



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio de la incorporación de la hidrólisis térmica como
pretratamiento de fangos en la EDAR Pinedo 2 (Valencia).

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

AUTOR/A: Gómez Fernández-Pacheco, Javier

Tutor/a: Barat Baviera, Ramón

Cotutor/a externo: Jiménez Pallarés, Ángel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

ÍNDICE

1. Introducción.....	4
2. Objetivos del estudio	4
3. Depuración de aguas residuales.....	5
4. Procesos de tratamientos de fangos.....	5
5. Generalidades de la digestión anaerobia	6
4.1 Fase hidrolítica.....	7
4.2 Fase acidogénica	7
4.3 Fase acetogénica	8
4.4 Fase metanogénica	8
5. Claves de la digestión anaerobia.....	9
6. Producción de biogás y potencial energético de los digestores	10
7. Caracterización del fango de depuradora	11
8. Tecnologías de pretratamientos de fangos	12
8.1 Procesos térmicos.....	13
8.1.1 Pretratamientos a bajas temperaturas (< 100 C°).....	14
8.1.2 Pretratamientos a altas temperaturas (> 100 C°).....	14
8.2 Pretratamientos físicos/mecánicos	15
8.2.1 Ultrasonidos	15
8.2.2 Microondas.....	16
8.2.3 Desintegración electrocinética.....	17
8.2.4 Homogenización de alta presión.....	17
8.3 Procesos químicos	18
8.3.1 Pretratamientos ácidos y alcalinos.....	18
8.3.2 Ozonización.....	19
8.3.3 Oxidación con Fentón.....	19
8.4 Pretratamientos biológicos.....	20
8.4.1 Pretratamiento aerobio	20
8.4.2 Digestión en dos fases.....	21
8.4.3 Hidrólisis enzimática	21
8.5 Viabilidad económica de los métodos de pretratamiento de lodos.....	22
9. Introducción a la hidrólisis térmica.....	24
9.1. Hidrolisis térmica: Descripción del proceso	26
9.2 Parámetros de operación de la HT	27
9.2.1 Reducción de sólidos volátiles.....	31

9.2.2 Producción de metano.....	33
9.2.3 Deshidratabilidad del digestato.....	36
9.2.4 DQO soluble de salida.....	37
9.2.5 Nitrógeno	38
9.2.6 Fósforo	39
9.2.7 Rango de temperatura óptimo.....	39
9.3 Formación de inhibidores en hidrólisis térmica	40
9.4 Tecnologías comerciales HT	42
9.4.1 Cambi THP	42
9.4.2 Biothelys.....	44
9.4.3 Exelys	45
9.4.4 TPH ("Thermal Pressure Hydrolisis").....	46
9.4.5 Lysotherm.....	47
9.4.6 Turbotec	48
9.4.7 TeCH4 +	48
9.5. Configuraciones de la hidrólisis térmica	49
15.Estación Depuradora de Pinedo 2	52
15.1 Tratamiento biológico.....	53
15.2 Caracterización del agua residual de Pinedo 2	55
16. Hidrólisis térmica de Pinedo 2.....	57
18. Metodología de laboratorio.....	62
19. Cálculos y resultados del ensayo	63
19. Análisis de datos de funcionamiento	68
20. Balance energético y económico de la hidrólisis térmica.....	76
21. Balance de calor.....	80
22. Simulación de la HT en Pinedo II	82
23. Línea de futura investigación.....	85
24. Conclusiones y reflexiones del estudio	86
24. Referencias	88

RESUMEN

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) son instalaciones que conllevan una serie de procesos y equipos cuya puesta en marcha demanda una gran cantidad de energía. En este sentido, la valorización energética de los residuos producidos y su optimización es el objetivo marcado con el fin de encaminarse hacia la autosuficiencia energética. La digestión anaerobia (DA) es la tecnología más aplicada para el tratamiento, estabilización y valorización energética de fangos producidos en una EDAR. No obstante, su rendimiento en la producción de biogás no es lo suficientemente alto ya que su etapa de hidrólisis limita la cinética global del proceso. La solución a esta problemática se ha centrado en el planteamiento de tecnologías de pretratamiento, como fase de hidrólisis asistida a la entrada de la digestión anaerobia. La hidrólisis térmica es la tecnología de elección con mayor número de referencias a gran escala y mayores ventajas asociadas. No obstante, la implantación de este tipo de instalaciones conlleva un coste de instalación y operación muy alto, con lo que una buena integración energética resulta clave.

Por ello, en este trabajo se ha realizado un estudio centrado en valorar la integración de la tecnología de hidrólisis térmica como técnica de tratamiento de fangos secundarios previa a digestión anaerobia en la línea de lodos de la EDAR de Pinedo 2, Valencia. Se ha observado una clara mejora en la producción de biogás del 28,9% lo cual conlleva a un incremento en la producción de energía cogenerada del 21,7%. No obstante, no se ha reportado ningún beneficio apreciable en la deshidratación del digerido. Por otra parte, el balance económico de la HT ha resultado desfavorable, a causa de los altos costes de mantenimiento y de reactivos usados.

ABSTRACT

Wastewater Treatment Plants (WWTPs) are facilities that involve a series of processes and equipment whose commissioning requires a large amount of energy. In this sense, the energy recovery of the waste produced and its optimisation is the objective set in order to move towards energy self-sufficiency. Anaerobic digestion (AD) is the most widely applied technology for the treatment, stabilization and energy recovery of sludge produced in a WWTP. However, its yield in biogas production is not high enough as its hydrolysis step limits the overall kinetics of the process. The solution to this problem has focused on the approach of pretreatment technologies, as an assisted hydrolysis phase at the entrance of anaerobic digestion. Thermal hydrolysis is the technology of choice with the largest number of large-scale references and the greatest associated advantages. However, the implementation of this type of installation entails a very high installation and operation cost, so good energy integration is key.

Therefore, in this work a study has been carried out focused on assessing the integration of thermal hydrolysis technology as a secondary sludge treatment technique prior to anaerobic digestion in the sludge line of the Pinedo 2 WWTP, Valencia. A dramatic improvement in biogas production of 28.9% has been observed, which leads to an increase in the production of cogenerated energy of 21.7%. However, no appreciable benefit has been reported in the dehydration of the digest. On the other hand, the economic balance of HT has been unfavourable, due to the high costs of maintenance and reagents used.

1. Introducción

La depuración de aguas residuales es un sector en constante cambio y vela por afrontar los nuevos retos que se plantean en la reducción de costes energéticos relacionados al saneamiento de aguas y gestión de los residuos asociados. El propio proceso de depuración conlleva un gasto energético muy elevado, y por ello se deben de estudiar todas las alternativas que surjan a la hora de reducir este consumo. El objetivo principal de estas alternativas es la de recuperar energía y recursos del agua, con el fin de que esto represente un ahorro significativo del elevado consumo asociado a los procesos de depuración.

