del año, no existiendo variaciones significativas de energía eléctrica a lo largo de la semana ni del día, ya que los animales son alimentados de forma permanente todos los días y ellos consumen el alimento de forma, por lo cual la generación de residuos y desechos con estables en el tiempo.

Como se explicó anteriormente, los principales residuos y potenciales contaminantes que un centro de cultivo intensivo de abalón produce son los sólidos en suspensión y partículas, materia orgánica presente en lodos y disuelta en las aguas residuales con variables niveles de demanda química de oxígeno, de demanda biológica de oxígeno, carbono orgánico total, nitrógeno total, y con la presencia de compuestos orgánicos recalcitrantes y compuestos químicos peligrosos o tóxicos.

En todos los escenarios que se describirán a continuación el tratamiento primario, que cumple con el objetivo de eliminar los sólidos y las partículas, se lleva a cabo a través de un sistema de decantación y posterior filtración y microfiltración.

Para que los sistemas de depuración de la materia orgánica disuelta funcionen adecuadamente es necesario implementar un tratamiento primario o físico que cumple la función de atrapar las partículas más grandes y el material particulado, para lo cual se debe contar con un estanque decantador y un sistema de filtros que atrapen estos elementos. Por lo cual, para todos los escenarios en estudio, existirá un tratamiento primario o tratamiento físico considerando un tamaño de producción de un estanque de organismos reproductores, es decir, 120 m^3 de agua de mar al día, con una demanda biológica de oxígeno de 1000 mg/L , una producción de sólidos suspendidos totales de 15 g/L , con partículas de una densidad promedio de 1070 g/L .

Si la densidad del agua de mar es de 1034 kg/m^3 , su viscosidad es $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y el decantador debe atrapar partículas de un diámetro superior a $10 \text{ }\mu\text{m}$ se tiene que la velocidad de sedimentación de las partículas es de $0,178 \text{ cm/s}$.

Con esta información y además considerando el flujo de las partículas de interés, el caudal de proceso y el área de sección vertical del estanque decantador, se obtiene que la longitud de este debe ser de $1,4 \text{ m}$ de ambos decantadores. El ancho del decantador es de $10,5 \text{ m}$.

El ancho del estanque es muy grande, por lo que se estudia la opción de realizar modificaciones que permitan reducir sus dimensiones manteniendo las propiedades de decantación. Una buena opción es instalar un sistema de tabiques en su interior, las partículas cuando chocan con los tabiques pierden velocidad y decantan. El sistema contaría con dos tabiques de $1,2 \text{ m}$ de altura instalados verticalmente en el fondo del decantados con espacios iguales entre ellos. Esto hace que el área de sección vertical se puede reducir a un tercio del área del sistema sin tabiques. Manteniendo la misma altura se tiene que el ancho W del decantador es de $3,5 \text{ m}$.

En la siguiente tabla se presentan los datos y resultados de los anteriormente expuesto.

Tabla 5.8. Datos de cálculo del estanque de decantación.

Densidad de la partícula	(Kg/m ³)	1070
Densidad del agua de mar	(Kg/m ³)	1034
Viscosidad del liquido	(m ² /s)	0,0000011
Diámetro de partícula	(m)	0,00001
Velocidad de sedimentación	(m/s)	0,00178
Velocidad de la partícula	(m/s)	0,00170
Estanque decantador-acumulador		
Altura del decantador h	(m)	1,5
Ancho del decantador W	(m)	3,5
Longitud del decantador L	(m)	2,9

Luego del proceso de decantación-sedimentación se instalará un sistema de filtros que permita el atrapamiento de las partículas más finas, para ello se instala un filtro de camisa de 10 y 5 micrómetros, ello con el objetivo de optimizar el proceso de fotodegradación.

6. Análisis de las alternativas

Se realizará un análisis técnico y económico de las distintas alternativas consideradas como eficaces en la depuración de las aguas residuales y de los fangos o lodos generados en una planta de las características comentadas. El análisis se llevará a cabo de forma de poder comparar las distintas soluciones, las cuales fueron divididas en escenarios. Los escenarios 2,3,4 y 5 consideran el uso de energía solar (fotovoltaica y térmica) y biomasa como fuente de alimentación energética de los sistemas de tratamiento. Aunque existen otras formas de energía, como la energía eólica y geotérmica, en este trabajo de investigación no se evalúa su uso ya que el recurso eólico y geotérmico no es importante de esta región de Chile.

