



PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

ENERGY PRODUCTION FROM INDUSTRIAL WASTEWATER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

PRESENTADO POR:

Angie Katherin Santamaria Garcia

DIRIGIDO POR:

Dr. Pedro Letón García

Alcalá de Henares, a 06 de julio de 2020

AGRADECIMIENTOS

Sin duda la llegada hasta acá no ha sido solo por cuenta propia, por lo que quiero agradecer a todas esas personas que creyeron en mí y me apoyaron durante el desarrollo del Máster, quienes me dieron el ánimo y la fuerza para seguir a pesar de las circunstancias vividas durante este 2020.

En primer lugar, quiero agradecer al Doctor Pedro Letón García, por aceptar la dirección del presente trabajo, depositando en mí su confianza para llevar a cabo esto, quien estuvo guiándome de la manera más profesional y amigable, por sus palabras de ánimo en cada momento, hasta culminar con éxito este proyecto.

A mis padres, porque desde siempre han sido mi apoyo más grande, por su incondicionalidad que día a día me alentó a seguir mis sueños y no desfallecer, porque me han enseñado que a pesar de las adversidades puedo llegar tan alto como me lo proponga y gracias a su esfuerzo estoy aquí, tan lejos como he querido. Para Madi, porque más allá de ser mi hermana ha sido mi mejor amiga, mi apoyo incondicional en la vida, porque me inspira a ser cada día mejor, siendo mi ejemplo a seguir para sacar lo mejor de mí para brindarle a mi familia y el mundo.

Finalmente, a la Universidad de Alcalá y la Universidad Rey Juan Carlos, por permitirme ser parte de la comunidad universitaria, a todo el cuerpo docente del Máster, así como a la Dirección de este por su constante apoyo durante este periodo académico, porque sin duda este año marcará un precedente para todos.

ÍNDICE

RESUMEN	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .	9
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	19
3.1. Objetivo General.....	19
3.2. Objetivos específicos	19
4. METODOLOGÍA.....	20
5. RESULTADOS	24
5.1. ESTUDIOS RELACIONADOS A LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES	24
5.1.1. Investigaciones empíricas	24
5.1.2. Investigaciones tecnológicas	26
5.1.3. Otras metodologías	26
5.2. PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES.....	28
5.2.1. Procedimientos basados en el uso de celdas de combustible microbiana	28
5.2.2. Procedimientos de producción de energía a partir de biogás.....	30
5.2.3. Procedimientos de producción de energía a partir pilas de combustible.....	31
5.2.4. Procedimiento de producción de energía a partir de humedales artificiales.....	32
5.2.5. Procedimiento de producción de energía a partir de la digestión anaerobia	33
5.2.6. Otros procedimientos.....	36
5.3. VENTAJAS Y LAS DESVENTAJAS ASOCIADAS A CADA MÉTODO DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES.....	44
5.3.1. Celdas de combustible microbiana	44
5.3.2. Humedales artificiales	47

5.3.3. Digestión anaerobia	47
5.3.4. Producción de energía a partir de la conversión de hidrógeno	48
6. CONCLUSIONES	49
7. BIBLIOGRAFÍA	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una economía circular.....	14
Figura 2. Celdas de combustible microbiana.	29
Figura 3. Celdas de combustible microbiana de doble cámara.	30
Figura 4. Procedimiento de tratamiento de aguas residuales con pilas microbianas.....	32
Figura 5. Estructura de un humedal artificial.	33
Figura 6. Proceso de digestión anaerobia.	34
Figura 7. Tratamiento para aguas residuales basado en biodigestión anaeróbica de lodos.	36
Figura 8. Métodos anaeróbicos de depuración.	37
Figura 9. Tratamiento de las aguas residuales para obtener lodo residual.	39
Figura 10. Proceso de secado del lodo residual.....	39
Figura 11. Proceso para obtener hidrógeno en una celda de electrolisis.....	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los humedales.	47
Tabla 2. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia.	48

ABREVIATURAS

ACV: Análisis del Ciclo de Vida

CCMs: Celdas de Combustible Microbiana

CDTI: Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

DA: Digestión Anaerobia

DQO: Demanda Química de Oxígeno

EGSB: Expanded Granular Sludge Bed Digestion

FNCE: Fuentes no Convencionales de Energía

km: Kilómetros

kW: Kilovatio

MFC: Celdas de Combustible Microbiana

MW: Megavatio

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PBM: Viabilidad de Biometanización

PTAR: Plantas para el tratamiento de aguas residuales

RAFA: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

SIAC: Sistema de Información Ambiental de Colombia

SIC: Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia

STAR: Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

RESUMEN

El presente estudio se fundamenta en la búsqueda de procedimientos que permitan depurar el agua residual y utilizar los subproductos derivados de este proceso como una alternativa sostenible para generar energía. En ese sentido se planteó como objetivo general analizar los procesos de obtención de energía a partir de aguas residuales por medio de una revisión sistemática de la literatura. Esta investigación se desarrolla a partir de un enfoque de investigación cualitativo, el cual consiste en la recolección y análisis de datos para dar respuesta a una pregunta de investigación.

La revisión sistemática de literatura estuvo compuesta de cinco fases que se llevaron a cabo de manera casi secuencial. En cuanto al alcance, se trata de una investigación analítica. Los resultados alcanzados ponen en evidencia que hay un marcado interés por indagar y profundizar en los procedimientos para tratar el agua residual, no obstante, los estudios cuantitativos experimentales presentaron una mayor tendencia. En cuanto a los procedimientos utilizados para producir electricidad se encontró una diversidad de sistemas, entre los que destacaron las celdas de combustible microbiana, las pilas de combustible, los humedales artificiales, el lodo residual, el uso de metano, la conversión de hidrógeno, la digestión anaerobia, presentando cada uno de ellos ventajas y desventajas para la implementación.

Las conclusiones denotan amplitud y diversidad de investigación empíricas que sirven de base para continuar optimizando los mecanismos existentes e indagar en nuevas propuestas, pues aún y cuando se encontró un marcado avance tecnológico en esta materia es importante continuar avanzando.

Palabras clave: Aguas residuales industriales, producción de energía, sistemas de tratamiento de aguas residuales.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El agua es uno de los recursos más abundante y valioso para los seres vivos, en especial para el ser humano. Dicho recurso es usado en grandes cantidades por el hombre para cubrir sus distintas necesidades, ya sea a nivel doméstico, agrícola, industrial, entre otros. De acuerdo con ello, Fernández y col, (2010), mencionan que, el 59% del agua que se consume en países desarrollados es destinado a este último, es decir, que más de la mitad del recurso hídrico es utilizado por las grandes industrias, estableciendo de esta forma, una primera contradicción en el acceso a la misma, pues solo el 11% es empleado para el gasto en los hogares del mundo. El primer informe de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), denominado, Agua para todos, Agua para la vida, realizado en marzo de 2003, profundizó sobre el uso de los recursos hídricos en el mundo.

En el mencionado documento, se estableció que para el 2025 el agua que será destinada para uso industrial será de 1.170 km³ por año, una diferencia notoria si lo comparamos con la cantidad documentada para el año 1995, fecha en el que el consumo se situó en 752 km³ por año. La problemática que nos muestra esto, radica en que este sector, el industrial, es el que más contamina el recurso hídrico, entendiéndose entonces que al gastar una cantidad mayor de agua se incrementará del mismo modo la contaminación sobre ella. Para hacernos una idea, es importante tener en cuenta que cerca de un 80% de los desechos nocivos para la humanidad se producen en países industrializados y el 70% en territorios en vía de desarrollo. La contaminación se presenta cuando las fábricas vierten el agua sobre afluentes hídricos sin tener ningún tipo de tratamiento previo.

De esta forma es imperativo resaltar la responsabilidad social que deben tener las industrias, teniendo en cuenta su grado de participación en la generación de residuos y materiales contaminantes que son arrojados sobre ecosistemas y hábitats naturales; sería este un primer paso para establecer procedimientos que se encuentren más acordes con el uso adecuado de las fuentes hídricas. Son las industrias las encargadas de establecer contingencias en el uso adecuado del agua, aún más si se comprende que un desempeño correcto, podrá significar a largo plazo la reutilización de recursos ambientales en proceso tales como la producción de energía.

La gran cantidad de emisiones de residuos, materiales, sustancias y otros contaminantes que afectan la calidad y pureza del agua, resultan un problema a nivel mundial. Esto sucede, como se ha expuesto, porque es uno de los recursos que el ser humano descuida, afecta y desperdicia por su aparente abundancia, fácil acceso, en muchas regiones, y brevedad en ser desechada. Inclusive, su utilización, almacenamiento y/o tratamiento inadecuado implica riesgo de salubridad, de conservación del recurso y otros, de manera que se produce un cambio constante y negativo en el ambiente (Muñoz, 2008).

Frente a esto Fernández y col (2010), señalan que al profundizar en las cuestiones éticas sobre el agua, debe reconocerse esta, como un derecho y un deber social, sobre la cual recae un alto grado de valor económico, social, ambiental y cultural; en ese sentido es responsabilidad tanto del ciudadano como de las industrias, en primer lugar tomar conciencia de que el agua dulce es un recurso natural y que con el tiempo se ha convertido en un recurso finito, por ende su uso no solo está determinado por valores y estándares económicos, sino que, de su pureza en la naturaleza, depende la evolución y calidad de los diferentes hábitats en el mundo. En segunda medida las industrias y los ciudadanos (representados por el Estado), deben construir planes y proyectos que sean amigables con el medio ambiente y que permitan una relación circular, amigable y coherente para el cuidado de este y de su recurso más importante: el agua. La relevancia que recae sobre el papel que desempeñan las industrias en términos de progreso en los países desarrollados y en vía de desarrollo, no puede acaparar la función planificadora sobre la protección del medio ambiente en nuestro planeta.

Según Lahera (2010) las ciudades (viviendas, comercios, servicios e industrias) enfrentan hoy por hoy una problemática fundamentada en su relación con el agua. La obtención de fuentes hídricas que sean aptas para el consumo y uso del ser humano se hace cada vez más complejo y tortuoso, esta dinámica se presenta, principalmente porque existe un incremento constante y exponencial de la población, la cual en muchos lugares del mundo coloniza territorios en donde por ejemplo el uso del agua está determinado para un número establecido de habitantes, al superar esta medida, el agua tiende a limitarse y en algunos casos a ausentarse, en otras palabras sube la demanda mientras la oferta continua siendo la misma y al contrario de lo que se creía, el recurso hídrico empieza a disminuir.

Por otro lado, en los centros urbanos el desperdicio del agua es constante, esto se presenta porque en las ciudades, a pesar de las dificultades, el suministro de agua se interrumpe muy rara vez, lo que hace que su población no contemple el agotamiento del recurso hídrico, lo que genera el señalado desperdicio. Cabe mencionar que las grandes urbes cuentan con complejos recursos hídricos, por esta razón su servicio en los hogares es constante.

Finalmente, el agua que es utilizada se deposita en el drenaje, donde limpia o contaminada pierde todas sus propiedades y termina convirtiéndose en líquido desperdiciado. La tarea entonces, además de concientizar a las personas sobre el uso racional del recurso, está relacionada con la ejecución de planes y proyectos que permitan que el agua pueda reincorporarse útilmente a la prestación de un servicio para las comunidades que más lo requieran, en este sentido se fundamenta el análisis sobre los procesos de obtención de energía a partir de aguas residuales.

La acción que han optado los seres humanos de usar el agua como medio para los desechos ha dado el surgimiento del término aguas residuales. Estas son aguas que han sido contaminadas con una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos y es posible clasificarlas según la procedencia del agente contaminante: drenaje, esorrentía, doméstica, industriales y agrarias. En este sentido podría pensarse que las aguas residuales se comportan como un mal necesario, sobre todo en países altamente industrializados, en donde, como ya hemos planteado, es un material determinante para el desempeño de las fábricas, sin embargo, Fernández y col. (2010) plantean que sobre este tipo de aguas, debe existir un adecuado tratamiento que posibilite la generación de programas basados en la reutilización de la misma sobre diferentes usos, los cuales contribuyan a un consumo responsable y sostenible del agua por parte de las industrias, devolviendo en un alto grado este recurso al dominio público y de los ecosistemas, entiendo que si bien es un recurso imperativo para el desarrollo de las industrias, lo es en el mismo sentido y aún más importante para diferentes especies dentro de las cuales encontramos al ser humano.

Arias (2005) establece que debemos ser conscientes que el crecimiento demográfico en un determinado territorio, posibilita el incremento en la generación de aguas residuales, es una situación que se describe como un fenómeno intrínseco a la realidad humana, sin embargo, esta situación debe llevarnos a establecer, que si bien la problemática se encuentra lejos de desaparecer, la interacción entre las ciencias para encontrar y aplicar alternativas al

tratamiento de este tipo de aguas, pueda significar una luz en la oscuridad, permitiendo que las aguas residuales puedan desarrollar otros procedimientos al servicio de las personas y no terminen su vida útil vertiéndose en drenajes, cuando cuentan con la facultad para por ejemplo inmiscuirse con la generación de energía.

De esta forma es necesario poner en consideraciones los impactos generados por la contaminación del agua. Así pues, se pueden identificar tres tipos de impacto: directo, indirecto y estético (Pistonesi y col. 2010). Por un lado, el impacto directo consiste en la transmisión de enfermedades por medio del consumo o contacto con el agua, ya sea en situaciones de recreación, uso en alimentos, cercanía a fuentes contaminadas, entre otros; las fuentes hídricas que contienen sólidos suspendidos o disueltos (materias orgánicas e inorgánicas, nutrientes, aceites y grasas, sustancias tóxicas, y microorganismos patógenos); los desechos humanos sin un tratamiento adecuado que pueden ser origen de infecciones parasitarias, hepatitis y diversas enfermedades, principalmente, gastrointestinales; incluso, las aguas lluvias pueden tener los contaminantes mencionados en altas concentraciones.