Asimismo, la valorización energética de fangos producidos de depuradora mediante digestión anaerobia ha resultado ser la solución adoptada en la mayoría de estaciones de depuración; permitiendo la estabilización de la materia orgánica, una significativa reducción en el volumen de lodos y generando biogás. Este producto gaseoso es rico en metano, que puede ser utilizado en motores de cogeneración para la producción de energía de autoconsumo de la depuradora. Por esta razón, la generación y el aprovechamiento energético del biogás en las EDAR es una de las alternativas más importantes a nivel operacional para alcanzar un ahorro significativo en el coste del tratamiento del agua residual, y puede permitir que las instalaciones sean 100% autosuficientes energéticamente.

No obstante, si atendemos a los números productivos de energía en cogeneración, resulta ser un proceso algo ineficiente. Durante la digestión, tan solo un 30-40% de esta materia orgánica se convierte en biogás, mientras que el 60-70% restante de la DQO sale de los digestores sin haberse degradado completamente (Fernández-Polanco, 2008). Por ello, si el objetivo es aumentar la producción de energía los esfuerzos deben centrarse en mejorar la eficiencia de los digestores, ya que estos números muestran un gran potencial de optimización del proceso convencional.

En este sentido, una de las alternativas con mayor trasfondo es la implantación de tecnologías de pretratamientos de fangos cuyo objetivo es mejorar la biodegradabilidad del fango para que aumente el rendimiento de los digestores. Existen diferentes tipos de pretratamientos (físicos, químicos, biológicos... etc.) cuyo objetivo principal es acelerar la fase hidrolítica de la digestión en una instalación de pretratamiento anexa a los digestores. La tecnología con mayor implantación es la hidrólisis térmica (HT), ya que en parte es la que mayor cantidad de beneficios aporta.

Por ello, en el presente trabajo se realizará un análisis en profundidad de la hidrólisis térmica implantada en la depuradora de Pinedo II, valorando sus beneficios y cuantificando su aportación al balance energético-económico de la estación depuradora.

2. Objetivos del estudio

El objetivo principal de este trabajo consistirá en profundizar en el entendimiento de los pretratamientos y la finalidad que persiguen con el fin justificar la implantación de la tecnología de hidrólisis térmica y su configuración en nuestro caso de estudio y evaluar el funcionamiento de la hidrólisis térmica como sistema de pretratamiento de fangos en la ampliación de Pinedo 2.

Se valorará el cumplimiento del principal motivo de instalación de esta tecnología: incrementar la producción de biogás y mejorar la deshidratación del fango (entre otros efectos valorables). Además, se tendrán en cuenta numerosos aspectos estudiados en el periodo de funcionamiento de la HT, valorando su impacto en la planta y posibles alternativas a futuro que se pueden estudiar e implementar en la misma.

Específicamente, los objetivos que busca cumplir el presente estudio son:

- Desarrollar el estado del arte de las distintas tecnologías de pretratamientos y sus implicaciones en la digestión anaerobia.

- Exponer las diferentes tecnologías comerciales de hidrólisis térmica existentes.
- Analizar el funcionamiento de la instalación mediante la cuantificación de los indicadores de funcionamiento propuestos.
- Analizar el potencial de biometanización del proceso. Para ello, se realizarán una serie de comprobaciones a nivel de laboratorio que incluyen:
 - Ensayos BMP con el objetivo de observar el aumento de la capacidad de biometanización en el fango hidrolizado
 - Análisis relacionados con la caracterización del fango a lo largo de su transformación en el proceso HT: ST, SV, DQO total, DQO soluble, NH_4^+ y PO_4^- , respectivamente por tipología de fango.
- Realización de cálculos y balances energéticos y económicos correspondientes tomando como referencia los costes de instalación (CAPEX) y de operación (OPEX) de la HT.
- Confeccionar un modelo de simulación de la depuradora que permita observar la implicación que tiene la hidrólisis térmica en el escurrido tras post-deshidratación.

3. Depuración de aguas residuales

El proceso de depuración de aguas residuales es clave para la separación de corrientes y obtención de agua limpia recuperada, y en algunos casos reutilizable. Esencialmente, la función de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales o EDAR's es la de retirar los contaminantes del agua residual que ha sido utilizada en hogares, procesos, industrias... etc, para devolverla al medio en unas condiciones lo suficientemente óptimas para que no causen un impacto medioambiental negativo en la zona de vertido de las mismas.

Esta remoción de contaminantes se produce de forma secuencial, mediante una gama heterogénea de procesos gobernados por principios físicos, químicos y biológicos (A Muñoz Cruz et al., 2008).

Generalmente, las depuradoras cuentan con diferentes tratamientos que se secuencian siguiendo un orden lógico de eliminación de contaminantes del agua:

1. **Tratamiento primario:** Es la primera línea de tratamiento y tiene como objetivo fundamental la eliminación de los sólidos flotantes, los sólidos en suspensión, las arenas, las grasas, y los aceites. En el tratamiento primario de una EDAR encontraremos: desbaste de sólidos, desarenador, desengrasador, decantación primaria y lagunaje anaerobio. Se tratan de procesos cuyo rendimiento depende de principios físicos.
2. **Tratamiento secundario:** El objetivo principal del tratamiento secundario es la eliminación de materia orgánica y nutrientes, generalmente con un rendimiento de eliminación de material orgánico del 90%. Hay de varios tipos, aunque las más extendidas son los fangos activados y posterior decantación secundaria.
3. **Tratamientos terciarios:** Estos corresponden con la fase final de tratamiento de una EDAR. Su principal función es la eliminación de agentes patógenos, mayoritariamente coliformes totales y fecales. Pueden derivar en una eliminación adicional de materia orgánica y sólidos. Los más comunes suelen ser microfiltración, ozonización o lámparas ultravioletas.

4. Procesos de tratamientos de fangos

Ya se ha comentado que las EDAR's se encargan de realizar los tratamientos necesarios para que la línea de aguas salga de la depuradora con unas condiciones de calidad suficientes para su recuperación y reutilización. No obstante, esta no es la única línea a gestionar de la depuradora. En los procesos de decantación, los sólidos y materia suspendida decantan y forman lo que se

conoce como un manto de fango, el cual se extrae del decantador. Estas aglomeraciones formadas se deben de gestionar y tratar, formando la línea de fangos de la EDAR.

Al igual que en la línea de aguas, se sigue una secuencia de tratamientos y equipos implicados con el objetivo de facilitar su gestión y en algunos casos, sacarles rédito energético mediante su transformación parcial a biogás.

Dentro de la línea de fangos, cabe distinguir los procesos de espesamiento, estabilización y deshidratación mecánica (Q Wang et al., 2017).

El espesamiento tiene por objetivo la reducción del volumen de los fangos mediante su concentración por eliminación parcial del agua que contienen. Los diferentes tipos de espesamiento son el espesamiento por gravedad (generalmente para fango primario) y espesamiento por flotación (para fango activado o secundario).

