



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas
residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

Presentado por:
Daniel Santiago Linares Fajardo

Trabajo de grado presentando como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Directora.
Ana Paola Becerra Quiroz

Línea de investigación:
Energías Renovables

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería
Programa de ingeniería ambiental
Bogotá D.C. 2020

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

2

Introducción.

El presente documento presenta la investigación de estado del arte sobre el tratamiento de lodos generados en la operación de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) y el potencial uso de estos en la generación de energía eléctrica para optar al título de ingeniero ambiental. La investigación se enmarco bajo el contexto actual de los trenes de tratamiento efectuados en las plantas de tratamiento de agua residual mediante consulta bibliográfica en las diferentes herramientas de información como bases de datos, revistas científicas, trabajos de grado, tesis y monografías.

En los últimos años ha sido evidente la preocupación mundial frente al manejo de los lodos generados dentro del proceso de floculación, coagulación y filtrado que tienen lugar en la depuración de aguas residuales dada la alta generación de estos. En Europa se genera un promedio 10,9 millones de toneladas al año, teniendo consigo impactos negativos relacionados con la emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOC), derivados de dióxido de nitrógeno (NOXs), óxidos de azufre (SOXs) y olores ofensivos, disminuyendo la calidad ambiental y deteriorando la salud humana afectando el sistema respiratorio, generación de afecciones en la piel debido a que contiene una gran variedad de elementos patógenos y sustancias tóxicas tales como: amoníaco, metano, ozono troposférico y compuestos halogenados

Con base al contexto anteriormente mencionado como uno de los tantos escenarios existentes en la actualidad se han establecido y aplicado diferentes medidas para el manejo de este residuo, una de las medidas más utilizadas corresponde a la transformación de los lodos en abono y fertilizante orgánico dada la viabilidad económica del proceso y la reducción total de los lodos, los cuales son ingresados al interior de un biodigestor para finalmente ser adicionados a los cultivos. Sin embargo, acarrea consigo varios inconvenientes por el contenido de patógenos y sustancias tóxicas que no son eliminadas en el tratamiento con biodigestor llegando estas sustancias y patógenos al cultivo; en respuesta de esto se han implementado otras metodologías como la incineración, uso como materia prima para la fabricación de hormigón o lodos activados; o tratamientos previos para disminuir los impactos de los lodos.

Todos las medidas, metodologías o tratamientos anteriormente mencionados conllevan impactos negativos por ende este trabajo busca plantear una alternativa con mayores beneficios ambientales, económicos y sociales. Mediante la utilización de los lodos como fuente de generación de energía eléctrica a través del biogás producido en la digestión anaerobia de los lodos.

Los lodos en el tratamiento de aguas residuales

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

3

El tratamiento de aguas residuales se consolida como uno de los componentes vitales para la sostenibilidad, esto se pudo evidenciar en las islas Kinmenen Taiwán en Asia al establecer estas plantas de tratamiento con una reducción en el nivel de eutrofización alrededor de 38,29%, y la ex toxicidad terrestre en un 20,38%, debido a la disminución de nitrógeno, fósforo y materia orgánica [1], lo cual reduce la necesidad de explorar nuevas fuentes de agua con un alto valor económico, como plantas desalinizadoras método que tiene un costo muy elevado pero muy utilizado en lugares como islas dado a que existe una mayor oferta de agua de mar. adicionalmente se ha comprobado la disminución en el uso del agua dulce de forma permanente por la recirculación del agua ya usada que previamente ha sido tratada y que finalmente se ha podido destinar al riego de cultivos agrícolas. [1]

La principal función de una planta de tratamiento de agua es reducir o evitar los impactos negativos al ambiente, y a la salud humana. Sin embargo, este proceso tiene una serie de impactos negativos, debido a las propias características de las aguas que llegan a la planta, las cuales pueden contener patógenos especialmente durante el amontonamiento de lodos [2][3]. Los principales patógenos que se pueden encontrar en estos lodos son protozoos y nematodos intestinales, como *Cryptosporidium* y *Giardia duodenales* los cuales pueden causar infecciones crónicas y asintomáticas. [4][5]

Los lodos de agua residual son residuos semisólidos derivados del proceso de tratamiento de agua residual, los cuales se consideran el principal foco de contaminación en el proceso de tratamiento de aguas [6], pero en los últimos años estos se han considerado como materia prima o insumo para diferentes procesos, para la producción y generación de abonos, debido a la alta concentración de nitrógeno, fósforo y materia orgánica los cuales promueven, facilitan el crecimiento de los cultivos y aceleran el crecimiento de las raíces y frutos acortando el tiempo de cosecha. [7]

Una planta de tratamiento de agua residual suele constar principalmente de cuatro etapas: preliminar, primaria, secundaria y avanzada de las cuales se tiene como residuo diferentes tipos de lodos con diferentes categorías y características; los lodos primarios o lodos crudos suelen ser lodos activados o lodos mezclados [8]; los lodos que proceden de un tratamiento secundario es un lodo activado por los residuos o excesos presentes en el proceso de flotación por aire disuelto que suelen mezclarse ambos para ser enviados a digestores anaerobios y este proceso suele ser alrededor del 70% del costo total del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales.[9][10]

El aumento exponencial de la población aumenta la demanda de los servicios básicos y de saneamiento lo que requiere un mayor abastecimiento de agua y en consecuencia aumenta el volumen del agua residual a tratar, aumentando a su