Por otro lado, el impacto indirecto sucede cuando las aguas residuales son recolectadas, mas no tratadas correctamente convirtiéndose en un problema de salud pública; la descarga de estas aguas en otras fuentes puede implicar otros peligros como el daño al hábitat de la vida acuática y marina, la afectación de organismos acuáticos y marinos por sustancias tóxicas, la disminución de producción de oxígeno por la descomposición de materia orgánica, afectación de agua y suelo haciendo un daño a la vegetación y otras fuentes de alimento del ser humano y otros animales, como los peces; entre otros. Por último, el impacto estético es notorio en cuanto al deterioro de la vegetación y la imposibilidad de apreciarlo o darle un fin decorativo o recreativo.

No obstante, los diversos estudios e investigaciones sociales, científicas, tecnológicas, entre otros, han cambiado la oscura perspectiva del panorama proponiendo el aprovechamiento de las aguas residuales previo a recibir un tratamiento o sin necesidad de realizarlo. En razón de esto señala Aguilar y Blanco (2018) que, en el Informe Mundial sobre Desarrollo de los Recursos Hídricos desarrollado en el 2017 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), se estableció que la responsabilidad sobre una mejor gestión de aguas residuales no solo puede clasificarse en la eliminación de elementos nocivos para la reutilización, al contrario, se hace necesario el aprovechamiento

de las aguas tratadas, recuperándolas y clasificándolas en subproductos, los cuales puedan ser destinados a diferentes propósitos.

De este modo García (2017) plantea la necesidad de planificar y desarrollar tecnologías que permitan irrumpir en la crisis ambiental y civilizatoria por la que estamos atravesando, en donde la relación determinada entre el hombre y medio, se mide desde parámetros críticos y éticos, por lo cual, deben idearse formas alternativas que fundamenten otra forma de producir mercancía, bienes de servicio, productos de primera necesidad, energía, entre otros. Estas nuevas formas siguen estando centradas en el uso de los recursos naturales, sin embargo, orientadas por ejemplo a tener la capacidad de operar con combustibles no convencionales o diferentes a la extracción de minerales y petróleo.

En este sentido Lett (2014), propone consecuentemente, con el desarrollo conceptual del presente trabajo, la llamada *energía circular*, este concepto se asienta sobre los principios de la escuela ecologista, mejorando la propuesta contemporánea de “reducir, reutilizar y reciclar”, lo que dinamice una disminución mucho más efectiva del impacto causado por las actividades humanas e industriales sobre el medio ambiente. Por lo tanto, este proyecto se sustenta en la reutilización del desperdicio, volcando este proceso a un modelo cíclico que lo involucra directamente dentro del proceso natural de conservación. De este modo el material considerado como residuo toma una distancia de su proceso final de producción y se convierte en la materia prima de otros procesos orgánicos, tecnológicos o industriales, con lo cual se crean nuevos productos, disminuyendo de esta manera el gasto energético involucrado en su producción.

En la Figura 1 expuesta a continuación, se expone un modelo de economía circular, centrado principalmente en los principios de preservación, optimización y fomento de la eficiencia un determinado sistema, dándole una máxima utilidad a todos los ciclos involucrados en el proceso un modelo de producción. De este modo se minimizan las pérdidas y externalidades negativas de la fabricación de productos.

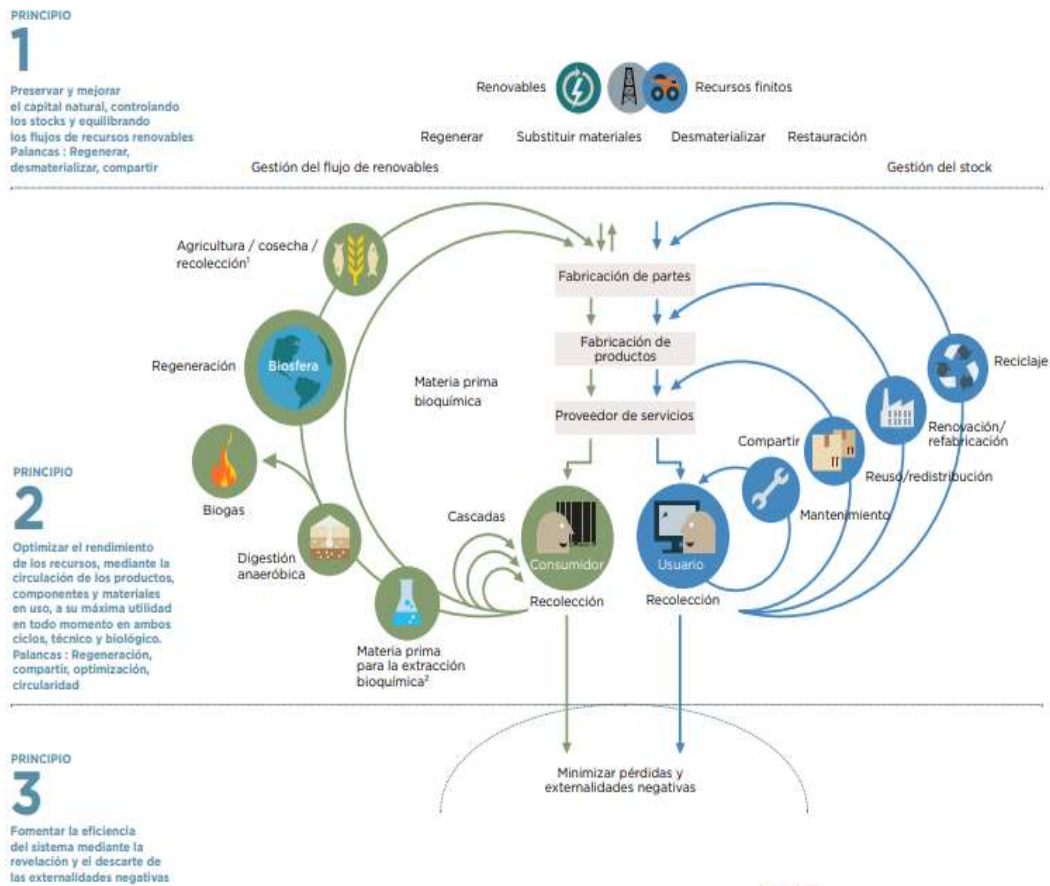


Figura 1. Esquema de una economía circular. (Tomado de Ellen MacArthur Foundation, 2020)

Por esta razón la formulación principal de esta revisión bibliográfica nos permitirá identificar esas otras propuestas alternativas, con lo cual lograremos establecer su pertinencia en términos prácticos. Todo esto encaminado a identificar, en el uso adecuado, las herramientas que nos brinda el medio natural para poder subsistir.

A partir de lo expuesto, se considera necesario identificar, reflexionar y analizar, desde una postura crítica y una revisión de la literatura, los distintos procesos usados en la actualidad para la obtención de energía a partir de aguas residuales, que según Pistonesi y col. (2010) van desde el biogás, pasando por la climatización con calor constante del agua y la generación de electricidad a partir de las bacterias de los residuos, finalizando en la actividad más conocida, la cual corresponde a su uso con aguas residuales. Estos autores también señalan que este procedimiento basado en la obtención de energía a partir de aguas residuales

genera un ahorro del costo de la energía para las industrias, estableciendo la conservación desde un 25% al 50% del presupuesto operativo de una empresa, lo que refleja a grandes rasgos, no solo los beneficios ambientales sino también económicos que representa el uso de estos procedimientos para la obtención de energía a través del uso adecuado de las aguas residuales.

De igual forma Acosta y Pasqualino (2014) señalan que el mundo tal y como lo conocemos, asiste a una revolución energética, la cual marca el futuro cercano de una nueva forma de abastecimiento eléctrico y que se enmarca en dos grandes metas; por un lado, la adquisición de un suministro descentralizado, es decir, que la regulación del servicio ya no esté mediado por un aparato central, teniendo en cuenta que los lugares más apartados de las grandes urbes, son los que mayoritariamente presentan un déficit del servicio. La construcción de centros energéticos administrados por los mismos territorios fortalece la obtención del servicio en estas comunidades. La segunda meta que desarrollan los autores está relacionada con la forma en la que se obtiene la energía, en ese sentido se pretende sustituir las fuentes energéticas basadas en el carbón fósil, por otro tipo de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), dentro de las cuales se encuentran las obtenidas de las aguas residuales.

Por estas razones, es preciso plantear la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los procesos de obtención de energía a partir de aguas residuales reportados en la literatura?

2. JUSTIFICACIÓN

El agua vista como un recurso preponderante para el cuidado, beneficio y prolongación de la humanidad como la conocemos, debe ser pensada desde la aplicación de comportamientos y políticas ciudadanas, que fortalezcan el consumo adecuado de la misma, sin que esto involucre, por ejemplo, arriesgar su existencia; al respecto Quesada y col (2018), señalan que el consumo racional del recurso hídrico, permite a una sociedad sostenerse y perdurar en un tiempo indefinido, sin alterar la integridad de procesos como los ciclos del agua y los ecosistemas que dependen de ella.

Sin embargo, la Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia (SIC), en su Boletín Tecnológico sobre el Tratamiento de Aguas Residuales (2014), señaló que una vez el ser humano tiene contacto con el agua se genera un producto que es residual, mientras esta relación sea mayor, es decir, se manifieste con grandes conglomerados, ciudades, países, fábricas o industrias, el nivel residual crece exponencialmente, estas aguas residuales, en su camino a convertirse en desechos, terminan en cuerpos receptores de agua, tales como quebradas, ríos, mares y océanos, lo cual afecta directamente a los ecosistemas y las especies que utilizan también este recurso.

En Colombia, por ejemplo, las aguas depositadas en las quebradas y ríos que nutren el río Bogotá, transportan una gran cantidad de residuos que produce la población de la ciudad; a su vez el río Bogotá, nutre al río Magdalena, el cual atraviesa 11 departamentos del país, la mayoría de las personas que habitan esos departamentos utilizan esta misma agua para su consumo diario, alimentándose de aguas que están gradualmente contaminadas, pero sobre las cuales serán arrojados una cantidad mayor de desperdicios, hasta su desembocadura en el Mar Caribe. El Boletín Tecnológico sobre el Tratamiento de Aguas Residuales reseñado anteriormente menciona que según el SIAC, en Colombia, el 96% de las aguas residuales que se generan los hogares o industrias, no son tratadas, lo que significa una problemática que solo puede describirse como un impresionante daño ambiental que afecta directamente las condiciones de la calidad de vida, no solo de los colombianos, sino de toda la región latinoamericana y finalmente de la población mundial.

Este proceso descrito se desarrolla a lo largo del mundo, el acceso y el uso del agua se convierte en un fenómeno que debe ser revaluado y problematizado, pues al no establecer

métodos responsables frente a su uso podría significar, poner en riesgo el ecosistema de muchas de las especies que conocemos hoy en día. Fernández y col (2010) señalan que estas apreciaciones, sumadas a los datos que se tienen sobre a la mala utilización de las aguas residuales en el mundo, crean una idea sobre la importancia de establecer planes y programas sobre el tratamiento y la reutilización de este recurso hídrico, problematizando sobre todo las acciones que puedan crearse desde el sector industrial. Generar estos planes de tratamientos de aguas residuales y su posterior reutilización en múltiples usos, se convierte en la punta de lanza para establecer un consumo sostenible de los recursos hídricos.

En ese sentido la presente revisión bibliográfica cobra especial relevancia, pues abre la puerta a la posibilidad de establecer mecanismos que permitan reevaluar la relación entre el hombre y la naturaleza, centrando mayor atención sobre la importancia del uso responsable del recurso hídrico. Por esta razón, surge la necesidad de realizar una juiciosa exploración sobre los diferentes avances que existen hoy en día en términos del uso de aguas residuales en los procesos de obtención de energía.

Los distintos avances desarrollados en cuanto a la obtención de energía a partir de los contaminantes orgánicos del agua residual, particularmente, sobre espacios industriales, contribuyen a generar nuevo conocimiento sobre la decantación de alternativas para el uso de este recurso y la posibilidad simultanea de la producción de energía, logrando una eliminación de aguas que puedan estar contaminadas. Revelo y col. (2013) centran la atención sobre procesos de biorremediación que logran utilizar diferentes microorganismos para limpiar ecosistemas de materiales contaminantes a los que han sido expuestos, logrando así transformarlos a su condición natural.

Lo anterior es una muestra de las posibilidades que existen para determinar cómo procesos biológicos y académicos pueden aportar a transformaciones de índole social, planteando alternativas para el cuidado y la reutilización de recursos hídricos, brindado a su vez oportunidades aprovechables para que las comunidades puedan aplicarlas en su contexto inmediato, estableciendo de esta forma nuevas formas de relacionamiento entre el hombre y la naturaleza.

El análisis que se desarrollará en la presente revisión bibliográfica nos permitirá identificar casos y experiencias basados en procesos de transformación de aguas residuales en energía

eléctrica, estableciendo de esta manera alternativas palpables sobre la necesidad de construir escenarios biológicos y químicos que posibiliten el cuidado responsable del agua, en ese sentido la presente revisión bibliográfica brindará resultados útiles no solo a la comunidad académica y las industrias, sino principalmente a las naciones y poblaciones que marcan un alto índice en términos del mal uso de las aguas residuales, fenómeno que actualmente ha tomado mayor preponderancia, entendiéndose que el mundo se industrializa con mayor rapidez hoy en día en relación a décadas anteriores y que es momento para tomar cartas en el asunto ambiental.

El análisis sobre los procesos de obtención de energía a partir de aguas residuales por medio de una revisión sistemática de la literatura involucra una mirada hacia adelante, una en la que pueda establecerse de la mejor forma posible, herramientas procedimentales que involucren un estudio detallado sobre los comportamientos que se desarrollan en torno a la reutilización de materiales y recursos que utiliza el ser humano en su diario vivir; la revisión bibliográfica, que será abordada en este trabajo, nos permitirá reconocer algunos de estos factores e invitar a la comunidad científica a que se involucre en metodologías basadas en la reutilización de los recursos, en este caso, del agua, entendiéndola como un recurso que se creía infinito pero que hoy se hace cada vez más difícil de obtener. Se espera que las investigaciones relacionadas y revisadas, al igual que esta, pretendan vislumbrar nuevas formas de relacionamiento entre el hombre y los ambientes que lo rodean, estableciendo principios de reacomodación utilitaria, con lo cual se podrán determinar otras oportunidades que nos ofrecen los recursos que utilizamos a diario.