La estabilización es la etapa mediante la cual se consigue la destrucción y/o transformación de la materia orgánica presente en el fango y responsable de su fermentación. Los procesos de estabilización de fangos más comunes son: digestión anaerobia, digestión aerobia, estabilización por cal y compostaje.

Por último, la deshidratación es el proceso consistente en la eliminación de la mayor cantidad de agua posible del fango mediante el empleo de medios físicos, reduciendo, por tanto, el volumen de los mismos y confiriéndoles una consistencia que facilita su posterior almacenamiento o gestión. Los sistemas de deshidratación más habituales son: eras de secado, filtros banda, centrífugas y filtros prensa.

5. Generalidades de la digestión anaerobia

Como se ha planteado, el presente estudio se basa en el análisis de un tratamiento térmico previo a su valorización energética en la digestión anaerobia. Para poder entender el aprovechamiento energético de los fangos producidos por las depuradoras, se debe de profundizar en el entendimiento de los sistemas de digestión anaerobia (J Mata-Álvarez et al., 2000).

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación desarrollado por un grupo heterogéneo de microorganismos en condiciones anaeróbicas. Como producto, se genera biogás, el cual es un tipo de gas renovable, que está principalmente formado por metano y dióxido de carbono a partir de la fracción orgánica más fácilmente biodegradable mientras que las fracciones de difícil degradabilidad se transforman en un producto sólido comúnmente denominado como digestato. La composición del biogás dependerá principalmente de los materiales empleados como sustrato alimentado y del tipo de tecnología de digestión empleada.

Las principales ventajas que otorga la digestión anaerobia de lodos generados de depuradora son:

- Producción de biogás. Su uso puede aplicarse a alimentación de calderas, o cogeneración de electricidad mediante motores especializados. Por ello, contribuye a la integración energética de la planta, contribuyendo un aporte positivo de energía.
- Mejor estabilización del residuo obtenido: Lo cual habilita usos secundarios del material digerido, ya sea como abono, compostaje...
- Reducción significativa de malos olores
- Se produce una reducción de gases de efecto invernadero al reducir las emisiones incontroladas de CH₄, que se retienen en la estructura de los digestores y no salen de la depuradora.
- Su uso en los digestores permite reducir el volumen de fangos a tratar.

La digestión anaerobia es un proceso secuencial. Es decir, un proceso caracterizado por la existencia de varias fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato.

Cada una de estas etapas se va a caracterizar por el grupo o población de microorganismos que las realizan y por los parámetros físico-químicos que gobiernan estas reacciones. En la digestión anaerobia intervienen hasta 5 tipos de poblaciones microbianas.

Estas poblaciones están compuestas por microorganismos de naturaleza similar, aunque con tiempos de crecimiento diferentes y diferente sensibilidad a los compuestos intermedios que se generen, que en algunos casos actuarán como inhibidores. Esto implica que cada etapa presente diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requiera un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que derive en una bajada del pH (Adekunle et al., 2015). Para la estabilidad del pH es importante el equilibrio CO₂-bicarbonato. Para hacer posible algunas reacciones es necesaria la asociación sintrófica entre bacterias acetogénicas y metanogénicas, creando agregados de bacterias de estas diferentes poblaciones

Las etapas de la digestión anaerobia son: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. Estos tres procesos constituyen cuatro etapas: hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica.

En la Figura 1. Se ilustra un esquema representativo que permite entender el proceso de una forma general, entendiendo las diferentes sinergias entre bacterias y productos de reacción.

4.1 Fase hidrolítica

La hidrólisis es la primera etapa de la digestión. En esta fase, se descomponen los compuestos orgánicos de cadena larga (lípidos, proteína, hidratos de carbono y otros compuestos inorgánicos) en otros más cortos o sencillos, como productos intermedios. Esencialmente, supone la transformación de los polímeros en sus monómeros.

Esta acción de descomposición es desarrollada por las bacterias hidrolíticas-acido génicas gracias a la despolimerización de los compuestos debido a la acción de las enzimas hidrolíticas, las cuales son excretadas por estas bacterias. Como producto de este proceso se obtienen moléculas solubles de más fácilmente biodegradables como ácidos grasos, aminoácidos, monosacáridos (Menzel et al., 2020).

En el proceso de digestión anaerobia la etapa de hidrólisis suele desarrollarse en valores óptimos de PH entre 5,3 y 6,7 aunque dependerá de factores como el tipo de sustrato y el tiempo de retención del digestor.

4.2 Fase acidogénica

En esta etapa, los compuestos solubles obtenidos tras la hidrólisis serán transformados, gracias a la acción de las bacterias acidogénicas en fase de fermentación, en ácido acético (CH₃-COOH), hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂) principalmente, y en menor cantidad productos intermedios como alcoholes, ácidos grasos volátiles y ácidos orgánicos. A su vez, la acción microbiana deriva en la formación y emisión de gases como H₂S, CO₂ y NH₃ (Meegoda et al., 2018).

Entre las bacterias acidogénicas responsables del proceso las identificadas han sido *Propionbacterium*, *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Streptococos*, entre otros. Estas son bacterias anaerobias facultativas las cuales no crecen en presencia de oxígeno molecular, ya que les resulta tóxico.

4.3 Fase acetogénica

Los compuestos intermedios resultantes de la etapa acidogénica son utilizados y transformados por las bacterias acetogénicas, obteniéndose hidrógeno, dióxido de carbono (los cuales son elementos precursores de las bacterias metanogénicas) y acético como resultado de dicha reacción. El acético es producido como consecuencia de la transformación de alcoholes y ácidos grasos volátiles en presencia de hidrógeno y dióxido de carbono, que son utilizados por las bacterias productoras consumiendo el ácido propiónico y butírico obtenido en la etapa previa.

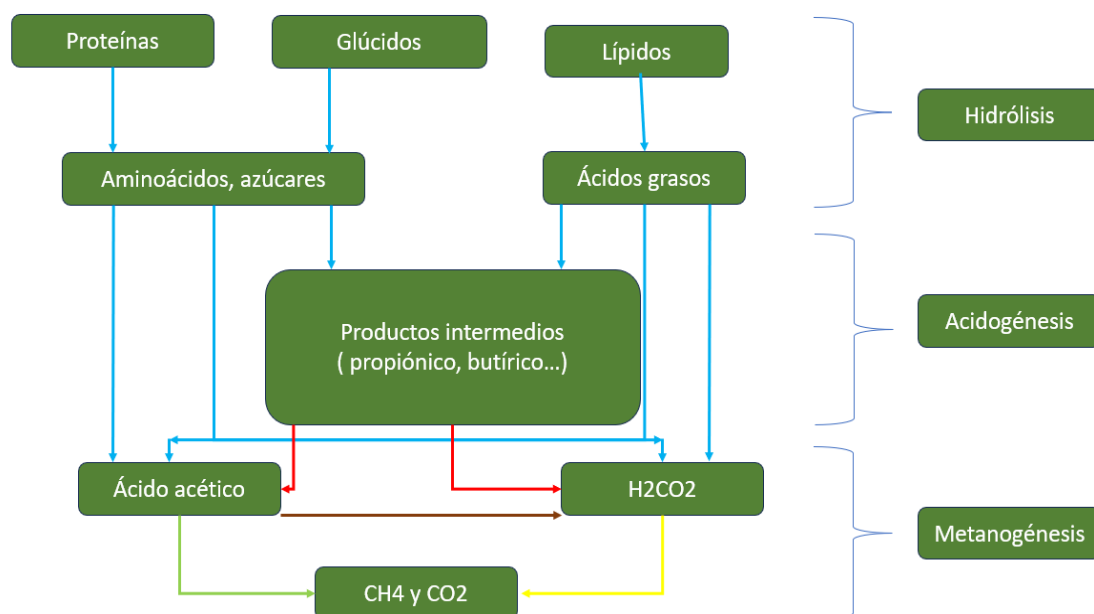
Las bacterias acetogénicas tienen una lenta velocidad de crecimiento, y esta reacción se puede ver interrumpida/inhibida por la acumulación de gas hidrógeno disuelto en el medio acuoso.