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

4

vez la generación de lodos en proporción al agua tratada por peso resulta ser más del 70% de lodos y al ser tan alto el costo de su tratamiento, los mismo se han venido almacenando, lo cual ha generado un colapso en las diferentes plantas de tratamiento, en países de Europeos o Estados Unidos, según datos de 2018, aumentó un 50% la producción de lodos, lo que casi son 10,9 millones de toneladas [11]. Siendo imposible su tratamiento en los diferentes bio digestores existentes [12], en China también es un problema, ya que en el año 2017 se trataron 172 millones de toneladas de lodos, pero solo representa el 55% de los lodos tratados y el resto fueron dispuestos al ambiente sin ser tratados. [13]

Impactos ambientales de los lodos

En un compilado de estudios de diversas plantas de tratamiento de aguas residuales cuyos lodos fueron usados como abono para cultivos, los cuales un porcentaje de 79% reciben diferentes pretratamientos como electro deshidratación, secado térmico o estabilización con cal, mientras que el 21% restante son dispuestos sin tratamiento previo directamente a los campos de agricultura contaminando los suelos otorgando características no aptas para futuro uso agrícola [14].

Los principales impactos de los lodos derivados del tratamiento de agua residual son:

- Uno de los principales impactos que tienen los lodos es la presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y olores ofensivos, los cuales pueden ser mercaptanos, compuestos inestables o compuestos aromáticos volátiles [10]. La emisión de componentes como amoniaco - NH_3 , ácido sulfhídrico - H_2S son los principales componentes del olor desagradable de la planta lo cual ha obstaculizado a que comunidades permitan la construcción de estas instalaciones [7].
- Otras emisiones atmosféricas son los sulfuros orgánicos volátiles, ácidos grasos volátiles, alcoholes, aldehídos, cetonas, terpenos y aromáticos, dichos compuestos junto con los VOC son aceleradores del agotamiento de la capa de ozono, smog químico y formación de ozono troposférico, debido a esto 74 ciudades en china han tenido problemas ambientales debido a este fenómeno y algunas de estas son causadas por la presencia de plantas de tratamiento ubicadas en el río Yangtsé [7][15].
- Otro impacto y limitante para tratar las aguas residuales es que pueden contener micro plásticos, metales pesados o con trazas de medicamentos como el ibuprofeno [16] lo cual no se pueden retirar del modo establecido o pueden afectar y matar las comunidades microbianas que realizan la digestión anaerobia, método de tratamiento de lodos más usados. En el caso de los micro plásticos se encontró que en una planta específica se

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

5

liberaban 300 millones de partículas de micro plásticos por día al río Henares ubicado cerca de la ciudad Madrid España lo cual se traduce a 350 partículas por metro cúbico, la misma planta presenta que captura 81.011 partículas de plástico al año en los lodos de la planta de tratamiento.[17]

- Los metales pesados también se encuentran en los lodos, el Arsénico metal altamente tóxico y que limita el uso de los lodos en el campo de la agricultura y para el proceso de tratamiento en si mismo ya que puede afectar a la comunidad microbiana de la digestión anaerobia. [18][19]
- Uno de los impactos que más preocupa es la presencia de agentes patógenos en los lodos, patógenos como *E. coli*, *Salmonella* y *Mycrobacterium*, en Sudafrica estos patógenos presentaron un aumento de casos del 150% y 200% de niños con diarrea, en las comunidades que empezaron a asentarse cerca de alguna PTAR. Frente a esta situación se está experimentando con rayos ultravioleta directamente sobre los lagos con estas aguas residuales, cuyos resultados son la disminución de estas enfermedades en la población de la niñez [2][4].
- Los lodos aparte de las sustancias anteriormente mencionadas también puede incluir trazas de triclosan (TCS) producto usado como desinfectante anti bacteriano en los productos de cuidado personal; estas descargas tienen un elevado impacto ambiental debido a que las aguas con trazas de TCS en un ecosistema pueden afectar el metabolismo de seres vivos dada su toxicidad y por ende el ecosistema inclusive afectan el mismo proceso de tratamiento del agua residual ya que el triclosan tiene un efecto fungicida afectando a las comunidades microbianas presentes en los lodos activados o en los bio digestores. [20][15]

Metodologías existentes para el tratamiento de los lodos

Se han presentado varios métodos para el tratamiento de estos lodos, desde incluirlos como combustible, mezclándolos con la madera, pero estas medidas conllevan un alto costo económico e implementación de tecnologías, lo cual requiere espacio físico. por tanto se hace prioritario fijar políticas ambientales y estímulos económicos para que las plantas de tratamiento opten por realizar tratamientos a los lodos y cogeneracion de energía.[21][22]

Electro deshidratación

Electro deshidratación es un tratamiento de lodo que consiste en la aplicación de un campo eléctrico durante la compresión de lodos, teniendo un consumo eléctrico de 0,45KW/h y 0,55KW/h por cada metro cúbico tratado. Funciona al inyectar una corriente eléctrica, acelera la cinética llevando a una deshidratación más rápida.

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

6

Es importante indicar que la corriente eléctrica con mayor eficiencia en este proceso es la de 200mA, logrando la disminución en promedio de un 50% del volumen. El problema es que este procedimiento es tan solo un pretratamiento ya que el residuo solo perdió volumen, su alto consumo energético y generación de calor es muy alto. [23]

En Italia se ha evaluado el uso de esta tecnología la cual plantea que es un pretratamiento para mejorar la eficiencia de la generación energética por incineración, esto mejora y facilita su transporte disminuyendo los impactos negativos derivados del traslado de los lodos, disminuyendo 103Kg a 32kg de CO₂. Lo anterior determina una reducción de costos y en Italia se han tenido avances en la creación de unos incentivos del 15% del costo total de instalación de mecanismos para eliminación de lodos. [21], lo que conlleva a evidenciar que realizando este pretratamiento la eficiencia de la incineración aumenta un 40% y también disminuye la emisión de sólidos volátiles, pero requiriendo una presión de 300Kpa y un consumo eléctrico de 0,6 KW/h. [24]