El agua es un recurso limitado y renovable. Renovable porque la cantidad de agua que se encuentra circulando continuamente por el ciclo hidrológico es constante, y limitado porque su disponibilidad en forma de agua dulce y líquida no está distribuida equitativamente por el globo (Orozco y col., 2005).

La distribución y el flujo de los sedimentos disueltos en entornos costeros es muy variable tanto a escala temporal como espacial. Esta variabilidad hace que la mayoría de los métodos tradicionales de muestreo para estudiar la dinámica de sedimentos en aguas costeras sean inadecuados o demasiado complejos (Miller y Cruise, 1995). Debido a ello, existe un interés considerable en el uso de datos obtenidos por teledetección para proporcionar información sobre los sedimentos en suspensión en aguas costeras, entre otros.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Analizar los procesos de obtención de energía a partir de aguas residuales por medio de una revisión sistemática de la literatura.

3.2. Objetivos específicos

- Clasificar los estudios que se han adelantado en relación con la obtención de energía a partir de aguas residuales.
- Determinar cuáles son los procedimientos utilizados para la obtención de energía a partir de aguas residuales por medio de una revisión sistemática de la literatura.
- Contrastar las ventajas y las desventajas asociadas a cada método de obtención de energía a partir de aguas residuales.

4. METODOLOGÍA

Esta investigación se desarrolla a partir de un enfoque de investigación cualitativo, el cual consiste en la recolección y análisis de datos para dar respuesta a una pregunta de investigación. Dichos datos no se encuentran estandarizados ni predeterminados, sino que consisten en puntos de vista, experiencias, observaciones, entre otros. Con este enfoque, no se pretende dar una solución definitiva a un problema, sino permitir el entendimiento de un fenómeno de estudio (Hernández y col., 2014).

La aplicación del enfoque cualitativo nos permitirá puntualizar sobre la problemática que se desea abordar y alcanzar los objetivos planteados, la investigación estará basada en una completa revisión bibliográfica, estudio de documentos de análisis y un correspondiente mapeo de actores, además de revisar los principales aportes que existen sobre los procesos de obtención de energía a partir de aguas residuales.

De acuerdo con Hernández y col. (2014), este enfoque es utilizado cuando el propósito de la investigación es analizar la forma en la que los individuos perciben y experimentan los fenómenos que le rodean, considerando los puntos de vista y significados. En este sentido Salgado (2007) plantea como punta de lanza de la exploración cualitativa el elemento de la intersubjetividad, pues es ella quien permite reflexionar críticamente sobre las consideraciones de socialización que se desarrollan en el marco de una investigación en donde los análisis de resultados deben estar orientados a mostrarnos los fenómenos sociales que están presentes en el tipo de estudio desarrollado.

El análisis que se genere de la integración entre los conocimientos del investigador y los resultados dados por los participantes son claves en este tipo de exploración. Salgado (2007) señala que en términos generales la investigación cualitativa, mantiene una estructura flexible y abierta, por lo cual, la dinámica exploratoria se sustenta determinante sobre los conceptos y preceptos que se sostienen sobre los participantes; en ese sentido, los escenarios investigativos se desarrollan en torno a la subjetividad de los individuos.

Teniendo claro esto y centrándonos en la naturaleza del estudio, se desarrollará una intensiva revisión de la literatura para detectar, consultar y obtener bibliografía y materiales útiles para

reconocer conceptos clave, resultados de interés, categorías relevantes, entre otros, y para profundizar en el tema a ser analizado (Hernández y col., 2014).

Para Gómez y col. (2014) la revisión bibliográfica se establece como la principal etapa en un proyecto investigativo, pues es el espacio donde se filtra y decanta toda la información relevante al objeto de estudio; los campos investigativos pueden abarcar un sinnúmero de estudios que pueden desbordar al investigador e inhibirlo cuando pretenda avanzar en procesos de agrupamiento analítico, por ejemplo. De esta forma es imperativo establecer factores de incidencia del proyecto al igual que claridades procedimentales y metodológicas para tener en el horizonte un solo campo investigativo, lo cual posibilite la obtención de mejores resultados y conclusiones.

Las fuentes para su realización pueden ser primarias (información publicada por primera vez), secundarias (información primaria sintetizada y reorganizada) y/o terciarias (información sobre las fuentes secundarias, sirven a modo de referencia bibliográfica). Según, Hernández y col. (2014), la revisión sistemática de literatura se compone de cinco fases que deben ser llevadas a cabo de manera casi secuencial: la revisión, la detección, la consulta, la extracción y recopilación y, por último, la integración. Se tendrán en cuenta los siguientes criterios de selección: estudios con una antigüedad máxima de ocho (8) años, fuentes primarias y secundarias, proyectos y estudios realizados por instituciones reconocidas, artículos publicados en revistas indexadas, los cuales serán tomados de repositorios universitarios del nivel de posgrado y bases de datos, tales como *Access Engineering*, *Ambientalex Info*, *Scopus*, *Scielo*, entre otras.

Por último, el alcance más adecuado para esta investigación es el analítico. Esto quiere decir que el resultado es la emisión de un juicio de acuerdo con el fenómeno estudiado siguiendo unos criterios de análisis, por lo cual es necesario realizar una reinterpretación de los datos recolectados según los objetivos a cumplir (Hurtado de Barrera, 2008). Debido a la naturaleza y el enfoque del estudio en cuestión, no serán realizadas actividades de campo ni pruebas experimentales, por el contrario, se trabajará a partir de una minuciosa revisión de la literatura.

Frente al alcance analítico, Quecedo y Castaño (2002), señalan que un proceso investigativo permite descubrir diferentes elementos o categorías que pueden ser observadas desde un

proceso de abstracción en que las categorías analíticas van mostrando y revelándose en el transcurso de la observación y la descripción del fenómeno investigado, en este sentido la revisión bibliográfica que se presente, estará mediada por un análisis funcional que trabajará en aras de cumplir con los objetivos planteados.

Gil (1994) en Quecedo y Castaño (2002) señala algunos criterios que deben tenerse en cuenta para lograr alcances analíticos en el campo investigativo: Agrupamiento: Los datos recogidos en la investigación cualitativa no pueden presentarse como aislados. Recuento: Este planteamiento, recurre también al agrupamiento de determinadas afinidades, las cuales pueden ser por ejemplo de identidad, funcionabilidad, similitud, equivalencia, entre otros. Pasar de lo particular a lo general: En el momento en el que el proceso investigativo nos permita obtener y lanzar juicios analíticos y/o conclusiones es necesario pasar de hipótesis empíricas a niveles mucho más abstractos, estableciendo categorías de análisis. Inclusión: Es un proceso que se caracteriza por la categorización y la inserción de entidades que describen propiamente como funciona un hecho o una circunstancia.

Además de lo anterior expuesto, se establecen principios de organización de la información obtenida, los cuales se plantean de la siguiente manera. Subordinación: Este planteamiento señala puntualmente la posibilidad de generar procesos de jerarquización en la proyección investigativa. Ordenación: Supone establecer diferentes elementos que permitan la clasificación de las diferentes fuentes consultadas. Coocurrencia: En un margen hipotético, supone la aparición simultánea de dos elementos iguales y útiles para el proceso investigativo, lo que debe establecerse es el tipo de relación que existe en esta igualdad. Covariación: Implica una vinculación de elementos entre diferentes categorías mucho más generales que las desarrolladas en el proceso agrupamiento y puede significar un relacionamiento mucho más estructurado. Causalidad: Problematiza fenómenos relacionados con la causa y el efecto, en este ítem se existen determinaciones hipotéticas que señalan diferentes vertientes del problema, lo que permite tener una visión más amplia del trabajo investigativo propuesto.

Del mismo modo con referencia al espectro analítico de los alcances de la investigación, señalan Hernández y col. (2014) que este tiene una directa relación con el tipo de diseño y estrategia que son escogidos para el desarrollo de los procedimientos con los cuales se espera abordar la investigación, es decir, que para poder implementar un análisis más efectivo se

hace necesario concretar el enfoque que se le pretende dar a los datos originales que se han recogido. En los métodos de investigación cualitativos, la diversidad analítica cobra vital importancia, pues permite establecer diferentes visiones e interpretaciones.

Salgado (2007) siguiendo a Taylor y Bogdan (1990), señala que el análisis en los procesos de investigación debe presentarse con el objetivo de identificar un mayor grado de comprensión de los escenarios que van a estudiarse y que este proceso debe abarcar tres momentos:

- Descubrimiento: Este escenario está relacionado con el análisis y la comparación documental, con lo cual se pueden construir diferentes formas para abordar el tema a investigar.
- Codificación: Este momento indica la unificación de temas, ideas y conceptos, en ese sentido, es necesario desarrollar categorías e implementar matrices analíticas de los fenómenos investigados.
- Relativización: Es allí donde la interpretación del investigador cobra vida y se hace relevante, estableciendo preguntas e hipótesis que tengan como base la recolección de análisis implementada en los dos momentos anteriores a este.

5. RESULTADOS

El presente apartado hace referencia al análisis de las fuentes bibliográficas consultada, como base fundamental para apoyar el desarrollo de la investigación. En este sentido, a través de una exploración sistemática se muestran los hallazgos de una manera cualitativa, resaltando todos aquellos aspectos que afianzan el conocimiento sobre el tema desarrollado y partiendo de los objetivos de investigación propuestos, tal como presentan seguidamente:

5.1. ESTUDIOS RELACIONADOS A LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES

En los últimos años ha surgido un marcado interés por indagar sobre el tratamiento de las aguas residuales para obtener energía limpia y mitigar de algún modo el impacto ambiental y de salud que el manejo inadecuado de las mismas ha venido causando a nivel global. Si bien es cierto que las aguas residuales traen consigo una gama de afecciones, no menos cierto es el hecho que puede convertirse en un recurso idóneo para paliar la crisis energética actual. Siendo, así las cosas, a través de la revisión de un conjunto de investigaciones se determinó la existencia de algunas investigaciones, entre las cuales pueden mencionarse:

5.1.1. Investigaciones empíricas

Dentro este grupo se evidencian estudios como el presentado por Cadavid, L. (2012) quien a través de un estudio cuantitativo del tipo experimental, demostró que los elementos contenidos en las aguas residuales pueden ser de gran utilidad en la obtención de energía renovable en “forma de metano”, en esa dirección, hace énfasis en el uso de la investigación holística para integrar las tecnologías, el ambiente y el contexto social para tratar adecuadamente las aguas residuales y aprovechar las bondades que puede otorgar al ambiente y a la sociedad.

En esa misma dirección, Insignares (2013) estudió el potencial de producción de biomasa para la generación de energía a partir de sistemas de tratamiento de aguas residuales con base a humedales artificiales de medio suspendido. El mismo parte de un enfoque cuantitativo, con diseño experimental y se fundamenta en el modelo “Natural Systems for Waste Management and Treatment” propuesto por Reed en 1995. A través de esta

investigación se evidenció que la capacidad de la lenteja de agua para generar biomasa es significativamente alta, respecto a otros tipos de cultivos. No obstante, a nivel energético se comprobó que la biomasa posee un potencial muy bajo, el cual no se corresponde con las demandas energéticas de Colombia.

Guisasola y Baena (2015) realizaron un estudio cuantitativo, con diseño experimental con la finalidad de establecer algunos mecanismos que pudiesen ser útiles para tratar las aguas residuales y obtener energía renovable a partir de ella. según lo explican los autores, el procedimiento se llevó a cabo con aguas “residuales reales” y no con aguas sintéticas biodegradables, como comúnmente suele hacerse.

Los resultados alcanzados por estos investigadores resultaron ser muy favorables, ya que lograron obtener biológicamente hidrógeno y extraer durante el tratamiento de las aguas, gran parte de la energía contenida en los agentes contaminantes de este recurso, esto, por un lado. Por el otro, lograron a través de procedimientos ejecutados con celdas incrementar la corriente y “velocidades de obtención de hidrógeno mediante la limpieza de las aguas residuales.

Otros investigadores como Castro y col. (2016) han estudiado el tratamiento de las aguas residuales industriales como alternativa viable para producir energía. De allí que, realizaron un estudio cuyo enfoque se concentró en analizar el potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica. Para ello utilizaron como método de trabajo la investigación cuantitativa, de tipo experimental y un alcance descriptivo.

Dicha investigación condujo a determinar que el agua residual de la mencionada planta posee componentes con un alto potencial de biometanización de $0,73\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$ y una capacidad energética promedio de “31235 kWh/mes de energía eléctrica y 62500 kWh/mes de energía térmica”. Por lo tanto, es factible transformar el agua residual de la planta de sacrificio para la obtención de energía.

Por su parte, Ñacato (2018) llevó a adelante un estudio de enfoque cualitativo, bajo un diseño experimental y un nivel exploratorio, esto con la finalidad de evaluar la aplicación del “campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas

residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo batch”. En esa dirección, y conforme a los objetivos propuestos estableció mediante su investigación que las “celdas de combustible microbianas” conectadas al “campo magnético” pueden mejorar la separación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), y generar voltaje e intensificar la corriente, esto si se hace un cotejo con las Celdas de Combustible Microbiana (CCMs) habituales. En consecuencia, los resultados alcanzados son viables, pues son métodos de bajo costo y los beneficios son positivos.