4.4 Fase metanogénica

La metanogénesis es la fase final de la digestión anaerobia y posiblemente, la más importante de las 4. Durante esta fase se produce una reducción de los aceptores de electrones mientras que se genera una acumulación de H_2 y CO_2 (aunque en la fase más avanzada del proceso todos los aceptores son reducidos, excepto este último).

Este proceso es desarrollado por las *archeas* anaerobias o estrictas, comúnmente denominadas metanógenos, las cuales producen metano a partir de los aceptores de electrones anteriormente nombrados. Posteriormente, otro segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y CO_2 . Este grupo lo conforman las bacterias metanogénicas estrictas, cuyo crecimiento se limita por la presencia de oxígeno. Este grupo de bacterias tiene un crecimiento más lento que el de las acidogénicas, y son las principales condicionantes de ciertos parámetros del digestor como el tiempo de retención o la temperatura del proceso.

La importancia de esta fase reside en el hecho de que esta etapa es responsable del 90% de la producción total de metano en el digestor.



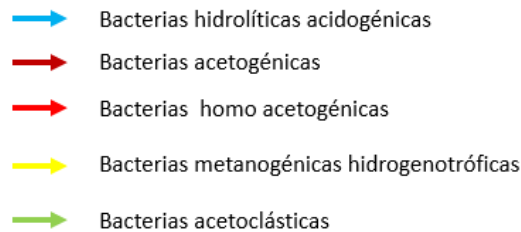


Figura 1. Fases de la fermentación anaerobia

5. Claves de la digestión anaerobia

La producción de biogás y metano en digestión anaerobia depende fundamentalmente del rendimiento de los digestores. La forma en la que estos se configuren y su grado de adaptación al sustrato alimentado resultará clave. Estos dependerán de una serie de parámetros ambientales y operacionales, aunque la composición del fango alimentado tendrá mucha influencia en su rendimiento.

Los parámetros ambientales que determinarán el funcionamiento de la digestión y los productos que se generen son:

- **pH:** Se escogen valores de control cercanos a la neutralidad [6,5-8,5]
- **Alcalinidad,** que asegure la capacidad tampón y evitar la acidificación. Se recomienda una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO
- **Potencial redox:** Valores inferiores a -350 mV. Suele componer un parámetro de control del proceso muy relevante (Baek et al., 2018).
- **Inhibidores:** Las bacterias que participan en la digestión cuentan con una serie de inhibidores cuya presencia afecta al proceso total y por lo tanto a la producción neta de biogás de los digestores, como también puede entrañar problemas en la línea de aguas de retorno a cabecera de planta. Entre estas inhibiciones las más documentadas son: concentraciones elevadas de nitrógeno amoniacal y tóxicos como iones metálicos o metales pesados (Chen et al., 2018).

Los principales parámetros de diseño operacionales de los digestores son:

- **Temperatura.** Podrá operarse en los rangos psicrófilico (temperatura ambiente), mesófilico (35 C°) o termófilico (55 C°). El rango de operación termófilico asegura una mayor actividad, producción de biogás y habilita la destrucción de patógenos en tasas superiores. No obstante, deriva en una mayor sensibilidad de las bacterias frente a sus inhibidores. Por ello, debido a esta dificultad operativa que representa se suele trabajar en el rango de temperaturas mesófilico.
- **Agitación.** En función de la tipología de reactor debe transferirse al sistema el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de sustrato a cada población o agregados de bacterias. Esto permite una homogenización correcta para mantener concentraciones medias bajas de inhibidores.
- **Tiempo de retención.** Es el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos. El tiempo de retención influye directamente en la eliminación de SV y producción de biogás en los digestores, siguiendo una tendencia determinada. Generalmente, los tiempos de retención en digestión anaerobia suelen situarse entre los 20-30 días de actividad, en los que se asegura una eliminación de volátiles considerable en un contexto de productividad máxima que pueden ofrecer los digestores.

- **Tasa de carga orgánica.** Representa la cantidad de materia orgánica introducida en el digestor. El valor de esta debe de calibrarse correctamente, ya que valores bajos afectan al rendimiento del digestor (tiempos de retención sobredimensionados) y valores demasiado altos puede implicar la reducción de la producción de biogás específica.

6. Producción de biogás y potencial energético de los digestores

El principal objetivo de la digestión anaerobia es la producción de biogás. Los digestores producen un biogás cuya composición consta de una mezcla gaseosa de metano (en 55-65%) y dióxido de carbono (35-45 %) y sulfato de hidrógeno y amonio en cantidades inapreciables (Mao et al. 2015). El ratio de biogás y su producción son esenciales a la hora de asegurar la eficiencia de los digestores. Además, la medición de gases producidos durante la digestión es importante debido a que nos da una referencia de cuanta materia orgánica se ha descompuesto en el digestor y por lo tanto una medición completa nos puede informar sobre cuanta cantidad de materia orgánica cruda es necesaria alimentar al reactor y compone una herramienta de control del proceso. Por tanto, se concluye que, si la carga orgánica alimentada cumple la demanda de la digestión, esta mantendrá a los organismos en su máximo pico de actividad lo cual mejora la eficiencia final del proceso (además de mantener controladas otras variables como la temperatura y el PH).

Además, las propiedades del fango alimentado se van viendo modificadas a medida que se produce la digestión anaerobia, resultando en beneficios para la gestión de los fangos digeridos. La digestión anaerobia mejora la estabilización del fango de salida; disminuye la emisión de patógenos y olores; y reduce la materia seca del fango lo cual supone una reducción del volumen de salida.

Desde hace tiempo que se ha reconsiderado el concepto de la digestión anaerobia convencional. Numerosas industrias generan residuos que no valorizan y su destino es la incineración. Por ello, se adopta el concepto de codigestión a la introducción de estos residuos de origen externo a la digestión anaerobia de una EDAR. Esto no solo conlleva unos beneficios claros en costes de inversión, explotación y unificación de metodología de gestión, sino que pueden mejorar el rendimiento de los digestores al aprovechar los sustratos complementarios para crear perfiles de proceso más eficaces. Al aprovechar las sinergias entre las mezclas se complementan las carencias de los sustratos por separado.