Hidrólisis térmica

La hidrólisis térmica consiste en calentar la superficie del lodo por encima de su punto de ebullición a presión por inyección de vapor saturado, el cual es eficiente para disminuir la demanda química de oxígeno (DBO) y remoción de materia orgánica y lograr una mejor digestión anaeróbica, y la producción de biogás. Esto funciona como pretratamiento para una producción de biogás, ya que controla y ayuda a remover sustancias limitantes para la digestión anaerobia. [25] En China se ha demostrado que para el mejoramiento de la eficiencia del proceso se pueden incluir aditivos como cloruro de aluminio polimérico (PACl), cloruro de hierro (III) (FeCl₃), [26] llegando a mejorar la eficiencia del proceso de tratamiento en general alrededor de un 1% o 2%. [27]

Estos aditivos mejoran la remoción de sustancias que puedan llegar a afectar la digestión anaerobia, disminuyendo también la demanda química de oxígeno lo cual da como resultado que los lodos sean menos tóxicos, facilitando así su transporte. [28]

En España se ha demostrado, a través de proyectos pilotos de tratamiento de lodos en siete plantas, cómo la hidrólisis térmica en lodos funciona como pretratamiento debido a su capacidad de remoción de sólidos, material orgánico y nitrógeno teniendo eficiencia de una remoción del 50% y en el caso de una doble hidrólisis térmica una eficiencia del 80% aunque se encontraron microcontaminantes no definidos ni caracterizados que no fueron removidos por este sistema; generando un biosólido menos tóxico y más eficiente para un tratamiento final. [25]

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

7

Como limitante, la eficiencia energética suele ser baja, ya que va del 13,5% al 18,8% [22] la eficiencia energética suele ser baja debido a que varía entre el 13,5% y 18,8%, debido a la pérdida significativa de energía en el ambiente que ocurre en el calentamiento generando una sensación térmica elevada por lo cual es recomendable realizar un proceso de precalentamiento del 76% o 88,7% de la materia prima [25], a si la pérdida de energía baja a 34,5%. [22]

Deshidratación avanzada

Es el proceso que funciona como pretratamiento de deshidratación usando dimetil éter licuado (L-DME) el cual puede eliminar el 90% del agua y reducir alrededor de 60% del volumen de los lodos; el 100% de los lípidos y entre 8 % a 12% de material orgánico ya que solo remueve la materia orgánica hidrófila la cual produce dos sustancias: el lodo seco y una mezcla de material removido, el único inconveniente es la disposición de la mezcla de material retirado ya que contiene varios contaminantes y no se puede disponer fácilmente, ya que es un proceso en exceso sensible a la temperatura y se tiene que mantener en 15 grados centígrados.[29]

Uso como abono

Una de las metodologías es el uso como abono en la actividad agrícola mediante el compostaje, debido a que estos lodos contienen altas concentraciones de nitrógeno y materia orgánica que mejoraran las propiedades físicas del suelo, garantizando un mayor crecimiento en las plantas [31], el problema radica en que el compostaje no está diseñado para tratar contaminantes orgánicos o metales pesados.

Estos lodos utilizados como abonos, pueden contener sustancias tóxicas como las trazas de nonifenol, las cuales se originan a partir de la biodegradación de los etoxilatos. Este fenómeno se ha identificado en algunas plantas de la China, (concentraciones de dicho contaminante aproximadamente de 103mg en 1 Kg), dicha sustancia es peligrosa ya que es alteradora del sistema endocrino que puede ingresar a un ser humano a través de la cadena alimentaria y afectar el hígado y los órganos reproductores. [19] Otro contaminante importante presente son los iones de plata los cuales son bio acumulativos y generadores de células cancerígenas y también, ingresan al cuerpo humano a través de la cadena alimenticia y al ser iones pueden afectar el metabolismo celular. [14]

Por otra parte, el reciclado de los lodos para aplicaciones terrestres como sustitutos de los fertilizantes no fue una estrategia favorable en este estudio de caso, ya que los impactos ambientales generados fueron aproximadamente 6,5% veces más que en el escenario básico debido a los impactos de la eutrofización y facilita los procesos de erosión. [1]

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

8

Para el uso de los lodos como abono o fertilizante se ha calculado ciertos parámetros para no afectar de manera tan negativa a los campos donde se desean usar.

Se requiere que el ph esté en el rango de 4,5 a 9,5 para apoyar el crecimiento y producción de plantas; no debe tener presencia de metales pesados los cuales son difíciles de retirar, en el caso de las plantas de tratamiento en Brasil son Cd y Bn [30], tener una concentración de 20% por metro cúbico de nitrógeno y fósforo para evitar eutrofización y evitar la contaminación a los agroecosistemas, y daño al suelo, pero, que logre aportar los nutrientes necesarios para funcionar como fertilizante.[32]

Para la disminución de concentraciones de nitrógeno el cual se realiza en una planta de tratamiento convencional en China se han establecido tecnologías de des - nitrificación parcial simultanea (SPND) a través de biorreactores de dos etapas logrando una disminución de contenido de nitrógeno alrededor de 51,1% y una tasa de oxidación de amoniaco 0,117kg por metro cúbico de nitrógeno usando microorganismos tales como Candidatus Brocadia y Candidatus Kuenenia; y si se manejará de manera más efectiva el volumen de entrada del flujo se podría tener disminuciones de nitrógenos hasta por un 88,24%. [33]