Escenario 1. Basado en lámparas UVc y Calentamiento eléctrico de lodos

La eliminación de la materia orgánica disuelta en el agua es degradada por acción de un sistema de fotorreactores iluminados con lámparas ultravioleta con longitud de onda lejana (200 – 280 nm), que es la longitud de onda que

tiene efectos de oxidación y de degradación sin la necesidad de catalizadores. Para que este sistema de fotorreactores funcione adecuadamente es necesario que el tratamiento primario sea muy eficiente, ya que el correcto funcionamiento de los fotorreactores es mayor cuanto más transparente sea el agua. La eliminación de la materia orgánica presente en los lodos generados es llevada a cabo por biorreactores anaeróbicos, que son lo que permiten la generación de gas natural, con alto porcentaje de gas metano.

Más adelante se explicará que para que los lodos puedan degradarse eficientemente es necesario que la temperatura del sistema sea mantenida a 35 °C, lo más establemente posible. En este escenario se propone el uso de un calentador eléctrico de inmersión de lodos. La idea es evaluar un sistema tradicional de calentamiento (calentador eléctrico) con uno solar para poder evaluar la conveniencia de ambos.

Escenario 2. Basado en Lámparas UVc y calentamiento solar de lodos

La eliminación de la materia orgánica disuelta sería degradada de la misma forma que en el escenario 1. En cambio, el calentamiento de lodos sería llevado a cabo a través de paneles solares planos, de esta forma el calentamiento del lodo, que tiene una finalidad de acondicionamiento previo al proceso de biodegradación se realizada a través de energía solar.

Escenario 3. Basado en ozonación y calentamiento solar de lodos.

La eliminación de la materia orgánica disuelta sería eliminada a través de un sistema de ozonación y el calentamiento de lodos llevado a cabo por calentador solar de lodos.

Escenario 4. Basado en fotocatalisis heterogénea y calentamiento solar de lodos.

El proceso de degradación de materia orgánica se lleva a cabo gracias la técnica de fotocatalisis heterogénea empleando luz UV artificial, donde nuevamente la eficiencia de este depende altamente de la del tratamiento primario, aunque en este caso, tal como lo indica el nombre del tratamiento, si se requiere la presencia de catalizadores. Los lodos serían degradados en un

biorreactor anaeróbico y los acondicionados por calentamiento a través de calentador solar de lodos.

Escenario 5. Basado en fotocátalisis solar y calentamiento solar de lodos.

La degradación de la materia orgánica disuelta se realizaría de forma similar a la descrita en el escenario 4 pero utilizando luz solar en lugar de lámparas UV, en el proceso denominado fotocátalisis heterogénea solar, que será explicado más adelante. El calentamiento de los lodos se propone realizar empleando paneles solares planos.

Estos cinco escenarios requieren de equipos que tienen una demanda de energía, la alimentación de energía puede estar a cargo de la red eléctrica, de sistemas fotovoltaicos, de grupos electrógenos y de biogas producido en el proceso de digestión anaeróbica. Los sistemas seleccionados en los escenarios descritos anteriormente, son los adecuados para una correcta eliminación de los contaminantes existentes el este tipo de aguas residuales, por lo que la evaluación se realizará desde un punto de vista económico, para analizar las ventajas que cada una de estas alternativas ofrecen.

10. Conclusiones

Existe la posibilidad de realizar un adecuado tratamiento de aguas residuales de la acuicultura mediante tecnologías que incorporen la energía solar, constituyendo una alternativa técnicamente viable a los procesos tradicionales de depuración y a las fuentes tradicionales de abastecimiento de energía.

Se puede realizar un importante uso de la energía solar desde un punto de vista del aprovechamiento de sus fotones en los procesos fotocatalíticos de tratamiento de aguas, como fuente de energía térmica para el calentamiento de los lodos, y como fuente de energía eléctrica mediante el uso de sistemas fotovoltaicos.

El biogas producido en el proceso de digestión anaeróbica del lodo es posible utilizarlo como un sistema de apoyo alternativo del proceso de pretratamiento por calentamiento, siendo así un sistema autónomo de producción de calor.

Los sistemas de tratamiento propuestos presentan consumos energéticos más elevados que el existente en la situación actual, debido a que requieren del uso de un mayor equipamiento, el cual consume más energía, sin embargo, logran ser más adecuados en términos de la calidad del agua que es posible obtener gracias a ellos.

Estos sistemas pueden ser abastecidos mediante el uso de la red eléctrica, grupos electrógenos, sistemas fotovoltaicos con o sin apoyo de sistemas auxiliares.

Cuando el abastecimiento de energía es obtenido gracias al uso de sistemas fotovoltaicos, existe un coste de inversión más elevado que el que se tiene si

se abastece energéticamente con red eléctrica o grupos electrógenos, aunque esto depende de las características del emplazamiento y de las condiciones del lugar, además, al utilizar este tipo de sistemas, se presenta la ventaja de estar utilizando una fuente de energía renovable, ambientalmente más benigna, ya que no emite gases de efecto invernadero y que no depende de la disponibilidad de energía eléctrica en el lugar o momento en que deba ser tratada el agua, lo cual da la posibilidad de instalar los sistemas de tratamiento de agua en sitios alejados de la red eléctrica.