La mejora del rendimiento de la codigestión reside en cómo afecta esta a la relación C/N (principal parámetro de control), y por tanto hay una alta dependencia de la composición y origen del cosustrato introducido. Por ello, es necesario realizar analíticas de control a los cosustratos alimentados.

Si hablamos de números, en una EDAR convencional la carga específica de DQO que puede ser anaeróbicamente aprovechada varía entre los 14-16 Kg/h.e/año. A su vez, según observaciones experimentales el contenido de DQO alimentado a los digestores puede ser transformado en metano al ritmo de $0,35 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg DQO}$ (Silvestre et al., 2011) y el metano tiene un potencial de transformación en energía térmica de $10 \text{ Kwh}/\text{m}^3 \text{ DQO}$ (Li et al., 2023) Considerando una eficiencia eléctrica del 35 % y una eficiencia total del 90% al tener en cuenta la integración de un sistema de energía y calor (“Combined Heat and Power” o también conocido como cogeneración) se producen 25–31 kWh de energía térmica y 16–20 kWh de energía eléctrica por cápita cada año a partir del fango alimentado a los digestores (Nowak et al., 2015).

No obstante, la concentración de metano es la que determina el potencial energético o el valor calorífico del biogás producido. Si tomáramos un valor de referencia de concentración de metano

(60%) su valor calorífico permite una producción de energía de $5 - 7.5 \text{ Kwh} / \text{m}^3$ y de $1.5-3 \text{ Kwh} / \text{m}^3$ de energía eléctrica (Nowak et al., 2015)..

Prestar atención a estos números resulta esencial a la hora de conseguir la autosuficiencia energética de la planta, y sobre todo a la hora de concluir si se deben de plantear alternativas a la digestión anaerobia convencional.

7. Caracterización del fango de depuradora

Como resultado del conjunto de tratamientos de la línea de aguas de una depuradora y de la propia composición química de la corriente influente, las resultantes corrientes de fango producidas varían en su composición y propiedades estructurales.

Específicamente, el fango primario se obtiene como resultado de la sedimentación primaria, en la que gran parte del contenido suspendido (orgánico e inorgánico) es eliminado del agua de entrada. Mientras, el fango secundario o fango activado se deriva del tratamiento biológico y posterior decantación secundaria (Kor Bicacki et al., 2019), produciéndose una importante reducción de la carga orgánica soluble, sólidos suspendido y de nutrientes (compuesto de nitrógeno y fósforo, según el tratamiento biológico escogido).

Si observamos detenidamente su estructura molecular, se debe de anotar que el fango secundario es menos biodegradable que el fango primario. Esto se debe a su compleja estructura molecular y composición. Su pobre contenido en compuestos adaptados a la biodegradación disminuye el rendimiento de los digestores, lo cual implica una baja eficiencia en la producción de biogás (Manara et al., 2012). Un esquema sobre como suele ser la estructura flocular del fango secundario se puede ver en la Figura 2.

Según los estudios realizados, el principal foco de atención se ha puesto sobre la estructura molecular del fango. La propia estructura molecular del fango está formada por una serie flóculos los cuales se mantienen juntos mediante Fuerzas de Vander Waals o intersticiales, suspendidos en una base de agua (intersticial y libre) que los mantienen juntos. Las propiedades de estos flóculos dependen de una serie de compuestos denominados EPS o sustancias extracelulares poliméricas. Estos EPS encierran una mezcla de proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos, lípidos y ácidos húmicos, presentando entre el 40% y el 60% de la materia seca total de los flóculos del fango (Nielsen, 2002). Según su distribución espacial en el fango distinguimos entre EPS completamente solubles, EPS de enlace débil y EPS de enlace fuerte.

Se ha demostrado que la estabilidad flocular y estructural del fango está relacionada con las fuerzas de unión Vander Waals y electrostáticas de estos compuestos (Manara et al., 2012). Es más, se ha demostrado que las interacciones de los EPS en el fango secundario afectan a la DA. Una explicación razonable a esto es la de que los EPS están usualmente cargados negativamente en condiciones neutras. En esta situación, una cierta cantidad de micropartículas inorgánicas positivamente cargadas interactúan con los EPS generando compuesto metálico-orgánicos (Xu et al., 2020). Estos enlaces que se generan necesitan mayor energía para romperse que los presentes en compuestos orgánicos. Por ello, este hecho afecta a la digestión anaerobia en su fase limitante, la hidrólisis necesaria para que los compuestos del fango puedan ser utilizados por los microorganismos.

Se concluye entonces que la mejora de la fase hidrolítica del fango está relacionada con una modificación de su propia estructura molecular. Mas específicamente, la desestabilización y ruptura de la estructura flocular y EPS para la liberación de los compuestos solubles de interés. En la Figura 3 se ha representado esquemáticamente el proceso de hidrólisis asistida a nivel molecular, implicando 2 fases: Desestabilización flocular y Lisis celular.

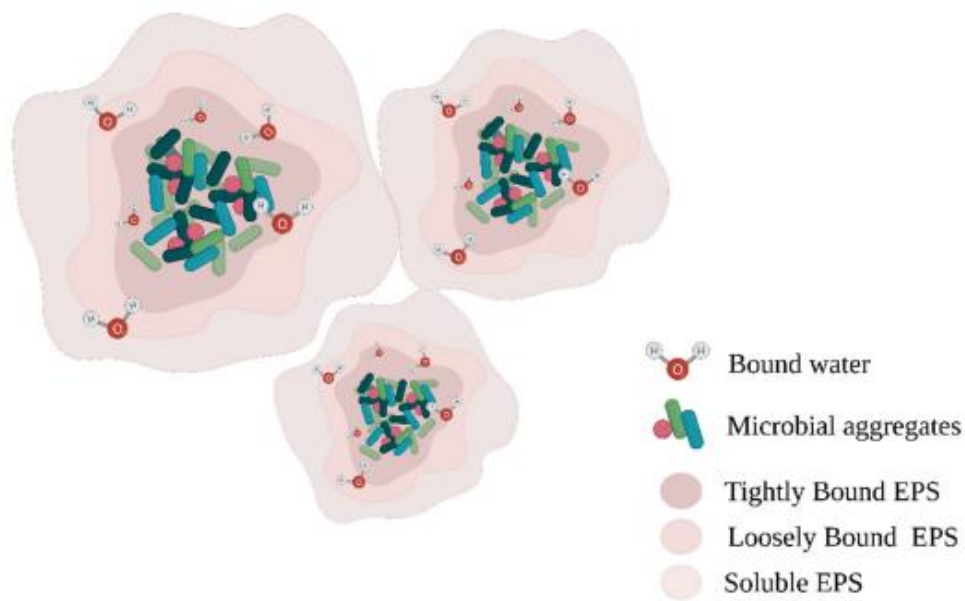


Figura 2. Estructura flocular del fango activado (Mitraka et Al., 2022)