5.1.2. Investigaciones tecnológicas

Desde el punto de vista tecnológico se ha llevado a cabo estudios que denotan la importancia de las herramientas tecnológicas en los procesos de tratamiento de las aguas residuales. Sobre este particular, Mora y Bravo (2017) llevaron adelante un estudio del tipo experimental, con un nivel descriptivo y apoyado en un enfoque cuantitativo. La intención de la investigación estuvo orientada a la búsqueda de fuentes alternativas de energía mediante la aplicación de la biotecnología para el tratamiento de las aguas residuales, encontrando que la biotecnología aplicada, en este caso, la “tecnología de las celdas de combustible microbianas” (MFC) es amigable para tratar el problema de aguas residuales y generar energía limpia.

5.1.3. Otras metodologías

Meneses, (2017) estudió la “Sostenibilidad del Nexus Agua-Energía en Sistemas de Tratamiento de Efluentes Agroindustriales”, empleando para ello la metodología ACV, tomando como referencia en la etapa inicial, los principios establecidos en la norma ISO 14040 del 2006, la cual hace énfasis en la evaluación del impacto ambiental. Por su parte, el enfoque es del tipo de “Análisis de Ciclo de Vida” (ACV) comparativo, pues coteja la línea actual con proyecciones futuras, en aras de optimizar los procesos de tratamiento e incrementar la disponibilidad de energía renovable. A través de la aplicación de este tipo de metodología se determinó que es posible integrar métodos energéticos con la ACV para avanzar en el tratamiento de las aguas residuales y aprovechar este potencial al máximo.

Revelo y col. (2013) llevaron adelante una revisión sistemática de literatura con la intención de estudiar las bondades que ofrecen las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs) para

tratar las aguas residuales, mediante la separación de la materia orgánica y a partir allí generar energía eléctrica. La investigación sirvió de base para establecer que la tecnología CCM es una prominente herramienta en la producción alterna de energía, separación de componentes orgánicos y biorremediación; no obstante, a nivel práctico es preciso optimizar la capacidad en los procedimientos bioelectroquímicos y en la recuperación eléctrica, lo cual conduce ampliar los estudios en formas de diseño, entidades microbianas, prototipo y reducción de sustratos. En fin, se determinó que la CCM se consolida como una posibilidad para ahondar en la comprensión de las complicadas interacciones entre una entidad “microbiana y un sustrato” mezcladas en los procedimientos de transmisión de electrones, lo cual contribuye a la separación eficaz de los contaminantes aprovechables.

Castro (2014) exploró en los procesos que pueden ser aplicados en el tratamiento de aguas residuales domesticas para generar energía eléctrica, utilizando celdas de combustible microbianas. La investigación se caracterizó por desarrollarse bajo un enfoque cuantitativo, de naturaleza explicativa y proyectiva, con un diseño teórico y experimental fundamentado en la revisión de fuentes bibliográficas que sirvieron de base para recabar y procesar datos ya utilizados.

Las conclusiones alcanzadas por la autora denotan que sistema de tratamiento apoyado en MFC representa una posibilidad para desarrollar nuevas tecnologías, que contribuyan con el tratamiento de las aguas residuales. Asimismo, se pone de manifiesto el elevado consumo de energía generado durante el tratamiento de las aguas, haciendo necesario poner en funcionamiento una celda para crear un sistema sustentable, que no se fundamente meramente en las exigencias de energía del sistema, sino produzca energía.

En resumen, queda demostrado que la metodología con mayor aplicación es la experimental con enfoque cuantitativo, pues la mayoría de los estudios mencionados nacen en laboratorios, en aras de crear nuevos caminos que conduzcan a innovar en la aplicación de métodos rentables desde el punto de vista técnico, económico y tecnológico para tratar las aguas residuales y generar fuentes de energía sostenibles.

5.2. PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES

En la actualidad existen diversos procedimientos que sirven de soporte para tratar las aguas residuales y obtener a partir de ella energía limpia, libre de agentes contaminantes, económica y sostenible. En esa dirección, mediante una revisión de literatura se obtuvieron los siguientes resultados:

5.2.1. Procedimientos basados en el uso de celdas de combustible microbiana

Otro de los procesos traídos a colación por Pistonesi y col. (2010), es el uso de celdas de combustible microbianas (MFC). En este procedimiento los microorganismos no transmiten de manera directa los electrones formados a su “acceptor Terminal”, por el contrario, se desvían al ánodo. Es importante acotar, que la transmisión de electrones al ánodo puede suceder de diversas maneras como, por ejemplo, a través de la “membrana celular” o desde un “mediador soluble”, circulando los electrones por intermedio de un circuito exterior.

La utilización de celdas de combustible microbiana para el tratamiento de aguas residuales se ha venido aplicando para limpiar las aguas de uso doméstico. No obstante, se ha consolidado como un sistema de gran utilidad para obtener energía eléctrica en “sedimentos marinos, así como lagunar”, en otras palabras, este procedimiento tecnológico facilita la producción de electricidad.

Sobre este particular Revelo y col. (2013) exponen que las celdas de combustible microbiana es un sistema bioelectroquímico, utilizado no solamente para generar energía sostenible sino también en procesos de separación de materia orgánica y “biorremediación”, e implica un amplio conocimiento en ecología microbiana para entenderla, comprenderla y darle la interpretación adecuada.

Acotan, que es un procedimiento basado en el uso de bacterias para transformar la energía química alojada en estos microorganismos en un “sustrato de energía eléctrica”. A diferencia de otros sistemas, la CCMs se manejan con temperatura ambiente, generando muy poca cantidad de dióxido de carbono, lo cual se traduce en un menor impacto ambiental.

Adicionalmente, no requieren de una conducción de energía, claro siempre y cuando cátodo abiótico sea ventilado estáticamente o se trate de un biocátodo.

Según Revelo y col. (2013), las proyecciones a futuro de este sistema apunta al uso en zonas distantes en los cuales los requerimientos de consumo eléctrico sean básicos, pues cuentan con una enorme capacidad lo que lo convierte en una opción efectivamente viable, no solo para tratar las aguas residuales, sino para producir energía. En definitiva, los mencionados autores señalan las bondades del uso de las celdas de combustible microbiana, ya que es posible generar energía renovable a través del aprovechamiento de la biomasa encontrada en las aguas residuales bien sean domesticas o industriales (Ver Figura 2).

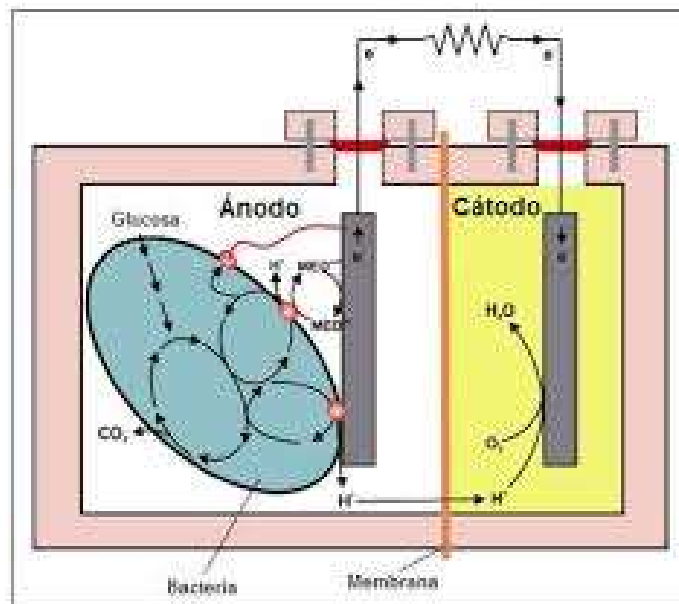


Figura 2. Celdas de combustible microbiana. (Tomado de Góngora y col., 2017)

Paralelamente, Mateo y col. (2015) reafirman lo expuesto por Pistonesi y col. (2010), respecto al uso de las celdas de combustible microbiana (CCM) para producir energía, acotando que es un tipo de tecnología idónea para reemplazar los “reactores biológicos” convencionales ubicadas en las estaciones utilizadas para limpiar las aguas residuales. La propuesta de los autores se fundamenta, específicamente en estudiar la configuración de dos tipos de CCM en aras de analizar su comportamiento y partiendo de los hallazgos desarrollar nuevas alternativas que sean autosostenibles.

Entre los modelos a estudiar resaltan en primer lugar las celdas de combustible microbiana de “doble comportamiento”, la cual está caracterizada por utilizar membranas de reemplazo iónico para extraer los microorganismos aislados en el “compartimento anódico” y la solución ácida detenida en el “compartimento catódico”. Se caracterizan por ser componentes de fácil construcción, sencillos, pero con una generación de energía restringida (Ver Figura 3).

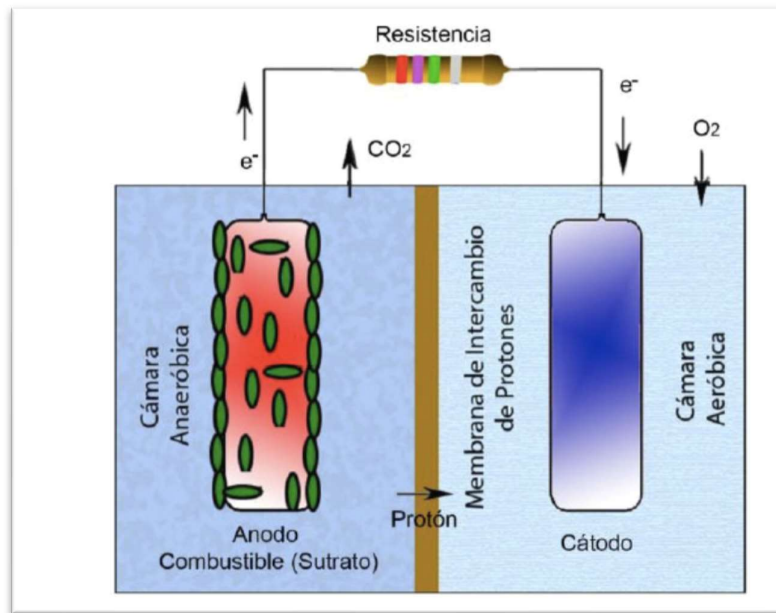


Figura 3. Celdas de combustible microbiana de doble cámara. (Tomado de Mateo y col., 2015)

El segundo tipo de celda estudiado es la denominada “air breathing”. A diferencia del primer modelo referenciado, en este se halla un cátodo abierto al ambiente, por lo tanto, el oxígeno requerido para la transformación catódica viene directamente del aire. Asimismo, durante el proceso de experimentación de ambos modelos de configuraciones se comprobó que la capacidad de las celdas “air breathing” para extraer la materia orgánica de las aguas residuales es menor que el proceso de “las celdas convencionales de doble compartimento”.

5.2.2. Procedimientos de producción de energía a partir de biogás

Tejera y col. (2015) exponen sobre la obtención de energía renovable a partir de uso del biogás como una fuente generadora de electricidad. En esa dirección, puntualizan que es una

técnica bastante económica, con un impacto ambiental controlado, aunado a ello se tiene el hecho de ser una alternativa autosustentable para la empresa en la cual se realiza el estudio, pues le permite generar energía eléctrica y calorífica para uso propio.

Ahora, en el caso específico de la empresa en cuestión plantea un cambio, es decir aprovechar los efluentes generados en la refinadora de aceite y con ello aumentar la capacidad su eléctrica. Por lo tanto, se prevé utilizar el biogás obtenido, primeramente, como combustible para generar electricidad, produciendo un aproximado de 462,8 kWh por día, lo cual se traduce en un ahorro de energía estimado de 0,17% \sphericalangle 170,16 MWh. En armonía con lo anterior, Barragán y col. (2019) acotan que actualmente se cuenta con diversos métodos tecnológicos para producir energía renovable, uno de ellos lo constituye la obtención de energía a partir de biogás de las aguas residuales. El procedimiento utilizado se denomina “biogás de biodigestores” y consiste en estabilizar el lodo contenido en este recurso a través de métodos aeróbica o anaeróbica.

5.2.3. Procedimientos de producción de energía a partir pilas de combustible

Pistonesi y col. (2010) señala que el alojamiento de una “pila de combustible” en el medio ambiente, es una alternativa viable para obtener energía eléctrica de manera natural a partir de las comunidades microbianas, el procedimiento se conoce como “célula de combustible sedimentaria” y consiste en enterrar un ánodo en un “sedimento anaerobio” la cual funge como una cámara anódica, no obstante, el cátodo permanece expuesto en la etapa húmeda aeróbica que resguarda el sedimento.

Bosch y col. (2020) reafirma lo expuesto por Pistonesi y col. (2010) y acota que este procedimiento es uno de los primeros en ser utilizados para obtener electricidad a partir de la depuración de las aguas residuales. El sistema se basa en someter la materia orgánica a un proceso de oxidación con microorganismos unidos al ánodo. Los electrones producidos durante el proceso de oxidación son trasladados al ánodo y usados en la generación de energía eléctrica (Ver Figura 4).