Incineración para producir energía

Es el proceso que consiste en trasportar los lodos a un horno y que funcionen como combustible, para reducir el consumo de combustibles fósiles como carbón o derivados del petróleo teniendo como principal ventaja no tener inconvenientes de patógenos ni de trazas de fármacos y así lograr generar energía eléctrica que se puede emplear en el funcionamiento de la misma PTAR. [34]

Uno de los aprovechamientos de los lodos se encuentra en el país africano Lituania cuyo país está produciendo alrededor de 82.000 toneladas de lodo al año. Estos lodos se someten a un tratamiento de secado previo y necesitan una deshidratación para que sea mas sencillo su almacenamiento y poder ser usados como combustible, junto con la madera, remplazando el carbón, lo cual tiene como inconveniente la emisión de COV y CO₂ al ambiente. [12][1]

Uno de los países que ha adaptado hornos de incineración para generar energía es China, ya que la cantidad de generación de este residuo es bastante alta, por lo que usan una mezcla de los lodos con alguna otra biomasa, pero teniendo un impacto altísimo en la calidad del aire, ya que tiene emisiones de sustancias toxicas, gases de efecto invernadero y aceleradores de la degradación de la capa de ozono. [35] También generando gases de corrosión como la pirssonita CaSO₄ lo que puede generar afectaciones a la salud humana como problemas en la piel y en el sistema respiratorio, y, por otro lado, deteriora las paredes del horno. [36]

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

9

En Shen-Zhen se está usando una mezcla de lodos con biomásas como cáscara de arroz, maní y aserrín de pino (80% de biomasa y 20% de lodos) teniendo un mejor efecto de combustión que solo incinerando los lodos por aparte y disminuyendo las emisiones de compuestos derivados de dióxido de nitrógeno (NOXS) y dióxido de azufre (SO₂). [37]

Como principal impacto negativo del proceso de incineración son las emisiones altas de compuestos orgánicos volátiles (COV), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de Carbono (CO₂), compuestos derivados de dióxido de nitrógeno (NOXS) y metales pesados, para ello se propuso una metodología en el Reino Unido para disminuir esas emisiones, el uso de una mezcla de los lodos con piedra caliza el cual disminuyó la presencia de todas las sustancias anteriormente mencionadas, pero, aumentando las concentraciones de material particulado (de terminados y medidos en los tamaños de pm10 y pm2,5) y monóxido de carbono CO lo cual se puede solucionar con una serie de filtros y tecnologías capaces de capturar el material particulado como ciclones o filtros de mangas, teniendo un aumento en los costos de la inversión económica por un lado y por otro lado teniendo una producción de metales semi - volátiles en el horno el cual puede quitarle vida útil al mismo. [38]

Otra de las ventajas del uso de esta metodología, es la recuperación de minerales de las cenizas, permite la recuperación aproximadamente del 90% de fosfatos y otros metales, aunque la tecnología actual no ha permitido su recuperación total [39]. En Alemania se ha visto que con una mono incineración de lodos residuales facilita la recuperación de fósforo de las cenizas, el almacenamiento de cenizas debe hacerse en lugares que permitan la captura de material particulado que se puede presentar con la manipulación y transporte de las cenizas. [40]

Uso como materia prima para la elaboración de hormigón

Una metodología para convertir este residuo en materia prima es a través del aprovechamiento de materiales presentes en las cenizas de lodos como el SiO₂, Al₂O₃ y el Fe₂O₃, los cuales pueden ser una alternativa para el reemplazo del cemento en el sector de la construcción,[41][42]; en Colombia específicamente en Barranquilla se han hecho prototipos de mortero con un porcentaje de 10% y 30% de concentración de ceniza de lodo y a diferentes temperaturas de calcinación (600 grados centígrados y 800 grados centígrados) Respectivamente. [41]

Aunque los morteros con 30% de lodos y a 800 grados centígrados mostraron un comportamiento muy similar, a un mortero sin lodos. Se pudo observar, que con una concentración del 10% se hace más resistente. Se debe tener cuidado con las reacciones entre el cuarzo y los compuestos alcalinos, ya que pueden causar gel de sílice hidrófilo y por lo tanto genera una deformación del hormigón cuando este entre en contacto con agua lo que conlleva a que pueda perder resistencia lo cual

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

10

limita su aplicación [41], y se requiere un consumo elevado de energía para el funcionamiento de los equipos necesarios para su elaboración. [22]

Mientras que en Brasil manejan las mismas temperaturas de calcinación pero extendiendo su periodo de incineración a 1 hora [42] en comparación con los 40 minutos empleados en Colombia [41] y agregando un aditivo óxido de calcio y óxido de magnesio (CaO + MgO) con una concentración del 1,7% el cual es útil para que el hormigón consiga mayor dureza y no genere deformaciones. La diferencia entre estas dos experiencias es que en Brasil se realizó a gran escala y en Colombia como una experiencia piloto. [42]

Mientras que en Italia se realizó el mismo procedimiento que en Colombia, pero no sustituyeron el cemento si no la arena en un 30%, se quiso observar qué impacto puede tener la inclusión de cal a las cenizas de los lodos, se encontró que la cal debilita la eficiencia del hormigón debido a que baja la producción de CaCO_3 cristalino y por ende las plantas que usen la cal en el tratamiento de aguas residuales deberán o bien retirar la cal o no podrán desarrollar el proceso de elaboración del hormigón. [43][44]

Uso como tratamiento ambiental

Este método se ha manejado en Brasil, el cual consiste en tomar una porción de los lodos que se obtienen como residuos en las PTAR como materia prima para su uso como lodos activados en el proceso de tratamiento secundario en una proporción del 30% de estos residuos y el resto adquiridos de un proveedor, pues dio muestras que es un buen catalizador para la degradación de los componentes orgánicos ya que fue capaz de eliminar el 97% de color y eliminación de COV a los 420 minutos de reacción [8]. Aunque la proporción de lodos de residuos usados para esta metodología es mínima en comparación con la cantidad generada diaria, es una forma de reingresar estos desechos en el ciclo productivo.