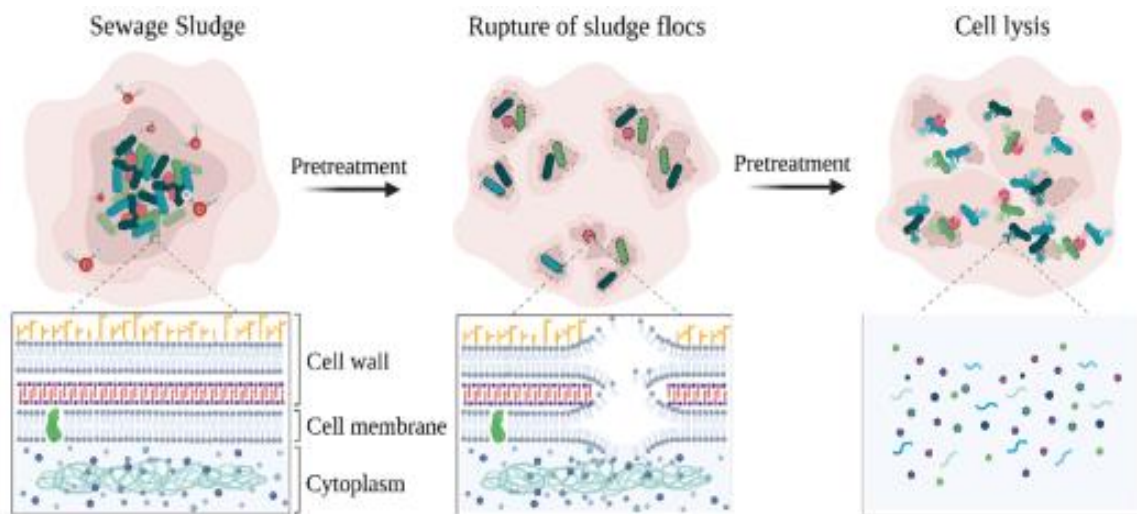


Figura 3. Desintegración flocular, lisis celular y liberación de compuestos intracelulares (Mitraka et Al., 2022)

8. Tecnologías de pretratamientos de fangos

Con el fin de mejorar el balance energético de las depuradoras, uno de los principales objetivos en los últimos 30 años ha sido la búsqueda de alternativas al tratamiento convencional anaerobio de fangos en una EDAR.

En este contexto, se han estudiado y desarrollado numerosas tecnologías de pretratamiento que tienen como objetivo la adecuación de los fangos de entrada a los digestores para que esta labor sea realizada de una forma más eficiente, de forma que comporte beneficios adicionales.

El pretratamiento de fangos promueve la rotura de la pared celular y la degradación de los polímeros extracelulares, lo cual habilita a las bacterias acidogénicas la toma de sustancias orgánicas para su crecimiento y actividad. Por consiguiente, al reducirse el tamaño de partícula la superficie específica aumenta, lo cual incrementa la actividad enzimática y por tanto la hidrólisis. Esencialmente transforman los compuestos complejos de alto peso molecular a formas más simples y más “digeribles”. Esto provoca un aumento en la solubilidad, ya que los compuestos orgánicos EPS se solubilizan tras la ruptura de las paredes celulares. Además, los pretratamientos mejoran la deshidratabilidad del fango. Al desestabilizar la estructura flocular, el agua intersticial pasa a ser agua libre la cual puede eliminarse del contenido del fango. La deshidratación del fango además se ve mejorada por el aumento de solubilización que supone el pretratamiento, ya que puede provocar la ruptura de compuestos orgánicos complejos, que son generalmente hidrofóbicos.

Además de los beneficios comentados, los digestores pueden reducir sus tiempos de retención hidráulicos, ya que se ha extraído su fase limitante a una instalación anexa. Este beneficio implica a su vez un menor volumen de digestión y por ello un menor coste asociado a los reactores (Panter et al., 2019).

En los digestores sin pretratamiento, el proceso demanda mayor tiempo de reacción, ya que requiere del tiempo necesario para la lisis celular asociada a un pretratamiento. Con la destrucción de paredes celulares, la degradación es más rápida, la producción de metano es superior y el volumen de digestión disminuye. Según la tipología de pretratamiento instalado se pueden obtener otros beneficios adicionales. Normalmente, la eficiencia de los pretratamientos está relacionada con su potencial de solubilización y biometanización, su mejora de deshidratabilidad del fango, incrementos en la reducción de sólidos volátiles y su demanda energética de operación

Durante las últimas décadas, se han desarrollado numerosos estudios centrados en la funcionalidad de los diferentes métodos de tratamiento y los resultados obtenidos en los ensayos realizados. Según su tipología distinguimos pretratamientos térmicos, físico/mecánicos, químicos, biológicos y sus diferentes combinaciones e hibridaciones entre ellos.

8.1 Procesos térmicos

Los procesos térmicos son una tecnología de pretratamiento que cuenta con numerosas referencias a gran escala para mejorar el rendimiento de la posterior digestión anaerobia (Barber et al., 2016). En estos procesos se calienta el fango de entrada mediante inyección de vapor directa, o por calentamiento mediante intercambiadores y posteriormente es enfriado y el calor recuperado puede utilizarse en el precalentamiento del fango alimentado, lo cual mejora su integración energética. La categorización de pretratamientos térmico los distingue según la temperatura de diseño a la que opera la instalación, de alta temperatura de pretratamiento ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y de baja temperatura ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

El calor es suministrado por intercambiadores de calor o inyección directa de vapor vivo en algunos casos (Chatel et al., 2016). La eficiencia de dicho proceso varía principalmente según la temperatura de trabajo y el tiempo empleado. Si comparásemos ambos pretratamientos térmicos observaríamos que al trabajar por encima de los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se consigue una mayor solubilización y un aumento de la producción de biogás. Este tipo de procesos también disminuyen la viscosidad del fango, permitiendo trabajar en un contenido en sólidos del 12-14% sin obstaculizar la posterior digestión (Liu et al., 2012). No obstante, este modo de trabajo conlleva una serie de complicaciones técnicas (al trabajar en condiciones de presión y temperaturas extrema) y un mayor coste de inversión a gran escala (Shrestha et al., 2020).

Los principales beneficios que conlleva este pretratamiento es un gran incremento de la solubilización, mejora de la deshidratabilidad e higienización del fango (Barber et al., 2016) lo

cual habilita la producción de biosólidos Clase A (categoría definida por la USEPA). No obstante, la alta demanda energética que representa la operación de estos pretratamientos puede resultar una limitación clara a su implantación en EDAR's. Sin embargo, su integración energética en un sistema de cogeneración con aprovechamiento de biogás en motores permite mejorar en gran medida el balance energético, pudiendo llegar a representar un ahorro sobre la situación base gracias al incremento que suponen en la producción de metano.