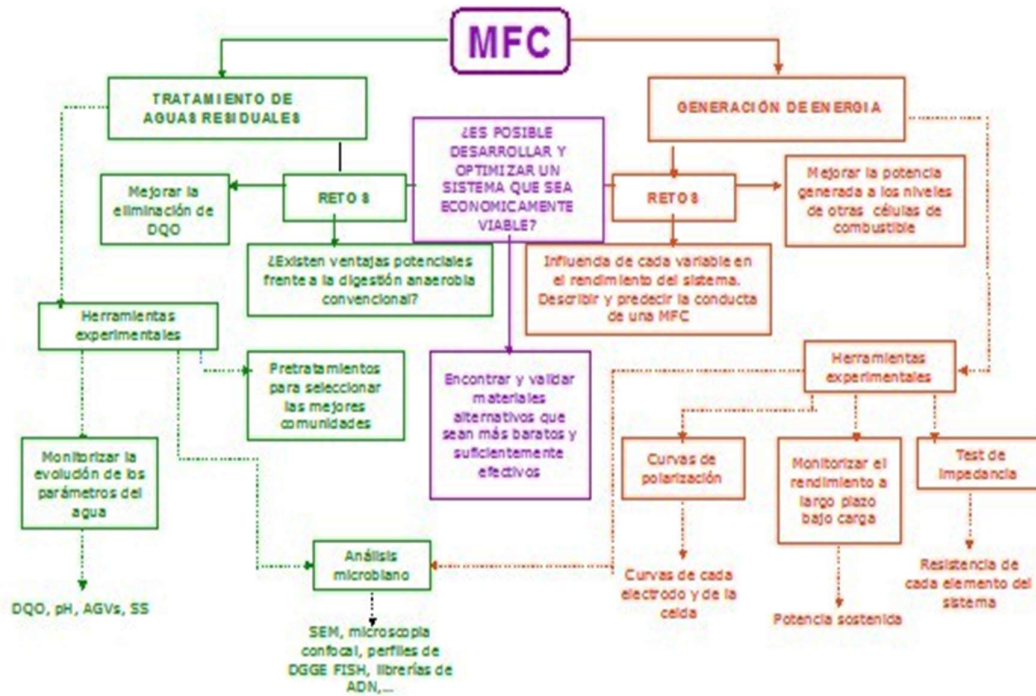


Figura 4. Procedimiento de tratamiento de aguas residuales con pilas microbianas. (Tomado de Bosch y col., 2020)

5.2.4. Procedimiento de producción de energía a partir de humedales artificiales

En este mismo orden de ideas, Delgadillo y col. (2010) hacen referencia al uso de humedales artificiales para depurar el agua residual de materia orgánica y nutrientes a través de un conjunto de procedimientos físicos, químicos y biológicos. Para llevar a cabo el proceso se ubica un ánodo en el área “anaerobia del humedal”, se produce electricidad de manera natural y simultáneamente tratar el agua residual, asegurando ser un procedimiento rentable, pero con poco alcance en la producción de potencial energético.

Insignares (2013) reafirma el argumento de Delgadillo y col. (2010) y explica que actualmente se cuenta con una importante variedad de mecanismos tecnológicos aplicables al tratamiento de aguas residuales, claro cada uno de ellos tiene una finalidad específica o predefinida. En ese sentido, refiere el uso de humedales artificiales de medio suspendido como una alternativa viable para producir biomasa a partir del tratamiento de aguas residuales para producir energía. Este es un proceso cuyo fundamento es la construcción de

humedales de Lemna minor a los cuales se le hará una estimación del “potencial energético bruto”. (Ver Figura 5)

Puntualiza, que la generación de biomasa obtenida de la lemna a través de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales para producir energía es reducida, pues la misma área de los humedales no se presta para sanear eficazmente el agua, lo cual es un indicativo de que estos humedales requieren mayores espacios para tratar el “excedente” producido.

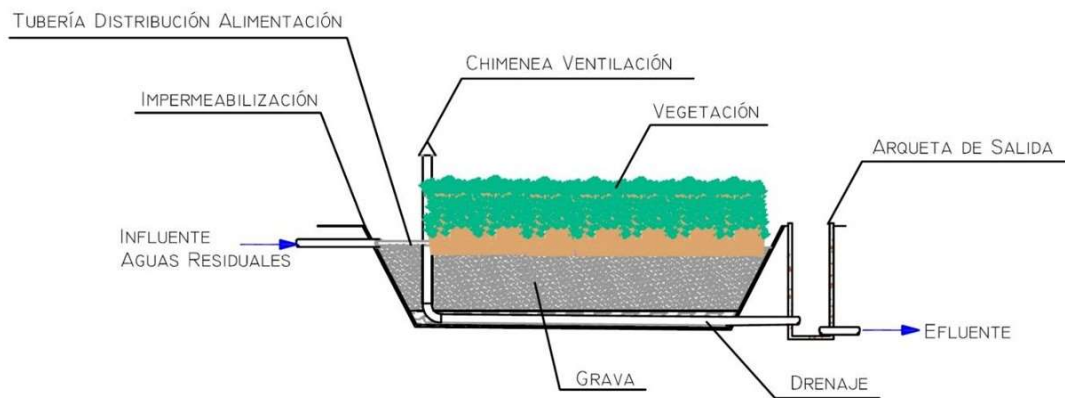


Figura 5. Estructura de un humedal artificial. (Tomado de Insignares, 2013)

5.2.5. Procedimiento de producción de energía a partir de la digestión anaerobia

Mass y Medrano (2013) hacen alusión al tratamiento de aguas residuales por medio de la digestión anaeróbica, explican que se trata de un sistema orgánico o biológico relativamente económico, cuyo soporte es el uso de la innovación tecnológica en la ejecución de cada proceso microbiológico, orientado exclusivamente al aprovechamiento de la materia orgánica para generar metano, a tal efecto, se hace uso de una diversidad de bacterias y microorganismos.

Ahora, este procedimiento se centra en descomponer la materia orgánica mediante la manipulación de un “ecosistema bacteriano” parcialmente complicado, no requiere de la presencia de oxígeno, lo cual facilita que la materia orgánica se transforme en metano y dióxido de carbono. En ese contexto, los tratamientos anaerobios contribuyen significativamente a depurar biológicamente el agua residual, puesto que no requiere

oxígeno y adicionalmente produce biogás con un alto potencial energético, permitiendo crear a partir de ella fuentes sustentables de energía, tal como se muestra en la Figura 6.

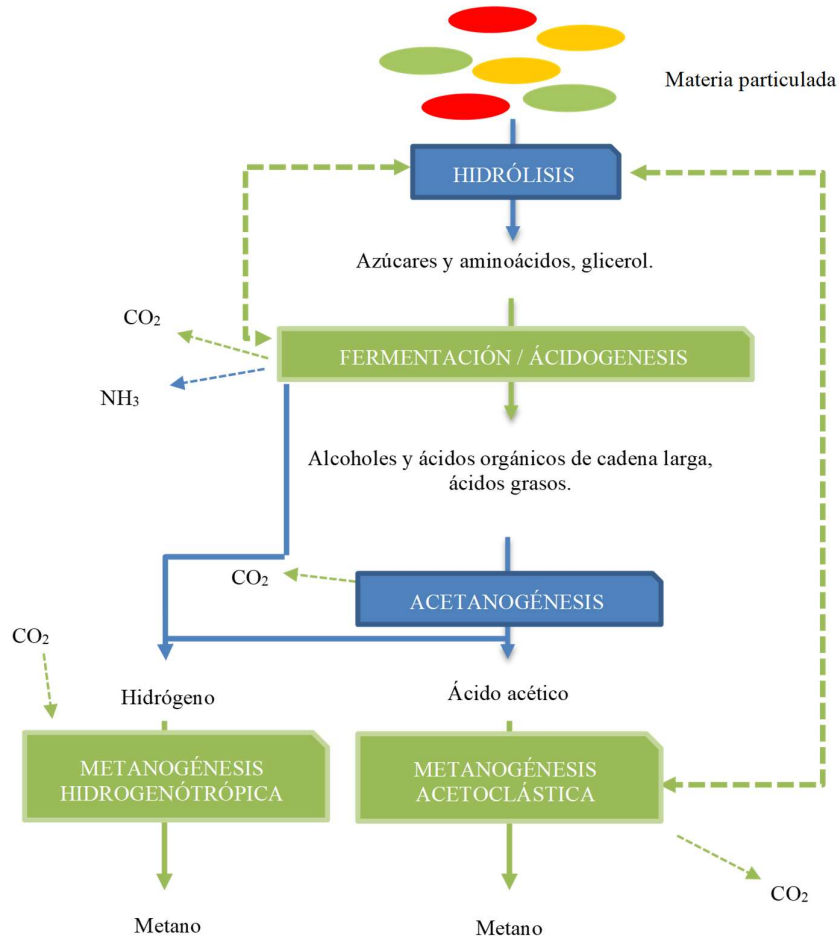


Figura 6. Proceso de digestión anaerobia. (Adaptado de Castro, 2016)

En la digestión anaerobia, como ya se ha mencionado no ocurre un proceso de oxidación, por tanto, la demanda química del oxígeno, que se encuentra ausente pasa a ser ocupada por el metano, abarcando de 90 a 97% del total de la materia orgánica absorbida y solamente de 3 a 10% aproximadamente se transforma en lodo residual. Es importante acotar, que dentro de todo este proceso solo se libera una reducida cantidad de energía, pues la mayor parte de ella es energía química, es decir, metano. Como puede observarse es una tecnología que ha venido calando en diversos sectores, especialmente en el industrial, quienes han implementado sistemas de tratamiento apoyados en reactores “Upflow Anaerobic Sludge

Blanket” (UASB), en español conocidos como “Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente” (RAFA) y los “Expanded Granular Sludge Bed Digestion” (EGSB) de última generación.

Castro y col. (2016) señala que el proceso de Digestión Anaeróbica (DA) se basa en la desintegración de la materia orgánica, pero sin la presencia de un proceso de oxidación, es decir, no requiere de aireación y se ejecuta a partir de las fases bioquímica de “hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis”. Cada una de estas fases se asocia a los requisitos metabólicos de una entidad microbiana, generadora de biogás (CH_4 y CO_2) y asimilado, lo cual garantiza la recuperación de energía en “forma de biogás”, tal como se muestra en la Figura 6.

El tratamiento de aguas residuales a nivel industrial con este procedimiento va a depender de la constitución fisicoquímica del agua, del “tiempo de residencia hidráulico” pues esto garantiza la hidrólisis de los compuestos particulado y la determinación de requisitos operacionales del proceso que sirvan de soporte a las fases de metanogénicas acetoclásticas, puesto que este conjunto nutre la catalización del biogás producido.

Por otra parte, se tiene la viabilidad de biometanización (PBM) para establecer la cantidad de metano producido por “masa de sustrato”, además contribuye con la valoración de la factibilidad del proceso anaerobio y planear su diseño con base en cuantificaciones operacionales, es decir, cantidad de metano producido, periodo de adaptabilidad de la entidad microbiana y porción de “materia degradable”. Cabe mencionar que, la producción y medidas cinéticas del procedimiento de digestión anaerobias a nivel de industrias está sujeta a la fuente de inóculo, es decir, de la correlación “inóculo/sustrato y la temperatura” ejecutado durante este proceso.

GIZ México (2018) trae a colación el sistema de tratamiento para aguas residuales basado en la biodigestión anaeróbica de lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Expone, que mediante este procedimiento se busca sanear el agua de los agentes contaminantes y tratar los lodos residuales producidos, para extraer subproductos como el biogás y el digestato, por ser dos componentes de suma importancia en la generación de energía. Este procedimiento consiste en dar un tratamiento preliminar, es decir, se introduce el agua residual al biodigestor, posteriormente se pasa al tratamiento primario o precipitación de la materia en suspensión. En el paso siguiente corresponde al tratamiento

del lodo secundario, acá se obtiene lodo activado biodegradable a través de procesos biológicos. La finalidad de todo el procedimiento es secar el lodo residual para producir energía calorífica que pueda usarse de forma sustentable (Ver Figura 7).

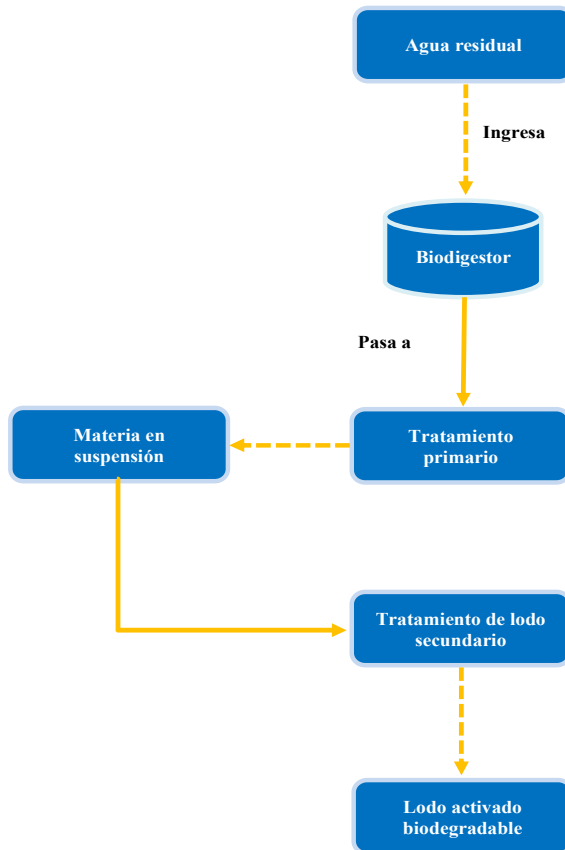


Figura 7. Tratamiento para aguas residuales basado en la biodigestión anaeróbica de lodos.

5.2.6. Otros procedimientos

En este mismo orden de ideas, Pistonesi y col. (2010) señalan que las aguas residuales también pueden ser tratadas con métodos “anaeróbicos de depuración”. El mismo es aplicado en aquellos casos donde la DQO requiere “química de oxígeno” del agua cuando hay un excedente de 15000 mg/l. Ahora, solo ciertos sistemas anaeróbicos consiguen recuperar parte de la energía química contenida en las aguas residuales para producir biogás, por lo cual se le considera como un método secundario de tratamiento.

Pistonesi y col. (2010) explican que hay una diversidad de procesos para ser utilizados en el tratamiento de aguas residuales y obtener energía a partir de ello. En ese sentido, puntualizan que puede usarse microbios para limpiar las aguas residuales y aprovechar la extracción de componentes y generar energía. Según lo explican Pistonesi y col. (2010) este es un proceso que consiste en utilizar bacterias como un mecanismo de oxidación del combustible y/o materia orgánica y transportar los “electrones a un electrodo (ánodo)”, que se encuentran unidos a un cátodo por medio de un material transmisor contentivo de una resistencia (Ver Figura 8).