Consumo energético de procesos de tratamiento

El caso base que tienen las islas Kimen, es el uso de zanjas de oxidación y este proceso representa el 70% del consumo energético del total de la planta teniendo una eficiencia de tratar 1 metro cúbico de agua consumiendo 0,38KW/h, aclarando que las emisiones de COV y CO_2 son altas; otro escenario es usar los lodos como fertilizante para aplicaciones agrícolas el cual tiene un consumo menor de energía usando 0,12KW/h para tratar el mismo metro cúbico pero trayendo alrededor de 6,5% más impactos al suelo donde es puesto el abono a partir de lodos; el último panorama es el uso de la incineración para la generación de energía el cual se está usando bastante en países como Japón y China la cual tiene como ventaja la eliminación de patógenos y presenta una recuperación energética de un 15,36% que

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

11

se usa en el funcionamiento del resto de actividades de la planta pero tiene una emisión de COV y CO₂ muy alto.[1]

Aunque en este proyecto comparativo no se tomaron en cuenta los procesos de electro deshidratación que tiene un consumo energético más alto presentando valores de 0,555 KW/h por metro cúbico tratado, [1] y la hidrólisis térmica con un consumo elevado por mantener las temperaturas necesarias siendo ambas pre tratamientos que mejoran la eficiencia de los tratamientos finales.

Propuesta de generación de energía eléctrica a partir de biogás teniendo como materia prima los lodos de una PTAR

La digestión anaerobia de residuos tiene varios beneficios ambientales como la disminución en la emisión de gases efecto invernadero si se compará con la incineración directa [45], la digestión anaeróbica de los lodos produce como principal subproducto el biogás (metano 70%, dióxido de carbono 30% y trazas de amoniaco, óxidos de azufre (SOXS) puede tener varias aplicaciones como combustible a partir de micro turbinas, generación eléctrica, generación de calor [11]. Teniendo en cuenta que se necesitan un pre tratamiento que reduzcan los niveles de DBO, DQO y nitrógeno ya que pueden producir emisiones y producción de amoníaco o pueden presentar sustancias que afecten a la comunidad microbiana. [45]

Se realizó una planta piloto y en escala con parámetros control lodos en Italia con un reactor anaerobio de una capacidad de 100 litros y una temperatura controlada de 35 grados centígrados, dando como resultado que en proporción puede generar en una planta de tratamiento real, una producción de 0,12KW/h.[45] Para realizar la digestión anaerobia se tienen variables de control ya que es sensible a la temperatura(35-37°C) y el ph (valores de 6,5)[45] debido a que la temperatura muestra una relación directa con la calidad del biogás producido ya que influye drásticamente en las comunidades microbianas que tengan una producción de gasmesofilico.[46]

Para la implementación de esta tecnología, de manera industrial se debe realizar inversiones para la compra de equipos necesarios, a parte de los digestores anaerobios como gasómetros, compresores, desulfadores, y turbinas o motor-generator (para la generación de gas se recomienda el uso de motores en vez de las turbinas ya que son 1,5 veces más eficiente).[11]

El biogás generado en los biodigestores se envía a los gasómetros el cual es un sistema de doble membrana que cumplen con la función de acumular y regular el volumen de descarga; luego el desulfurador realiza las eliminaciones de H₂S mediante la reducción de Fe₂O₃ debido a que si no se realiza este proceso se pueden generar SO₂ y H₂SO₄ los cuales pueden corroer los motores; luego ya viene el paso de un compresor y posteriormente al motor generador de electricidad.[11]

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

12

El principal problema de este método es que no es económicamente viable ya que el proceso más usado es el uso de estos lodos como fertilizantes y como se ha mencionado anteriormente conlleva consigo unos impactos negativos muy altos [45] como por ejemplo mientras se produce 1 tonelada de biogás a partir de lodos al año en Brasil, se producen alrededor de 88 millones de toneladas de fertilizantes y abonos a partir de los lodos.[11] Pero se ha evidenciado que la producción de energía en las plantas de tratamiento puede hasta cubrir la demanda de la propia planta que es muy alto, ya que como se observa en Brasil se puede obtener 23,6 GW/h al año solo con los lodos de la región de Minas Gerais, [4]. Teniendo una eficiencia entre el 35,25% y 46,3% dependiendo de las características del lodo. [47]

La reutilización de los lodos como energía eléctrica en el ciclo productivo del tratamiento de agua residuales tiene impactos positivos, uno de estos hace referencia a la reducción en la producción de energía eléctrica a nivel local, disminuyendo la demanda de energía frente a la red de distribución nacional al reemplazar esta fuente de suministro energético por una fuente de energía derivada del consumo de biogás, ya que el consumo eléctrico de una PTAR es en promedio 962 MW/h al año [48] y el aprovechamiento de 2,45 millones de metros cúbicos de lodo al día en promedio. Teniendo en cuenta que en ciudades como Hong Kong, China que producen 2,5 millones toneladas de lodos derivados de este proceso, ésta metodología se presenta como una buena alternativa para el uso de estos residuos.[49]

Aunque como se mencionó anteriormente el costo económico que tiene el uso de esta tecnología es alto, pero es la que mejor eficiencia demuestra. El costo de esta alternativa es bastante alto de acuerdo al periodo de retorno de inversión que oscila de 15 a 17 años, dicho retorno de inversión se efectúa con un ente mediante la comercialización de abono y fertilizante sin embargo provee de mayor eficiencia [11][50], por Ejemplo, en China en una planta de Hong Kong se muestra que un sistema de conversión de lodos la energía eléctrica por digestión anaerobia presentó una eficiencia técnica general de 0,42% lo cual puede tener una recuperación energética y económica del total de la inversión alrededor de 15 a 17 años, o si se tienen incentivos normativos en menor tiempo[49].