8.1.1 Pretratamientos a bajas temperaturas (< 100 C°)

El pretratamiento a bajas temperaturas incrementa la solubilidad del fango y el incremento de los ácidos grasos volátiles o la producción de biogás, además de reducir el consumo energético y evitar la formación de recalcitrantes al trabajar en rangos de temperatura entre los 50-70 C°.

Liao et al. revela en su estudio que sometiendo al fango activado a temperaturas de 60, 70, 80 C° durante un tiempo de retención de unos 20, 30 minutos se conseguía un incremento en la solubilidad muy apreciable, de forma proporcional. Además, se demostró que inducía y aceleraba el proceso de hidrólisis, ya que su constante cinética dobló su cuantía tras el pretratamiento. A su vez, demostró que esto implicaba un aumento en la producción de biogás, específicamente de entre el 7,6% y 15%, según la temperatura aplicada. Otro estudio (Prorot et al., 2011) reportó un aumento de la solubilización del contenido en DQO del fango tratado, trabajando en un rango de temperatura de 65-95 C° y un tiempo de reacción de 20 minutos. No obstante, en este caso no se apreció un incremento en la producción de biogás, obteniendo una cantidad de biogás similar en el fango crudo y el pretratado. Esto es debido a que los pretratamientos térmicos débiles tan solo producían una desestabilización y desfloculación de los flóculos más grandes y por lo tanto no aportaban la suficiente energía calorífica para llegar a liberar los compuestos de interés encerrados intracelularmente.

Esta situación fue resuelta en el estudio de otro investigador (Ruffino et al., 2015), en el que se propuso unas condiciones operativas diferentes, aumentando el tiempo de reacción (1-3 horas). Se observó un aumento del contenido de DQO_{sol} y este se correspondía con un aumento de la producción de biogás en un 18,9-26,1 %. Esto demuestra que estos pretratamientos mejoran su rendimiento a medida que aumenta el tiempo de operación.

Además, la puesta en marcha y funcionamiento de estos pretratamientos demandan tiempos de reacción muy altos para cumplir sus prestaciones. Los tiempos tan prolongados que necesita este proceso de hidrólisis supone una situación inviable al operar a gran escala, ya que derivaría un gran coste económico de operación (existen pocas referencias de implantaciones a gran escala con estas características).

8.1.2 Pretratamientos a altas temperaturas (> 100 C°)

Los pretratamientos a altas temperaturas surgen como con el objetivo de habilitar la etapa de hidrólisis previo a digestión, lo que comportaría una disminución del tiempo de retención de sólidos y una mejora en la producción de metano. Este tipo de pretratamientos operan a temperaturas entre los 160-180 C° a un tiempo de retención en el rango de los 20-40 minutos y a una presión entre los 6-25 bares (Carrere et al., 2010). En estas condiciones, se produce la ruptura de las paredes celulares y liberación de compuestos intracelulares tras la aplicación de una fuerza molecular de colisión provocada por una despresurización súbita controlada en la instalación.

Entre las ventajas que proporciona los pretratamientos térmicos a altas temperaturas se encuentran: gran incremento de la solubilidad y biodegradabilidad del fango y disminución del tamaño de partícula causado por la desestabilización de las fuerzas de unión entre flóculos. Este incremento ha supuesto un relevante aumento en la producción de biogás, con lo que hay una correlación positiva entre la solubilización y la biodegradabilidad del fango tratado (Xue et al., 2015). A su vez, la producción de biogás incrementa a medida que la temperatura de trabajo

aumenta, registrando un aumento del 25% de biogás al operar en los límites inferior y superior del rango térmico escogido, a un tiempo de reacción de 30 minutos (Lu et al., 2014). No obstante, se ha notificado en ciertos estudios que a temperaturas de trabajo ($> 190, 210\text{ }^{\circ}\text{C}$) en un tiempo de retención de 20-30 minutos pueden provocar un empeoramiento en la biodegradabilidad del fango. Esto es debido a la ocurrencia de reacciones Maillard y producción de compuesto recalcitrantes difícilmente biodegradables que tienen un impacto negativo en el rendimiento de la posterior digestión (Zhang et al., 2020).

Otro de los factores que afectan a este pretratamiento es la tipología y caracterización del fango alimentado. La inherente naturaleza biodegradable del fango primario hace que su paso por hidrólisis térmica resulte poco interesante, comparado con el tratamiento del fango secundario. Esta afirmación fue contrastada por un investigador, donde se utilizó la reducción de sólidos volátiles (RSV) como indicador de rendimiento. Operando en un rango de temperatura ascendente se observaron valores de RSV de 14-19% en el tratamiento de fango secundario y del 5-9% tratando la mezcla de fangos (Zhang et al., 2018). Es por ello, que numerosas referencias de esta tecnología sean diseñadas para el tratamiento aislado del fango secundario espesado, mejorando el rendimiento energético de la instalación.

Adicionalmente a la mejora en la solubilidad y biodegradabilidad del sustrato, la HT deriva en una gran mejora de la deshidratabilidad (Hasan et al., 2017). Esta está fuertemente relacionada con la degradación de la matriz de polímeros, que al someterse a grandes temperaturas se desestabiliza y se debilitan sus fuertes enlaces con el agua intersticial. La despresurización consiguiente provoca el choque entre moléculas y la liberación de este fluido como agua libre, que puede ser retirada mediante deshidratación mecánica (p.e. centrífugas).

Actualmente este tipo de configuraciones de pretratamiento cuentan con numerosas referencias funcionando a gran escala, destacando la creciente comercialización de sus modelos. Las principales marcas comerciales de tecnologías de hidrólisis térmica son *CambiTM Thermal Hydrolysis Process* (Pilli et al., 2014) y *Exelys/BiothelysTM*. Aunque para que puedan ser viables necesitan ser correctamente integradas en un sistema de cogeneración en los que el aumento de la biometanización deriva en un ahorro energético tras su aprovechamiento en los motores para la producción de electricidad.

8.2 Pretratamientos físicos/mecánicos

Los pretratamientos físicos se encargan de la reducción del tamaño particular del sustrato alimentado mediante la aplicación de fuerzas físicas o cortantes. Esta reducción del tamaño de partícula produce una conversión particular de los compuestos orgánicos a una fracción más soluble y por lo tanto, más fácilmente asimilables por los microorganismos. Por ello, se define que la biodegradabilidad y el potencial de biometanización del fango es inversamente proporcional al tamaño de partícula.

Junto con la reducción del tamaño de las partículas, los mecanismos de pretratamiento físico-mecánico incluyen la aplicación de presión externa que excede la presión interna de las celdas, lo que resulta en la liberación de material intracelular. Sin embargo, a pesar de los aspectos beneficiosos de desintegración físico-mecánica, la mayoría de los métodos que pertenecen a esta categoría son intensivos energéticamente y conllevan un consumo asociado muy elevado, lo que conduce a procesos energéticamente no autosuficientes.