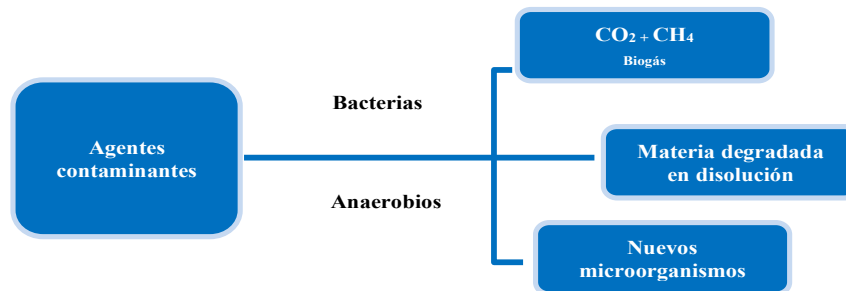


Figura 8. Métodos anaeróbicos de depuración. (Fuente: A partir de Istonesi y col., 2010)

Ahora, las cámaras que alojan los electrodos, la anaerobia y la aerobia, se relacionan a través de una “membrana de intercambio catiónico”, abriendo paso al flujo de protones. De modo que, al combinar los protones producidos durante el proceso de oxidación de la materia orgánica se genera la fusión del oxígeno y los electrones que ascienden al cátodo para producir agua.

Para Ceballos y Hidalgo, (2013) el metano contenido en las aguas residuales constituye una importante fuente energética, en ese sentido consideran que es un procedimiento viable para dar tratamiento a las aguas, producir energía y a la vez mitigar el impacto ambiental. Para la obtención del metano se parte de un proceso de digestión anaeróbica en un biorreactor, en este caso específico fue usado biorreactores de Bach y “semicontinuo de agitación intermitente”.

Ahora, por tratarse de una granja porcina se recicló el agua residual y los excrementos porcinos como materias para las operaciones agronómicas, dándole tres tratamientos continuos, y así aprovechar al máximo los nutrientes al momento de su extracción, logrando

determinar que la producción de metano está vinculada a la caracterización de los residuos del agua y no a la “carga orgánica” implantada al digestor, lo cual conlleva a valorar el potencial del metano como fuente energética.

Por su lado, Aguilar y Blanco (2018) refiere el uso del metano obtenido de los procesos anaeróbicos como una alternativa para obtener energía a partir del lodo contenido en las aguas residuales. Ahora bien, los métodos para tratar el lodo pueden variar, esto dependerá de la fuente, de la procedencia de las aguas residuales y de los procedimientos de instalación propuestos. De modo que, al activar este sistema se demanda abastecimiento de energía eléctrica para poder transportar oxígeno tanto al agua como a las bacterias, proceso ejecutado a través de compresores y aireadores mecánicos.

El proceso de recuperación de metano a través de las PTAR se realiza utilizando las aguas residuales, mismas que son debidamente tratadas con procedimientos de digestión anaerobia, asimismo puede ser sustituido por tratamientos “aerobio de lodos primarios por tratamiento anaerobio”, pero apoyado en la captación de gas. De manera pues, que la digestión anaerobia es una fase biológica en la cual los lodos por la acción de un conjunto de microorganismos y por falta de oxígeno se desintegran en biogás que puede contener de 60% a 70% de metano, 30% de dióxido de carbono y un 3% dividido entre nitrógeno y oxígeno.

Por su parte, Blanco (2014) hace alusión al aprovechamiento del lodo residual para optimizar la capacidad energética. Conforme a los planteamientos de la autora este es un procedimiento que busca darle un uso alternativo a los lodos resultantes del tratamiento de las aguas residuales, empleando para ello un “proceso de secado”, pues de acuerdo con estudios previos, comprobaron que al suprimir la humedad los residuos alcanzan un significativo potencial calorífico, el cual puede ser utilizado como “biocombustible sólido” para producir energía térmica.

La esencia de este procedimiento subyace en reducir la capacidad de un kilo de lodo de residual en estado húmedo a 100 gr. de cenizas a partir de un proceso de combustión. En sí, la idea es extraer y eliminar la humedad en un lapso de tiempo corto, empleando para ello el calor de la “reacción bioquímica” generada en el reactor, en esa dirección se busca reducir la humedad, pero aumentar el potencial calorífico inicial de 50% a 80% aproximadamente (Ver Figura 9).

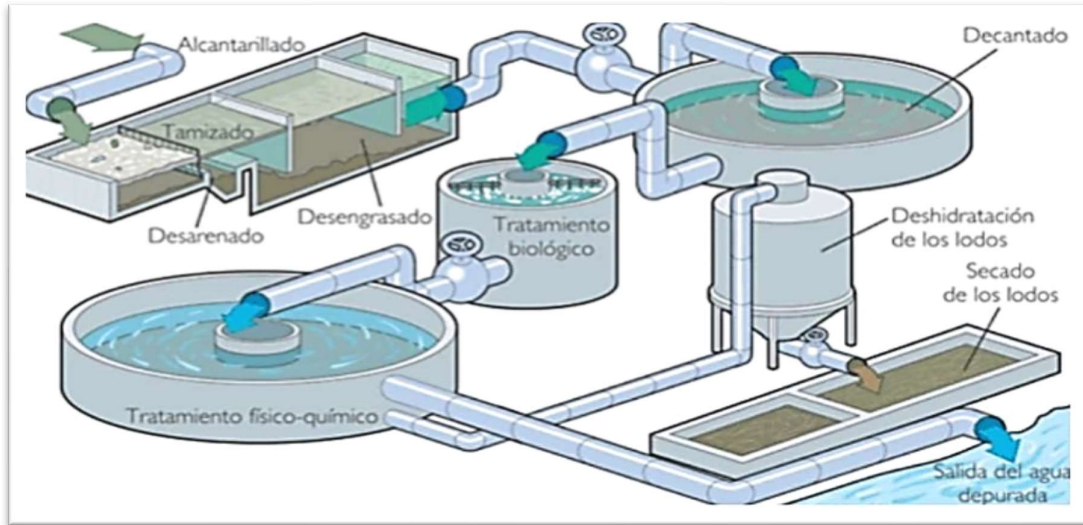


Figura 9. Tratamiento de las aguas residuales para obtener lodo residual. (Tomado de Blanco, 2014)

Según explica Blanco (2014), el proceso de secado parte de la aplicación de una corriente sostenida de oxígeno a una composición de lodo y “agente estructurante”, generando de este modo una reacción “bioquímica” e incrementado la temperatura de la “matriz de lodos”. Es evidente que este proceso conjuga dos elementos importantes, es decir, al incrementar la temperatura y acoplarse al paso de oxígeno extrae la humedad contenida en el residuo. Otro aspecto por considerar es la utilización de la tecnología de biosecado, en este caso se usó la cascarilla de arroz, pues es capaz de eliminar hasta un 35% de humedad en un periodo relativamente corto, claro, esto es directamente proporcional al control de temperatura establecido. (Ver Figura 10)



Figura 10. Proceso de secado del lodo residual. (Tomado de Blanco, 2014)

Los avances tecnológicos en materia de tratamiento de agua residual con fines energéticos son muchos, cada día se innova y sale al mercado nuevos procedimientos para facilitar y garantizar la depuración de las aguas y aprovechar al máximo sus nutrientes. Es el caso de Electrochemical water treatment system in the dairy industry with hydrogen recovery and electricity production, (2016), quien emprendió un proyecto para sanear las aguas residuales de una industria productora de lácteos y generar energía a partir de este recurso y el suero. Según acotan, se trata de recuperar el hidrógeno contenido en estos dos elementos, refinarlo y producir un subproducto de “procesos electroquímicos” que produzca energía eléctrica. Pues bien, tal como ya se hizo mención este procedimiento busca generar electricidad aplicando tecnología para transformar el hidrógeno y utilizar el producto resultante dentro de la misma industria, pero puede extenderse a otro tipo de empresas de alimentos o productoras de biodiésel.

Los estudios experimentales puesto en práctica dentro de la industria, han dado muestra de ser un procedimiento viable, pues los hallazgos denotan que utilizando este sistema el consumo eléctrico puede reducir hasta un 10%, el uso de agua disminuyó a 30% y se logró reciclar las aguas residuales de esta organización entre un 80 y 95%.

No obstante, la proyección con este tipo de procedimiento es amplificar el sistema de tratamiento de suero y aguas residuales, no solo en esta industria sino expandirlo a otras con operaciones iguales o similares, pues el esquema simplemente conduce a la articulación del sistema de recuperación de energía eléctrica y la reutilización de las aguas depuradas, en ese sentido, es imperante desarrollo una técnica para extraer las grasas y aceites, así como un mecanismo de electro oxidación En líneas generales, este procedimiento se perfila como una propuesta ambiciosa para desarrollar un sistema articulado con el tratamiento del suero y las aguas residuales de la industria láctea, que permita regenerar el sistema eléctrico y reutilizar el agua depurada, generando de ese modo energía a partir de la conversión del hidrógeno.

Un estudio patrocinado por la Universidad Autónoma de Barcelona (2017) indica que las aguas residuales contienen infinidad de microorganismos, útiles para generar hidrógeno y producir fuentes de energías alternas sostenibles a futuro. Según explica, un grupo de científicos de esta universidad, las bacterias de este tipo de agua se nutren de materia orgánica y produce electricidad.

En ese contexto, las tecnologías han pasado a jugar un papel de gran importancia en el tratamiento y saneamiento de las aguas residuales. Generalmente están caracterizadas por generar altos costos, pues los métodos de aireación y bombeo requieren fuertes inversiones para tratar de manera adecuada los residuos producidos por el agua, en especial si se habla de eliminar o separar el lodo.

Es así que, un grupo de especialistas inició un procedimiento basado en el uso de celdas microbianas de electrolisis para dar tratamiento a las aguas residuales, el cual es un proceso realizado con microorganismos exoelectrógenas. Las mismas son unas bacterias capaces de actuar en la materia orgánica, oxidarla y producir energía eléctrica que permite la generación de hidrógeno.

Su funcionamiento se enfoca en adicionar pequeñas cantidades de energía en “forma de voltaje”, para recuperar hidrógeno y generar energía pura, obteniendo resultados favorables, pues a través de este procedimiento los investigadores lograron conseguir a partir de la limpieza de las aguas residuales con las celdas de electrolisis intensidades de electricidad y una producción de hidrógeno elevada. (Ver Figura 11).

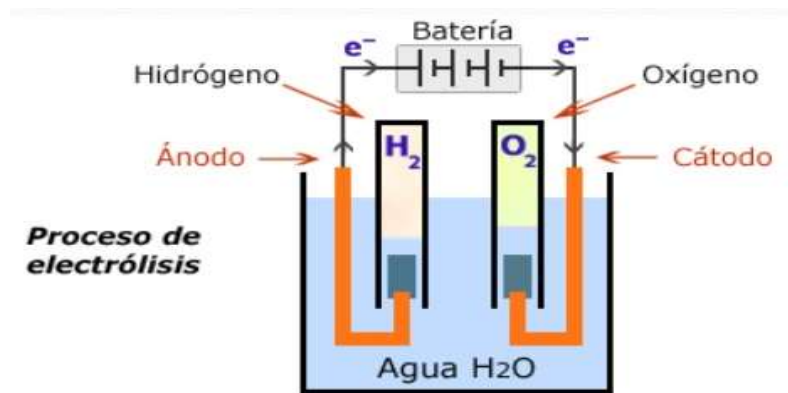


Figura 11. Proceso para obtener hidrógeno en una celda de electrolisis. (Tomado de Del Valle, 2017)

El Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), (2020) menciona un procedimiento innovador para tratar aguas residuales, incrementar la materia orgánica y sustentos en las aguas residuales a través de la unificación de dos procesos: la digestión anaerobia y un procedimiento “bioelectroquímico de tercera generación”, en aras de optimizar el tratamiento de las aguas y el lodo residual que producen. En líneas generales, a

través de este procedimiento se busca aprovechar los residuos del agua y transformarlos en un potencial energético, para ello se extrae el biometano contenido en el biogás resultante del proceso de digestión anaerobia y se convierte en biomasa acuática, integrando simbióticamente la digestión anaerobia, el electro metanogénesis y la producción de “microalgas y lemna”. En fin, este es un procedimiento que engloba tres tipos de tecnologías de vanguardia con un solo objetivo: obtener fuentes alternas de energía a partir de las aguas residuales.

Meneses (2017) menciona que las aguas residuales pueden tratarse con diferentes procesos para desarrollar bioenergía, no obstante, advierte que el procedimiento para generarla es costoso, puesto que tiene dependencia directa de los avances tecnológicos. Es así que, para aprovechar en toda su extensión la bioenergía es imperativo articular las tecnologías a utilizar para generarla con los ecosistemas y otros sistemas comprometidos con el procedimiento de producción de bioenergía, en aras de aminorar costos, garantizar el mayor provecho económico y proteger el medio ambiente a través de la creación de sistemas de energía sostenibles que se apoyen en la depuración de las aguas residuales.

Sobre este particular y en concordancia con lo expuesto por Meneses (2017), Farias (2016) trae a colación de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR), explica que es emplea unidades “biológicas” como fundamento central del proceso. Se caracterizan por producir biogás “rico en metano” y lodo residual, como subproductos que absorben un importante porcentaje de energía química proveniente de los agentes contaminantes.

Ahora, según lo refiere el autor este tipo de tecnología ha ido evolucionando, logrando crear modelos que protegen el ambiente con mayor eficiencia y alcanzar mayores niveles en la producción de energía, esto teniendo en cuenta las implicaciones derivadas de la obtención del biogás por los impactos generados al medio ambiente.

En esa dirección, el desarrollo de la biotecnología pasa a jugar un importante papel en la optimización de los procesos para generar energía, bien sea a base de “anaerobia o fotosintética” para poder crear biohidrógeno o simplemente aprovechar los nutrientes contenidos en las microalgas e inclusive llevar a producir energía eléctrica a través de celdas de combustible microbiana.

Es evidente, que todas las tecnologías empleadas para dar tratamiento a las aguas residuales brindan salidas energéticas variables, cada una con características diferentes y con menos limitaciones técnicas y económicas en la obtención del biogás. De este modo, este tipo de tecnología se fortalecen, al tiempo que el uso energético del biogás y los lodos residuales se acentúa dentro de todo el proceso de transición tecnológico, especialmente en sectores en los cuales acceder a la tecnología para tratar las aguas residuales y extraer energía se limita.