Pero la misma planta de tratamiento en China realizó una comparación con la implementación de incineradores para la producción de energía eléctrica y presentó una eficiencia técnica general de 172,24% lo cual para inversionistas es una metodología más llamativa [49], la única ventaja que presentaría la generación de biogás es la disminución de gases efecto invernadero, COV y material particulado que se presentan en el proceso de incineración. [1]

Ventajas y desventajas de generación de energía eléctrica a partir de biogás resultante de la biodigestión de lodos.

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

13

A partir de la información anterior se elaboró un cuadro donde se pueden comparar las metodologías mencionadas excluyendo los pretratamientos.

Tabla 1. Comparación entre metodologías

COMPARATIVA DE METODOLOGIA FRENTE A LA PRODUCCION DE BIOGAS		
Metodología	Ventaja de la generación de biogás	Desventaja de la generación de biogás
Uso como abono	No genera tantos impactos al ambiente, suelo, y salud humana	Tiene un requerimiento económico y de infraestructura mayor y es económicamente menos viable
Incineración	No tiene una generación de emisiones de gases de efectos invernaderos ni de material particulado	Tiene un requerimiento económico y de infraestructura mayor y es económicamente menos viable
Elaboración de Hormigón	Usa más lodo como materia prima y comercialmente viable	Necesita una inversión mayor y no tiene tantos usos como el hormigón
Uso como tratamiento ambiental	Usa más lodo como materia prima y comercialmente viable	Al ser un mecanismo netamente de manejo de residuos puede tener menor incentivo normativo

Fuente: Elaboración propia

En resumen, la principal desventaja es su alto costo económico y de infraestructura, pero se compensa por ser ambientalmente sostenible, al tener menos impactos negativos frente al uso como abono o la incineración, frente al hormigón y como lodo activado que son tecnologías que no están tan avanzadas y presentan problemas en su aplicación. [51]

Posible aplicación de esta metodología en Colombia

Aprovechando que la PTAR Salitre ubicada en Bogotá D.C, está en proceso de ampliación e incluir procesos para mejorar el tratamiento de aguas residuales que llegan a la planta, se propone la de energía. A partir de los lodos depurados con tratamientos secundarios, el potencial de generación de biogás es de 28 m^3 1000 habitantes día, en la PTAR Salitre se tratan aguas de aproximadamente 2.000.000 habitantes. Este biogás que se genera tiene un potencial calorífico inferior de 5.250 Kcal/m^3 el cual es el potencial calorífico de los lodos al ser incinerados en hornos, por lo tanto es una de las razones por la que se prefiere optar por la incineración y no por la generación de biogás.[51]

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

14

Para estimar el potencial energético de la biomasa residual se deben aplicar las siguientes ecuaciones:

- Cálculo del total de residuos orgánicos

$$TRO = gen R * \%org$$

Ecuación 1. Fuente: [52]

- Biogás generado

$$bio\ gen = TRO * 1000 * Bres$$

Ecuación 2. Fuente: [52]

- Cantidad de metano del biogás generado

$$Metano = bio\ gen * \%met$$

Ecuación 3. Fuente: [52]

- Generación de energía en horas

$$Generacion = gen E * Metano * Ef$$

Ecuación 4. Fuente: [52]

- Consumo per capital por día

$$Cons P = percapital / 365$$

Ecuación 5. Fuente: [52]

- Personas que se pueden abastecer

$$personas = Generacion / Cons P$$

Ecuación 6. Fuente: [52]

- Porcentaje de población abastecido

$$\%abs = (personas * 100) / pob$$

Ecuación 7. Fuente: [52]

Donde:

Tabla 12. Definición de variables

Variable	Descripción
----------	-------------

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

15

gen R	generación de residuos en toneladas
%org	porcentaje de residuos orgánicos
TRO	total residuos orgánicos
Bres	biogás a partir de residuos (m ³ /kg)
bio gen	biogás generado (m ³)
%met	porcentaje de composición de metano
Generación	generación de energía (KEW/H)
genE	generación de energía a partir del metano (KWH/M ³ Gas)
Ef	Eficiencia de los motores o turbinas para generación de energía eléctrica
ConsP	consumo per capital por día (KWH/DIA)
Per capital	consumo per capital de energía al año (KW/año)
%abs	porcentaje de abastecimiento
pob	población total del último censo

Fuente: [52]

Con este primer acercamiento teórico se puede evidenciar que se puede obtener altas cantidades de energía eléctrica a partir de biomasa, permitiendo reemplazar una cantidad considerable de toneladas de combustibles fósiles para la producción de energía, su implementación conlleva una serie de beneficios entre los cuales son la disminución de los gases de efecto invernadero y por ende una disminución del impacto ambiental a nivel industrial. [53]