Como alternativa de tratamiento de aguas y de lodos generados en la industria acuícola se recomienda la elección de escenario 5, el cual utiliza fotorreactores solares y captadores solares planos, ya que ambos sistemas presentan la ventaja de utilizar un recurso disponible en la zona del estudio, además es la alternativa presenta un menor consumo de electricidad.

La utilización de sistemas fotovoltaicos como fuente de abastecimiento de energía eléctrica actualmente es una alternativa económicamente más costosa, sin embargo las tendencias indican que los costes de inversión de estos sistemas serán más reducidos, por otro lado, el precio de la electricidad y de los combustibles presentan una tendencia al alza, como también las restricciones legales ambientales sobre las fuentes tradicionales de generación de energía serán más exigentes, por lo cual, aunque actualmente no es conveniente instalar sistemas fotovoltaicos en zonas donde existe energía eléctrica, en un futuro es muy probable que si lo sea.

11. Bibliografía

Blanco J., S. Malato, P. Fernández, D. Alarcón, W. Gernjak, M. Maldonado. 2009. Review of feasible solar energy applications to water processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13. 1437–1445.

Boye B., Brillas, E. Buso, A. Farina, G. Flox, C. y Giomo, M. Sandona, G., 2006. Electrochemical removal of gallic acid from aqueous solution. *Electrochim. Acta* 52 (1), 256–262.

Concha A., A. Andalaft y O. Farías. 2009. Coal Gasification for Power Generation: Analysis with Real Options Valuation. *Ingeniare*. 17. 347-359.

Chen P., K. Linden, D. Hinton, S. Kashiwada, E. Rosenfeldt y S. Kullman. 2006. Biological assessment of bisphenol A degradation in water following direct photolysis and UV advanced oxidation. *Chemosphere*. 65. 1094–1102.

Demirer G. y S. Chen. 2008. Anaerobic biogasification of undiluted dairy manure in leaching bed reactors. *Waste Management*. 28. 112–119.

Eltawil M., Z. Zhengming y L. Yuan. 2009. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13. 2245–2262.

Han F., V. Subba, M. Srinivasan, D. Rajarathnam y R. Naidu. 2009. Tailored titanium dioxide photocatalysts for the degradation of organic dyes in wastewater treatment: A review Review Article. *Applied Catalysis A: General*. 359. 25-40

Fernández-García A., E. Zarza, L. Valenzuela y M. Peérez. 2010. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy. Reviews*. 14. 1695–1721.

Figueroa S., L. Vázquez y A. Álvarez. 2009. Decolorizing textile wastewater with Fenton's reagent electrogenerated with a solar photovoltaic cell. *Water Research*. 43. 283–294.

Ghali F. 2009. Photovoltaic Small-Scale Wastewater Treatment Project for Rural and New-Cultivated Areas in Egypt. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 53.

Giraldo A., G. Peñuela, R. Torres. N. Pino, R. Palominos, H. Mansilla. 2010. Degradation of the antibiotic oxolinic acid by photocatalysis with TiO₂ in suspension. *Water Research*. 44. 152-167.

Herney J., M. Vicente y L. Madeira. 2010. Heterogeneous photo-Fenton oxidation with pillared clay-based catalysts for wastewater treatment: A review. *Applied Catalysis B: Environmental*. 98. 10-26.

Ibrahim A., M. Yusof, M. Hafidz, S. Mat y K. Opiari. 2001. Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. 352–365.

Karellas K., Terzis y D. Manolakos. 2011. Investigation of an autonomous hybrid solar thermal ORC-PV RO desalination system. The Chalki island case. *Renewable Energy*. 36. 583-590.

Kosmadakis G., D. Manolakos y G. Papadakis. 2010. Parametric theoretical study of a two-stage solar organic Rankine cycle for RO desalination. *Renewable Energy*. 35. 989–996.

Lawson T. 1994. *Fundamentals of Aquaculture Engineering*. Ed. Hardbound. 223 pp.

Li G., V. Puddu, H. Kit, A. Gora y B. Toepfer. 2010. Photocatalytic oxidation of multicomponent mixtures of estrogens (estrone (E1), 17 - estradiol (E2), 17 - ethynyl estradiol (EE2) and estriol (E3)) under UVA and UVC radiation: Photon absorption, quantum yields and rate constants independent of photon absorption. *Applied Catalysis B: Environmental*. 74. 46-56.