Sobre ese particular Meneses (2017) señala que el procedimiento ejecutado con biogás obtenido a través de sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) para obtener energía, no es tan utilizado como el biogás de los “rellenos sanitarios, el de origen agrícola o el de pasturas energéticas” y puede deberse a los mismos costos inversión generados. Asimismo, el aprovechamiento de la energía obtenida por medio de los sistemas de tratamiento de aguas residuales involucra diferentes aspectos, destacando entre ellos delinear políticas para introducir el concepto de energía renovable, en lugares donde se han implementado o vendido una idea fundamentada en otros mecanismos como, por ejemplo, la biomasa, bien sea sólida o residual e induciendo de manera directa al uso de fuentes de energía convencional, darse la oportunidad de sacar provechos a este recurso.

Ñacato, (2018) explica un procedimiento para dar tratamiento a las aguas residuales basado en el uso de celdas de combustible microbiana. Señala que se trata de una tecnología exequible por tener un bajo costo, sin embargo, es un sistema que ha mostrado, según su criterio algunas deficiencias, lo cual conlleva a proponer la utilización de este tipo de tecnología, pero conectada a un campo magnético estático para optimizar su rendimiento.

Ahora bien, la función cumplida por el campo magnético dentro de todo este proceso ha sido debidamente estudiada y analizada, por ser un método innovador aplicado para “afectar la actividad electroquímica” y el desarrollo de bacterias. Este procedimiento consiste en unificar el campo magnético a las celdas de combustible en aras de logra un mayor rendimiento y optimizar la actividad “bioelectroquímica”, reduciendo así la disminución de las actividades del “ánodo” y la “resistencia” interna. De allí que las bacterias utilizadas se tratan con frecuencias (ELFEMF) bajas, poniendo en evidencia afectaciones tanto positivas como negativas respecto al desarrollo de celular y factibilidad.

Claro, esto depende de las cuantificaciones físicas del campo electromagnético, es decir, de la frecuencia aplicada y “densidad del flujo magnético”, del tiempo durante el cual se expongan y del prototipo de células bacterianas empleadas. De manera que, al acoplar el campo magnético a las celdas de combustible microbiana se busca optimizar la separación de DQO, así como la producción de voltaje y la intensidad de electricidad, respecto a las celdas de combustible microbiana tradicionales.

5.3. VENTAJAS Y LAS DESVENTAJAS ASOCIADAS A CADA MÉTODO DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES

Sin lugar a duda, cada procedimiento para tratar las aguas residuales y producir energía trae consigo sus pros y sus contras, situación que conlleva analizarlas y con base a los resultados de cada estudio realizado, determinar la mejor opción para aplicarla, pues no todos se ajustan a las condiciones técnicas ni económicas. Siendo, así las cosas, seguidamente se presenta algunas ventajas y desventajas que se deslinden de los procedimientos mencionados en el apartado anterior.

5.3.1. Celdas de combustible microbiana

De acuerdo con Pistonesi y col. (2010) la producción de energía eléctrica a través de procedimientos con celdas de combustible microbiana presenta las siguientes ventajas:

- No presenta dificultades con las escalas.
- No genera sonidos eléctricos, pues no existen cortes de “campos magnéticos” ni cambios.
- Es una inversión rentable, pues las transformaciones parte de un combustible específico.
- Utiliza cualquier tipo de combustible que pueda ser rectificado al separar el hidrógeno de su estructura.
- Puede alcanzar un rendimiento hasta de 80% o más.

Por su parte, Figueredo y col. (2014) señalan que las celdas de combustible microbiana son sistemas rentables, ya que son factibles técnicamente. Las MFC son sistemas altamente prometedores por su factibilidad técnica, económica y de fácil manejo. Agregan, además que

pueden articularse con otros procesos “innovadores”, como por ejemplo con los biosensores, la “remediación ambiental” como el caso STAR o sistemas de tratamiento de aguas residuales, haciendo de ellas no solo una opción viable, sino también en una alternativa prioritaria desde el punto de vista científico, pues se ajusta a las demandas de las políticas actuales, las cuales enfatizan en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles.

En esa misma dirección, Mora y Bravo, (2017) argumentan que son unos dispositivos “versátiles” ajustables a diferentes entornos o ambientes, gracias a la capacidad que poseen. De allí las ventajas a nivel funcional y operativo atribuido, pues permite la transformación continua de un “sustrato energético en electricidad”, consiguiendo remover la materia orgánica, así como las “partículas contaminantes” de las aguas residuales.

Igualmente, puede utilizarse eficazmente en cualesquiera circunstancias ambientales, incluyendo a bajas temperaturas, adicionalmente no genera salida de gases contaminantes, debido a que la única salida de dióxido de carbono que regresa a la atmósfera, es para ser utilizado como potencial energético en lugares donde no cuenten con una subestructura eléctrica, lo cual no representa ningún riesgo desde el punto de vista operativo. Para Farias (2016) este es un sistema para la transformación directa de energía a partir de un sustrato, mostrando ventajas significativas sobre otros procedimientos utilizados para este mismo, destacando entre ellos:

- Su funcionamiento se ajusta a las temperaturas del ambiente, puede tener la misma función a altas o bajas temperaturas, además de permitir el uso en lugares remotos donde la conexión a los sistemas de energía tradicionales ha sido compleja.
- No demanda procedimiento con gases ya que los gases emitidos están enriquecidos con dióxido de carbono sin ningún tipo de valor “energético residual”.
- Si se compara con otros tipos de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, este sistema produce una reducida cantidad de lodo residual. Lo cual representa un ahorro en el costo generado para deshidratar este componente.
- Su versatilidad permite el acoplamiento a otros sistemas energéticos con requerimientos diferentes

Por su parte, Medina y Zapata (2017) mencionan que si bien es cierto que los sistemas de celdas microbianas son rentable y traen consigo un conjunto de ventajas para el usuario,

también es cierto que como todo sistema puede presentar algunas dificultades , asociadas a una serie de factores, entre los cuales destacan:

- Las tecnologías emergentes: según plantea el autor existen problemas si resolver lo cual incide directamente sobre el funcionamiento de las pilas de combustible, sobre la vida útil que pueda tener, repercutiendo negativamente en la comercialización.
- Oferta y la demanda en el mercado: por ser una tecnología relativamente nueva la demanda en el mercado no es muy alta, lo cual influye en la asignación de costos, pues no puede competir en igualdad de condiciones con las tecnologías convencionales disponibles, lo que representa un estancamiento para la oferta y la demanda del producto.
- Almacenamiento y transporte: actualmente las empresas no cuentan con espacios idóneos que sean compatibles con el hidrógeno, lo cual conlleva a invertir para mejorar los almacenes e implica el cambio de cañerías, bombas, válvulas, tambores de almacenaje, entre otras demandas que pueden ir surgiendo y deben ser atendidas. Asimismo, se tiene que el hidrógeno es un elemento muy pequeño que puede filtrarse con facilidad, conduciendo hacer cambios radicales en toda la refinería incluyendo vehículos, cañerías y demás requerimientos.
- Producción de combustible: el proceso para producir hidrógeno es costoso, pues no se cuenta con una fuente de energía que sirva de base y se inicia el procedimiento de cero, es decir someterlo a un proceso de procesamiento y posteriormente separarlo en estado puro.
- Costo: la implementación de este tipo de tecnología es costosa, pues aún no está completamente consolidada, lo cual representa un obstáculo para ponerla en práctica e induce hacia la inclinación de mecanismos más económicos como funcionalidad y operatividad similares.

En sintonía con el planteamiento de Medina y Zapata (2017), Fortuño (2018) trae a colación un conjunto de desventajas y acotan que estas están vinculadas con aspectos que son fundamentales para el buen funcionamiento de un sistema de celdas microbianas, entre las cuales se encuentran:

- Los materiales usados para su implementación a gran escala tienden a ser costosos, lo cual pone en duda la factibilidad económica.

- Actualmente, no se cuenta con estudios que evidencien la durabilidad de los materiales a largo plazo.
- La producción de energía es limitada.

5.3.2. Humedales artificiales

Delgadillo y col. (2010) y Farias (2016) señalan que los humedales artificiales son mecanismos convencionalmente simulados con poca profundidad, que contienen una alta concentración de vegetación flotante o emergente muy característica de zonas pantanosas o húmedas, lo cual representa una herramienta de gran valor para tratar las aguas residuales y aprovechar sus contaminantes como sub productos, no obstante, a pesar de ser una técnica viable trae consigo una gama de ventajas y desventajas que se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los humedales. A partir de Delgadillo y col., 2010 y Farias, 2016)

Ventajas	Desventajas
Se obtienen niveles elevados de saneamiento con una inversión muy baja, respecto a otras tecnologías.	El potencial calorífico generado por la lezna es bajo.
Es de fácil mantenimiento y el costo es relativamente bajo.	El potencial energético generado puede llegar a cubrir solo 1% de la demanda total.
Absorben, emplean y convierten los componentes contaminantes a través de microorganismos.	No es viable para ser implementado a grandes escalas.
Adhieren concretamente los sustentos presentes en la “superficie del suelo”, así como la materia orgánica.	Pueden encontrarse dificultades de eutrofización

Entre las desventajas se encuentran según lo expuesto por Farias (2016) las siguientes:

5.3.3. Digestión anaerobia

Castro y col. (2016) y Mass y Medrano, (2013) explican que la digestión anaerobia se fundamenta en un procedimiento complicado en cual interviene un conjunto de microorganismos para descomponen la materia orgánica en compuestos más simples, para convertirlos en “ácidos grasos volátiles”, los cuales tienen como función mediar y modular todo el proceso realizado. En esa dirección, señalan un conjunto de ventajas y desventajas que pueden observarse en la Tabla 2:

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia. (A partir de Castro y col., 2016 y Mass y Medrano, 2013)

Ventajas		Desventajas
Castro y col. (2016)	Mass y Medrano, (2013)	Mass y Medrano, (2013)
Posibilita elevadas cargas orgánicas que pueden alcanzar un promedio de 20 Kg. mg./l de DQO/ m3.d-	Ser un procedimiento sencillo y fácil para operar.	Emite malos olores (H2S).
La producción de lodo residual es baja.	Es una fuente energética alternativa de metano.	Es sensible a las temperaturas bajas, a las alteraciones de pH y al oxígeno diluido.
N/A	Admite la aplicación de altas cargas “orgánicas”, que pueden superar los 30kg DQO/m3. d.	Los procesos de arranque y estabilización son lentos.
Consume poca energía.	Sus instalaciones son pequeñas, por lo tanto, no demandan de grandes espacios.	Los consorcios bacterianos son bastante complejos.
Los requerimientos de energía son bajos.	Se puede aplicar a cualquier escala (pequeña, mediana y gran escala) para tratar residuos industriales o domésticos.	La calidad de la salida de agua o efluentes es menor a la producida por los procesos aeróbicos.
Posibilita la reutilización del metano obtenido.	N/A	Algunos de los subproductos producidos pueden causar corrosión a las estructuras.
No requiere de mucho espacio.	N/A	N/A
El gas que se obtiene en los reactores puede usarse para producir energía eléctrica a través del biogás.	N/A	N/A

5.3.4. Producción de energía a partir de la conversión de hidrógeno

Para el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), (2020) la principal ventaja de esta tecnología es el costo operativo que genera, el cual es muy bajo en comparación con otros sistemas utilizados para este fin. De igual modo, resalta la versatilidad interactuar con otros sistemas y transformar el hidrógeno en energía eléctrica. En cuanto a las desventajas, afirman que por ser una propuesta relativamente nueva no hay mucho conocimiento en el mercado de su funcionalidad, lo cual limita el mercado competitivo.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo tecnológico ha abierto nuevos espacios para actualizar los sistemas convencionales y acoplarse a las demandas actuales para hacer frente a diferentes retos. Uno de ellos se concentra en encontrar métodos, técnicas y estrategias innovadoras para dar tratamiento a las aguas residuales y aprovechar los subproductos obtenidos a través de ella. el aprovechamiento de las aguas residuales constituye hoy día una alternativa para generar energía, evidentemente que requiere de un tratamiento físico, biológico y químico para poder eliminar los elementos nocivos y reutilizarla. Ahora bien, a través de una revisión de literatura se obtuvo información significativa para que permitió responder a los objetivos específicos propuestos, entre los cuales destacaron:

En cuanto a la clasificación de los estudios que se han adelantado con relación a la obtención de energía a partir de aguas residuales, se determinó que existe un marcado interés por indagar en el tema. actualmente existe una variedad de estudios orientados a estudiar el tratamiento de las aguas a nivel general; sin embargo, esa atención se ha concentrado también en el uso de las aguas residuales como una alternativa viable para obtener subproductos reutilizables en diferentes áreas, incluyendo su tratamiento para generar energía. Dentro de los estudios consultados se observó que se han hecho grandes aportes al respecto, los cuales abarcan desde la aplicación de metodologías enfocadas en la búsqueda de tecnologías de vanguardia hasta estudios empíricos, siendo estos últimos los de mayor relevancia, pues la mayoría de las fuentes consultadas se fundamentan en investigaciones cuantitativas experimentales con los cuales se trata de comprobar la efectividad del uso de las aguas residuales para producir energía limpia, a través de estudios prácticos que permita cuantificar los resultados y apoyar las hipótesis planteadas por quienes investigan. Sin embargo, no se niega la existencia de exploraciones cualitativas explicativas, descriptivas o de cualquier otra índole, pero es notorio un marcado interés por la investigación aplicada en laboratorios.