BIBLIOGRAFIA

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

16

- [1] Shiu, H., Lee, M., & Chiueh, P. (2017). Water reclamation and sludge recycling scenarios for sustainable resource management in a wastewater treatment plant in kinmen islands, taiwan.
- [2] Deepnarain, N., Nasr, M., Amoah, I. D., Enitan-Folami, A. M., Reddy, P., Stenström, T. A., . . . Bux, F. (2020). Impact of sludge bulking on receiving environment using quantitative microbial risk assessment (QMRA)-based management for full-scale wastewater treatment plants.
- [3] Amin, M. M., Taheri, E., Ghasemian, M., Puad, N. I. M., Dehdashti, B., & Fatehizadeh, A. (2020). Proposal of upgrading isfahan north wastewater treatment plant: An adsorption/bio-oxidation process with emphasis on excess sludge reduction and nutrient removal.
- [4] Benito, M., Menacho, C., Chueca, P., Ormad, M. P., & Goñi, P. (2020). Seeking the reuse of effluents and sludge from conventional wastewater treatment plants: Analysis of the presence of intestinal protozoa and nematode eggs.
- [5] Tong, J., Fang, P., Zhang, J., Wei, Y., Su, Y., & Zhang, Y. (2019). Microbial community evolution and fate of antibiotic resistance genes during sludge treatment in two full-scale anaerobic digestion plants with thermal hydrolysis pretreatment.
- [6] Benedetti, B., Majone, M., Cavaliere, C., Montone, C. M., Fatone, F., Frison, N., . . . Capriotti, A. L. (2020). Determination of multi-class emerging contaminants in sludge and recovery materials from waste water treatment plants: Development of a modified QuEChERS method coupled to LC-MS/MS
- [7] Nie, E., Zheng, G., Gao, D., Chen, T., Yang, J., Wang, Y., & Wang, X. (2019). Emission characteristics of VOCs and potential ozone formation from a full-scale sewage sludge composting plant
- [8] Verrelli, D. I., Dixon, D. R., & Scales, P. J. (2009). Effect of coagulation conditions on the dewatering properties of sludges produced in drinking water treatment
- [9] Chen, T., Yang, J., Wang, Y., & Wang, X. (2019). semisólido o líquido. La comprensión del comportamiento del flujo y las propiedades reológicas de los lodos de depuración en diferentes secciones de una planta de tratamiento de aguas residuales (EDAR)
- [10] Byliński, H., Aszyk, J., Kubica, P., Szopińska, M., Fudala-Książek, S., & Namieśnik, J. (2019). Differences between selected volatile aromatic compound concentrations in sludge samples in various steps of wastewater treatment plant operations
- [11] Felca, A. T. A., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., dos Santos, Ivan Felipe Silva, & Ribeiro, E. M. (2018). Analysis of biogas produced by the anaerobic digestion of

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

17

sludge generated at wastewater treatment plants in the south of minas gerais, brazil as a potential energy source doi

[12] Praspaliauskas, M., & Pedišius, N. (2017). A review of sludge characteristics in lithuania's wastewater treatment plants and perspectives of its usage in thermal processes

[13] Pan, J., Cai, H., Zhang, Z., Liu, H., Li, R., Mao, H., . . . Zhai, L. (2018). Comparative evaluation of the use of acidic additives on sewage sludge composting quality improvement, nitrogen conservation, and greenhouse gas reduction

[14] Bolaños-Benítez, V., McDermott, F., Gill, L., & Knappe, J. (2020). Engineered silver nanoparticle (ag-NP) behaviour in domestic on-site wastewater treatment plants and in sewage sludge amended-soils

[15] Jiménez-Silva, V. A., Santoyo-Tepole, F., Ruiz-Ordaz, N., & Galíndez-Mayer, J. (2019). Study of the ibuprofen impact on wastewater treatment mini-plants with bioaugmented sludge

[16] Martín, J., Camacho-Muñoz, D., Santos, J. L., Aparicio, I., & Alonso, E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in wastewater and sludge from wastewater treatment plants: Removal and ecotoxicological impact of wastewater discharges and sludge disposal

[17] Edo, C., González-Pleiter, M., Leganés, F., Fernández-Piñas, F., & Rosal, R. (2020). Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge

[18] Zhai, W., Qin, T., Li, L., Guo, T., Yin, X., Khan, M. I., . . . Xu, J. (2020). Abundance and diversity of microbial arsenic biotransformation genes in the sludge of full-scale anaerobic digesters from a municipal wastewater treatment plant

[19] Zheng, G., Wang, T., Niu, M., Chen, X., Liu, C., Wang, Y., & Chen, T. (2018). Biodegradation of nonylphenol during aerobic composting of sewage sludge under two intermittent aeration treatments in a full-scale plant

[20] Zheng, G., Yu, B., Wang, Y., Ma, C., & Chen, T. (2020). Removal of triclosan during wastewater treatment process and sewage sludge composting—A case study in the middle reaches of the yellow river

[21] Zhang, H., Rigamonti, L., Visigalli, S., Turolla, A., Gronchi, P., & Canziani, R. (2019). Environmental and economic assessment of electro-dewatering application to sewage sludge: A case study of an italian wastewater treatment plant