Liu S., T. Xie, Z. Chen y J. Wu. 2009. Highly active V–TiO₂ for photocatalytic degradation of methyl orange. *Applied Surface Science*. 255. 8587–8592.

Manolakos D., E. Mohamed, I. Karagiannis y G. Papadakis. 2008. Technical and economic comparison between PV-RO system and RO-Solar Rankine system. Case study: Thirasia island. *Desalination*. 221. 37-46.

Miller E. Review of water resources and desalination technologies. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories; 2004, 49 pp.

Monteith H., H Sahely., H. MacLean y H. Bagley. 2005. A rational procedure for estimation of greenhouse-gas emissions from municipal wastewater treatment plants *Water Environment Research*. 77. 390-403.

Ochiai T., K. Nakata, T. Murakami, A. Fujishima, Y. Yao, D. Tryk y Y. Kubota. 2010. Development of solar-driven electrochemical and photocatalytic water treatment system using a boron-doped diamond electrode and TiO₂ photocatalyst. *Water research*. 44. 904–910.

Ortiz J., E. Expósito, F. Gallud, V.García, V. Montiel y A. Aldaz. 2007. Electrodialysis of brackish water powered by photovoltaic energy without batteries: direct connection behavior. *Desalination*. 208. 89–100.

Oyama T., I. Yanagisawa, M. Takeuchi, T. Koike, N. Serpone y H. Hidaka. 2009. Remediation of simulated aquatic sites contaminated with recalcitrant substrates by TiO₂/ozonation under natural sunlight. *Applied Catalysis B: Environmental*. 91. 242–246.

Pye D. 2008. System Modelling of the Compact Linear Fresnel Reflector, University of New South Wales.

Richards L., B. Richards y A. Schafer. 2010. Renewable energy powered membrane technology: Salt and inorganic contaminant removal by

nanofiltration/reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2010.11.069.

Rossiter H., M. Grahamb y A. Schäfer. 2010. Impact of speciation on behaviour of uranium in a solar powered membrane system for treatment of brackish groundwater.

Separation and Purification Technology. 71. 89–96.

Salihoglu K., V. Pinarli y G. Salihoglu. 2007. Solar drying in sludge management in Turkey. *Renewable Energy* 32 (2007) 1661–1675.

Sarmiento P. 2008. Registro Solarimétrico. Irradiancia Solar en Territorios de la Republica de Chile. CNE. PNUD. UTFSM. 249 pp.

Sarria V, S. Kenfack, S. Malato, J. Blanco y C. Pulgarin. 2005. New helio-photocatalytic–photovoltaic hybrid system for simultaneous water decontamination and solar energy conversion. *Solar Energy*. 79. 353–359.

Seginer I., N. Mozes, O. Lahav. 2008. A design study on the optimal water refreshment rate in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*. 171–180.

Scrivani A., T. El Asmarb y U. Bardi. 2007. Solar trough concentration for fresh water production and waste water treatment. *Desalination*. 206. 485–493.

Serra A., X. Domenech, C. Arias, E. Brillas y J. Peral. 2009. Oxidation of *o*-methylphenylglycine under Fenton and electro-Fenton conditions in the dark and in the presence of solar light. *Applied Catalysis B: Environmental*. 89. 12–21.

Shawaqfeh A y F. Al Momani. 2010. Photocatalytic treatment of water soluble pesticide

by advanced oxidation technologies using UV light and solar energy. *Solar Energy*. 84. 1157–1165.

Slim , R., A. Zoughaib y D. Clodic. 2008. Modeling of a solar and heat pump sludge drying system. *International Journal of Refrigeration*. 31. 1156–1168.

Swenson R. 2005. The production peaks in petroleum and natural gas: information, misinformation, awareness, and implications. In: *Proceedings of the ISES 2005. solar world congress*.

Valero D., J. Ortiz, E. Expósito, V. Montiel y A. Aldaz. 2008. Electrocoagulation of a synthetic textile effluent powered by photovoltaic energy without batteries: Direct connection behavior. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 92. 291–297.

Vishnu G, S. Palanisamy y K. Joseph. 2008. Assessment of fieldscale zero liquid discharge treatment systems for recovery of water and salt from textile effluents. *Journal of Cleaner Production*. 16. 1081-1089.

Vivar M., I. Skryabin, V. Everett y A. Blakers. 2010. A concept of a hybrid solar water purification and photovoltaic system. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 94. 1772–1782.

Yiannopoulos A.m I. Manariotis y C. Chrysikopoulos. 2008. Design and analysis of a solar reactor for anaerobic wastewater treatment. *Bioresource Technology*. 99. 7742–7749.