Así mismo, frente a la determinación de los procedimientos utilizados para la obtención de energía a partir de aguas residuales por medio de una revisión sistemática de la literatura, se concluye que dentro de todo este contexto el uso de las tecnologías ha jugado un papel preponderante, pues actualmente se dispone de diferentes mecanismos para dar tratamiento a las aguas residuales, aislar los agentes contaminantes y separar los subproductos que

pueden ser reutilizados en otros procesos, como la generación de energía, por ejemplo. Entre los mecanismos que actualmente tienen mayor demanda para llevar adelante este procedimiento resalta las celdas de combustible microbiana.

De acuerdo con los hallazgos se estableció que este sistema cuya operatividad se basa en el uso de microorganismos no solo se utiliza para tratar aguas residuales y producir energía, sino que también puede emplearse para separar materia orgánica. Otro aspecto importante que llama la atención de este mecanismo es la dimensión alcanzada, pues a diferencia de otros sistemas tiene mayor amplitud para cubrir la demanda eléctrica en zonas aledañas, lo que pone en evidencia la efectividad de las celdas de combustible microbianas en el manejo de energía sostenible.

Igualmente se evidencia la utilidad del biogás para tratar las aguas residuales y obtener energía, especialmente a nivel industrial. De esta manera queda demostrado que es un sistema bastante rentable, actualizado y representa una opción para auto sustentar el consumo eléctrico de las industrias. Otro sistema que ha cobrado fuerza dentro de los procedimientos para producir energía es el uso de pilas de combustible, el cual es de fácil manejo y rentable técnica y económicamente.

De igual manera, se pone manifiesto que existen otros métodos que han dado buenos resultados en el tratamiento de aguas residuales y producción de energía, claro cada uno tiene sus variantes funcionales y operativas, pero hasta el momento han cubierto las expectativas de los usuarios, por ejemplo, los humedales artificiales permiten la producción de biomasa que posteriormente se emplea en la generación de energía, el problema es que abarca mucho espacio y la depuración de las aguas no es completamente confiable.

En esa misma dirección, se encontró que la digestión anaerobia es un procedimiento que se mantiene a la vanguardia de la innovación tecnológica, siendo uno de los más demandados por todas las bondades, eficacia y resultados obtenidos para producir energía, sobre todo a nivel industrial. Se puso además de manifiesto otros mecanismos menos utilizados, pero cuya efectividad ha sido comprobada por los investigadores. Muchos de ellos se encuentran en periodos de prueba y los resultados han satisfecho las expectativas de los investigadores, algunos de ellos están enfocados en la obtención de hidrógeno, otros en el uso del metano e incluso en el empleo de lodo residual, lo cual conduce a deducir que no importa el

mecanismo seleccionado, lo realmente importante es el producto alcanzado y el beneficio obtenido.

Finalmente, en lo que correspondía al contraste de las ventajas y las desventajas asociadas a cada método de obtención de energía a partir de aguas residuales, se llegó a la conclusión que cada uno de los procedimientos estudiados tienen sus pros y sus contras. En el caso de las celdas de combustible microbiana se observó que en comparación con otros procedimientos es bastante rentable económica, técnica y tecnológicamente, pues es de fácil manejo, se acopla con otros sistemas y no genera mayores gastos de mantenimiento, pero la implementación demanda inversión.

Por su parte, los humedales artificiales son un sistema que facilita la depuración de las aguas residuales, es relativamente económico, en comparación con las celdas de combustible microbiana los costos de implementación son muy bajos. No, obstante, el potencial energético generado no es suficiente para cubrir grandes áreas, como ocurre con otros sistemas de gran escala.

En cuanto a la digestión anaerobia se determinó que es un mecanismo sencillo y de fácil manejo, en comparación con los humedales artificiales no requiere de espacios tan amplios para instalarse, adicionalmente no consumen gran cantidad de energía, reduce costos, pues a diferencia de otros sistemas la cantidad de lodo residual producido es muy poco. El problema que se encontró con este procedimiento es que posee un arranque bastante lento que tiende a retrasar el proceso y presenta sensibilidad a las bajas temperaturas y alteraciones de PH.

Por último, se trae a colación la producción de energía a partir de la conversión de hidrógeno el cual se caracteriza por ser económico y acoplarse con facilidad a otros sistemas para producir energía, es un sistema novedoso del cual hay poco conocimiento, lo cual constituye una limitante para ser usado con mayor confiabilidad.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Pabuena, M., y Pasqualino, J. (2014). Potencial de uso de biogás en Colombia. *Revista TEKNOS*, 14(2), 27-33.
- Aguilar, I., y Blanco, P. (2018). Methane recovery and reduction of greenhouse gas emissions: WWTP Nuevo Laredo, Tamaulipas, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(2), 86–111. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>
- Aguilar I., Blanco P. (2018). Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México. 25/03/2020, de Colegio de la Frontera Norte Sitio web: www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/download/1672/1337+%&cd=6&hl=es-419&ct=clnk&gl=co
- Arias C. (2005). Humedales Artificiales Para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Revista Científica General José María Córdova*, vol.3, pp. 40-44.
- Barragán, E., Zalamea, E., Terrados, J., y Vanegas, P. (2019). Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad. *Eure*, 45(134), 259–277. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612019000100259>
- Blanco, A. (2014). *Aprovechamiento de lodos residuales para cerrar el ciclo urbano del agua, mejorar la eficiencia energética y reducir los GEI: caso de la PITAR Nuevo Laredo* (Colegio de la Frontera del Norte). Tomado de <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2015/02/TESIS-Blanco-Jara-Perla-Alejandra.pdf>
- Bosch, P., Molognoni, D., Corbella, C., y Borrás, E. (2020). Sistemas bioelectroquímicos para aumentar la sostenibilidad en procesos de tratamiento de aguas. *Automática e Instrumentación*, (156), 29–31. Tomado de <http://www.automaticaeinstrumentacion.com/es/notices/2020/02/sistemas-bioelectroquimicos-para-aumentar-la-sostenibilidad-en-procesos-de-tratamiento-de-aguas-46162.php#.Xtv0JTpKjIV>
- Cadavid, L. (2012). Obtienen energía renovable a partir de aguas residuales. Tomado de A través de un proyecto de doctorado se logra aprovechar los residuos sólidos presentes en estas aguas, reducir la producción de gases de efecto invernadero y recuperar nutrientes y componentes orgánicos. website: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Obtienen-energia-renovable-a-partir-de-aguas-residuales>
- Castro, L., Escalante, H., Gómez, O., y Jiménez, D. (2016). Analysis of methanogenic and energetic potential from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion. *DYNA (Colombia)*, 83(199), 41–49. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.56796>

- Castro, N. (2014). *Diseño y simulación de un proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas para la generación simultánea de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas* (Universidad de San Buenaventura Seccional Cartagena). <https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2014.11.051>
- Ceballos, W., y Hidalgo, K. (2013). *Estimación del potencial energético a partir del metano producido por las aguas residuales procedentes de la granja porcina de Zamorano* (Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.). Tomado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1782/1/IAD-2013-T012.pdf>
- Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial ((CDTI). (2020). El proyecto VIOe- avanza hacia la sostenibilidad energética de la EDAR. Tomado de La actualidad del sector del agua website: <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/el-proyecto-vioe-avanza-hacia-la-sostenibilidad-en-ztB5> 29/04/2020
- Del Valle, F. (2017). Métodos de producción y usos del hidrógeno. (Cultura Científica 4°ESO). Tomado de <https://fernandodelvalle.wordpress.com/2017/02/07/metodos-de-produccion-y-usos-del-hidrogeno/>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Andrade, M., y Pérez, L. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (Nelson Ant). Tomado de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Electrochemical water treatment system in the dairy industry with hydrogen recovery and electricity production. (2016). Proyecto para generar energía a partir de aguas residuales de la industria lechera. Tomado de Residuos profesional. website: <https://www.residuosprofesional.com/proyecto-para-generar-energia-partir-de-aguas-residuales-de-la-industria-lechera/%0APROYECTO>
- Farias, N. (2016). *Análisis técnico-económico de la tecnología de celdas bioelectroquímicas microbianas para la producción de energías alternas*. (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.). Tomado de [https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/80/1/Análisis técnico-económico de la tecnología de celdas bioelectroquímicas microbianas para la producción de energías alternas..pdf](https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/80/1/Análisis_técnico-económico_de_la_tecnología_de_celdas_bioelectroquímicas_microbianas_para_la_producción_de_energías_alternas..pdf)
- Fernández, A. Letón, P. Rosal, R. Dorado, M. Villar, S. Sanz, J.. (2010). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. España: Dirección General de Universidades e Investigación.

- Figueredo, F., Oyala, A., y Cortón, E. (2014). Celdas de combustible biológicas basadas en el metabolismo fotosintético. *Química Viva*, 13(3), 174–186. Tomado de <https://www.redalyc.org/pdf/863/86332856006.pdf>
- Fortuño, A. (2018). *Aplicación de los sistemas bioelectroquímicos en humedales construidos para la mejora del tratamiento de aguas residuales domésticas* (Escola de Camins). Tomado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/123894/FortuñoIbañezAlberto_SistemasBioelectroquímicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- García J., Bautista M., Hernández A., Zumaya R. (2017). Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana. *Revista de Operaciones Tecnológicas*, vol. 1, pp. 48-56.
- GIZ México. (2018). *Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México. Plantas de Producción de Energía en Hornos Cementeros, Biodigestores, Rellenos Sanitarios y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Tomado de <https://www.giz.de/en/downloads/giz2019-ES-EnRes-Proyectos-de-Aprovechamiento.pdf>
- Guisasola, A., y Baena, J. (2015). Obtienen energía renovable a partir de aguas residuales. Tomado de Investigadores del Departamento de Ingeniería Química han obtenido energía eléctrica e hidrógeno de manera eficiente a partir del proceso de depuración de aguas residuales. El sistema, publicado en Water Research, utiliza bacterias que consumen la materia website: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Obtienen-energia-renovable-a-partir-de-aguas-residuales>
- Hernández, R.; Fernández, C. y Baptista, P. (2011). *Metodología de la investigación*. Bogotá: McGraw Hill. En línea, disponible en: https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Samperi.pdf
- Hurtado de Barrera, J. (2008). *Cómo formular objetivos de investigación. Una comprensión holística* (Q. Editores, Ed.). Caracas.
- Insignares, K. (2013). *Potencial de producción de biomasa para la generación de energía a partir de sistemas de tratamiento de aguas residuales con base a humedales artificiales de medio suspendido (Municipios de Colombia menores a 30.000 habitantes)*. (Pontificia Universidad Javeriana). Tomado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12492/InsignaresFeoKaelOmar2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Lahera R. (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera*, vol. 12, pp. 58-69.
- Lett, L. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Revista Argentina de Microbiología*, Vol. 46, pp. 1-2.
- Marcet, X., Marcet, M., y Vergés, F. (2018). *Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio*. Asociación Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona: España.
- Mass, K., y Medrano, Y. (2013). Artículo De Revisión: Tratamiento De Aguas Residuales a Partir De Digestión Anaerobia. *Tecnología Al Día*, 49(24), 1–17.
- Mateo, S., Asensio, Y., Zamora, H., Fernández, C., Rodrigo, M., Fernández, F., ... Cañizares, P. (2015). Producción de energía en el tratamiento de aguas residuales. Celdas microbiológicas. *Departamento de Ingeniería Química*, (13071), 5.
- Medina, S., y Zapata, M. (2017). *Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio* (Fundación Universidad de América; Vol. 12). Tomado de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6032/1/5152236-2017-1-IQ.pdf>
- Meneses, A. (2017). *Sostenibilidad del Nexus Agua - Energía en Sistemas de Tratamiento de Efluentes Agroindustriales* (Universidad Nacional de Colombia). Tomado de <http://bdigital.unal.edu.co/56383/1/88278917.2017.pdf>
- Ministerio de Vivienda. (2016). *Desarrollo de planes de acción de mitigación para aguas residuales y residuos sólidos*. PAS: Bogotá, Colombia.
- Mora, A., y Bravo, E. (2017). Diversidad bacteriana asociada a biopelículas anódicas en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales. *Acta Biológica Colombiana*, 22(1), 77–84. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n1.55766>
- Moreno, A. (2018). *Economía circular: crecimiento inteligente, sostenibilidad e integrador* (Monografía). Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá, Colombia.
- Muñoz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales* (Monografía). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, España.
- Ñacato, D. (2018). *Evaluación de la aplicación del campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo batch* (Universidad Central de Ecuador). <https://doi.org/10.1109/robot.1994.350900>

- Pistonesi, C., Haure, J., y D'Elmar, R. (2010). *Energía a Partir De Las Residuales* (Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe, Ed.). Bogotá, Colombia: Universidad Tecnológica Nacional.
- Quesada F., Calle E., Ortiz J., Orellana D, Pesantes A. (2018). Consumo sustentable de agua en viviendas de la ciudad de Cuenca. 25/03/2020, de Ingenius Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/326137735_Consumo_sustentable_de_agua_en_viviendas_de_la_ciudad_de_Cuenca/citation/download
- Revelo, D., Hurtado, N., y Ruiz, J. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información Tecnológica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Salgado A. (2007). Investigación cualitativa: diseños, evaluación del rigor metodológico y retos. *Liberabit*, 13, pp.71-78.
- Superintendencia de Industria y Comercio, y Universidad Javeriana. (2014). Tratamiento de aguas residuales. Banco de patentes: Bogotá.
- Tejera, D., Recio, D., Pacheco, A., y Martínez, L. (2015). Aprovechamiento energético del biogás a partir de los residuales de la Empresa Refinadora de Aceite de Santiago de Cuba “ERASOL.” *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 46, 324–331. Tomado de http://revista.cnic.edu.cu/revistaCB/sites/default/files/articulos/CB_24-15_M_0.pdf
- Universidad Autónoma de Barcelona. (2017). Energía eléctrica a partir de aguas residuales. Tomado de Investigadores de la Universidad Autónoma de Barcelona han obtenido energía eléctrica e hidrógeno a partir de la depuración de aguas residuales. Tomado de: <https://www.libertaddigital.com/ciencia-tecnologia/ciencia/2017-02-26/energia-electrica-a-partir-de-aguas-residuales-1276541787/%0A2017-02-26>.