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

18

- [22] Ruya, P. M., Purwadi, R., & Lim, S. S. (2020). Supercritical water gasification of sewage sludge for power generation– thermodynamic study on auto-thermal operation using aspen plus
- [23] Olivier, J., Conrardy, J., Mahmoud, A., & Vaxelaire, J. (2015). Electro-dewatering of wastewater sludge: An investigation of the relationship between filtrate flow rate and electric current
- [24] Visigalli, S., Turolla, A., Gronchi, P., & Canziani, R. (2017). Performance of electro-osmotic dewatering on different types of sewage sludge
- [25] Díaz, I., Díaz-Curbelo, A., Pérez-Lemus, N., Fdz-Polanco, F., & Pérez-Elvira, S. I. (2020). Traceability of organic contaminants in the sludge line of wastewater treatment plants: A comparison study among schemes incorporating thermal hydrolysis treatment and the conventional anaerobic digestion
- [26] Li, L., Ai, J., Zhang, W., Peng, S., Dong, T., Deng, Y., . . . Wang, D. (2020). Relationship between the physicochemical properties of sludge-based carbons and the adsorption capacity of dissolved organic matter in advanced wastewater treatment: Effects of chemical conditioning
- [27] Taboada-Santos, A., Lema, J. M., & Carballa, M. (2019). Energetic and economic assessment of sludge thermal hydrolysis in novel wastewater treatment plant configurations
- [28] Lim, S., Jeon, W., Lee, J., Lee, K., & Kim, N. (2002). Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess
- [29] Chen, L., Zhu, W., Lin, N., Mu, B., Fan, X., Wang, C., . . . Zhong, J. (2020). Mechanism of separation and removal of water from dewatered sludge using L-DME to dissolve hydrophilic organic matter
- [30] Grassi, P., Drumm, F. C., Georgin, J., Franco, D. S. P., Foletto, E. L., Dotto, G. L., & Jahn, S. L. (2020). Water treatment plant sludge as iron source to catalyze a heterogeneous photo-fenton reaction
- [31] Głab, T., Żabiński, A., Sadowska, U., Gondek, K., Kopeć, M., Mierzwa-Hersztek, M., . . . Stanek-Tarkowska, J. (2020a). Fertilization effects of compost produced from maize, sewage sludge and biochar on soil water retention and chemical properties
- [32] Badza, T., Tesfamariam, E. H., & Cogger, C. G. (2020). Agricultural use suitability assessment and characterization of municipal liquid sludge: Based on south africa survey

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

19

- [33] Zhang, W., Peng, Y., Zhang, L., Li, X., & Zhang, Q. (2020). Simultaneous partial nitrification and denitrification coupled with polished anammox for advanced nitrogen removal from low C/N domestic wastewater at low dissolved oxygen conditions
- [34] Yu, Z., Yousaf, K., Ahmad, M., Yousaf, M., Gao, Q., & Chen, K. (2020). Efficient pyrolysis of ginkgo biloba leaf residue and pharmaceutical sludge (mixture) with high production of clean energy: Process optimization by particle swarm optimization and gradient boosting decision tree algorithm
- [35] Zhong, R., Wang, C., Zhang, Z., Liu, Q., & Cai, Z. (2020). PCDD/F levels and phase distributions in a full-scale municipal solid waste incinerator with co-incinerating sewage sludge
- [36] Zhao, J., Li, B., Wei, X., Zhang, Y., & Li, T. (2020). Slagging characteristics caused by alkali and alkaline earth metals during municipal solid waste and sewage sludge co-incineration
- [37] Wang, Y., Liu, Y., Yang, W., Zhao, Q., & Dai, Y. (2020). Evaluation of combustion properties and pollutant emission characteristics of blends of sewage sludge and biomass
- [38] Zha, J., Huang, Y., Clough, P. T., Dong, L., Xu, L., Liu, L., . . . Yu, M. (2020). Desulfurization using limestone during sludge incineration in a fluidized bed furnace: Increased risk of particulate matter and heavy metal emissions
- [39] Hao, X., Chen, Q., van Loosdrecht, Mark C. M., Li, J., & Jiang, H. (2020). Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion
- [40] Schnell, M., Horst, T., & Quicker, P. (2020a). Thermal treatment of sewage sludge in germany: A review
- [41] Bohórquez González, K., Pacheco, E., Guzmán, A., Avila Pereira, Y., Cano Cuadro, H., & Valencia, J. A. F. (2020). Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars
- [42] Godoy, Luis Gabriel Graupner de, Rohden, A. B., Garcez, M. R., Costa, E. B. d., Da Dalt, S., & Andrade, Jairo José de Oliveira. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material
- [43] Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W. K., Keegan, A., Li, D., Pham, P. N., . . . Siddique, R. (2020). Properties and microstructure of concrete blocks incorporating drinking water treatment sludge exposed to early-age carbonation curing

Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica

20

- [44] Liu, X., Shi, J., Zhao, Y., Li, Z., & Zhang, J. (2012). Experimental research on lime drying process of mechanical dewatered sludge from a wastewater treatment plant in Beijing
- [45] Di Maria, F., & Micale, C. (2017). Energetic potential of the co-digestion of sludge with bio-waste in existing wastewater treatment plant digesters: A case study of an Italian province
- [46] Bedoya, K., Hoyos, O., Zurek, E., Cabarcas, F., & Alzate, J. F. (2020). Annual microbial community dynamics in a full-scale anaerobic sludge digester from a wastewater treatment plant in Colombia
- [47] Wang, Y., Feng, S., Bai, X., Zhao, J., & Xia, S. (2016). Scum sludge as a potential feedstock for biodiesel production from wastewater treatment plants
- [48] Di Fraia, S., Macaluso, A., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2019). Energy, exergy and economic analysis of a novel geothermal energy system for wastewater and sludge treatment
- [49] Lam, C. M., Hsu, S., Alvarado, V., & Li, W. M. (2020). Integrated life-cycle data envelopment analysis for techno-environmental performance evaluation on sludge-to-energy systems
- [50] Bakshi, M., Liné, C., Bedolla, D. E., Stein, R. J., Kaegi, R., Sarret, G., . . . Larue, C. (2019). Assessing the impacts of sewage sludge amendment containing nano-TiO₂ on tomato plants: A life cycle study
- [51] Mohammadi, A., Sandberg, M., Venkatesh, G., Eskandari, S., Dalgaard, T., Joseph, S., & Granström, K. (2019). Environmental performance of end-of-life handling alternatives for paper-and-pulp-mill sludge: Using digestate as a source of energy or for biochar production
- [52] Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., Levy, A., (2017). Generación de electricidad a partir del biogás capturado de residuos urbanos; Bonco Interamericano del desarrollo.
- [53] Serrato, C., Cepeda, V. (2016) Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de Cundinamarca; Universidad Distrital Francisco José de Caldas