8.2.1 Ultrasonidos

En los pretratamientos ultrasónicos, el fango es sometido a ciclos continuos de compresión y descompresión mediante ondas de sonido. Esto generaba una serie de microburbujas las cuales colapsaban violentamente tras el proceso, provocando cavitación. Este colapso súbito genera condiciones extremas en la morfología del fango, lo cual induce la rotura de flocúlos y membranas

celulares que constituyen la hidrólisis del fango. Este proceso, además de inducir una mejora de la solubilidad también mejora la deshidratación del fango (Chatel et al., 2016).

El proceso se resume en 4 etapas principales 1) Fuerzas cortantes hidromecánicas 2) Formación de radicales 3) Descomposición térmica de las sustancias hidrofóbicas y 4) Un aumento de la temperatura.

La demanda de energía que requiere el proceso está relacionada con la estructura celular del fango, ya que según esta se necesitaría mayor o menor energía para lograr la desintegración de la célula. Por ello, los factores que más afectan al proceso son la viscosidad del fango, el contenido de sólidos o la concentración de gases solubles. A su vez, generalmente la temperatura no suele tenerse en cuenta como parámetro de control, pero su influencia es relevante. Si es cierto que numerosos estudios han demostrado que los cambios de temperatura no afectan al rendimiento del tratamiento, pero a temperaturas extremas puede impactar negativamente ya que aumenta el contenido de vapor de las burbujas de cavitación provocando un empeoramiento de la eficiencia de colapso y una disminución de las fuerzas cortantes (Delmas et Al., 2015).

Investigaciones demuestran el impacto positivo de los ultrasonidos como tecnología de pretratamiento de fangos (Tytla et al., 2018). Se realizaron 2 ensayos diferentes que condujeron a resultados positivos, con un aumento de la producción de biogás del 13% y el 19,7% con respecto al caso base.

Esta metodología también aplica una elevada temperatura y presión al proceso causada por la aplicación de ondas ultrasónicas, en pequeños tiempos de reacción. No obstante, su consumo energético es muy alto, y su integración solo es posible si es balanceada con el incremento de biogás que supone. Existen referencias a nivel de laboratorio, planta piloto y a gran escala en EDAR.

8.2.2 Microondas

La irradiación de microondas es otro pretratamiento de fangos que surge como una alternativa viable para ahorrar energía. Los microondas promueven la actividad cinética de los dipolos del agua, provocando que lleguen al estado de ebullición en poco tiempo. Este cambio de orientación de los dipolos provoca una situación atermal en el fango, lo cual combinado con procesos térmicos provoca la ruptura de los puentes de hidrógeno y por tanto la desnaturalización de moléculas biológicas complejas. Generalmente, mediante la aplicación de microondas la matriz de biopolímeros y los flóculos del fango se desestabilizan, la materia orgánica soluble se libera y las paredes celulares se rompen (Appels et al., 2013).

Entre sus beneficios se encuentran el incremento de solubilidad del fango, mejora de la deshidratabilidad del fango y destrucción de patógenos.

La efectividad de este pretratamiento está completamente determinada por la concentración de sólidos de fango pretratado. La solubilización incrementada del fango dependerá de la concentración de sólidos. No obstante, en la tecnología de microondas hay una mayor dependencia de este factor debido a que influye sobre la energía de absorción de microondas y consecuentemente a la cantidad de energía transferida. Es por ello, que la aplicación de este pretratamiento es más viable en fangos espesados a un porcentaje de sólidos muy alto, siendo un requerimiento de la propia instalación. Esto provoca que su aplicación a gran escala sea más difícil.

Un investigador propuso un estudio en el que realizó un ensayo de microondas a 70 C° trabajando sobre sustratos con concentraciones en sólidos diferentes, del 7, 9 y 13% (Fang et al., 2017) . Se determinó que el contenido en DQO_{sol} aumentaba a medida que la concentración en sólidos lo

hacia. Mas específicamente, se produjo un incremento en la solubilización del 32% en el concentrado al 13%, si lo comparamos con respecto a este sustrato sin pretratar.

Además, las principales referencias que se tienen cuentan con resultados satisfactorios al utilizar esta técnica como pretratamiento del fango secundario a escala de laboratorio. Por ello, los procesos involucrados deben escalarse para estimar el retorno de la inversión y costes operativos de sistemas piloto a escala completa.

8.2.3 Desintegración electrocinética

Esta técnica emplea campos eléctricos pulsantes de alto voltaje. Las cargas creadas por el campo de alto voltaje causan ondas de choque e inducen la ruptura repentina de flóculos rígidos de lodo y membranas celulares, facilitando la disponibilidad de los nutrientes a las bacterias fermentadoras disponibles (Poojary et al., 2020).

Esta técnica resulta efectiva como pretratamiento de la mezcla de fangos para aumentar la biometanización y la reducción de sólidos volátiles. No obstante, provoca un aumento de la diversidad de la población microbiana que puede inducir la proliferación de filamentosas y la aparición de espumas en el digestor.

Se han reportado incrementos de solubilidad de l DQO del orden del 200-220% con respecto al fango no tratado (Lee et al., 2011). Además, en este estudio se demostró que estos provocaban un incremento en la producción de biogás del 25% al aplicar campos eléctricos de 19 Kv, 110 Hz y un tiempo de pulso bajo de 1,5 segundos. Se cuenta con una referencia a gran escala funcionando en algunas instalaciones (Biocrack). Generalmente, funciona tratando fango activado y sus beneficios en la desintegración de sólidos han sido correctamente comprobados. No obstante, la solubilización no cumplía con los requisitos necesarios para mejorar la producción de biogás. Por ello, se determinó que esta tecnología puede funcionar como pretratamiento de fangos con el fin de incrementar el ratio de alimentación al digestor, pero sin llegar a derivar en una mejora de la eficiencia de la digestión anaerobia (Long et. al, 2014). Esto supone una limitación clara, ya que su integración energética se complica en gran medida.

8.2.4 Homogenización de alta presión

La técnica de homogeneización a alta presión se basa en la combinación de una serie de condiciones, como un brusco gradiente de presión, alta turbulencia, cavitación y fuertes fuerzas de corte, que se forman cuando suspensiones de lodos altamente compactadas (hasta 900 bar) sufren una fuerte despresurización.

El fango es alimentado a un reactor en el que una bomba de aire presuriza las muestras de entrada a través de un orificio estrecho, cuya presión está regulada por una válvula de homogenización. Esta provoca una caída de presión abrupta que se traduce en fuertes fuerzas cortantes en el fluido interior del lodo. La rotura de las paredes celulares y flóculos y la liberación de los componentes solubles se produce cuando la presión exterior al fango sobrepasa su resistencia interna (Nabi et al., 2011). Esto provoca una reducción muy elevada del contenido en partículas de gran tamaño, incrementándose así el área superficial disponible para la actividad enzimática, acelerando la cinética de la hidrólisis.

Con esta tecnología se han obtenido beneficios relevantes en el incremento de la solubilidad del fango y su mejora en la producción de biogás. Un estudio identificó una relación entre la reducción de sólidos del fango a medida que aumentan las presiones de homogeneización (Zhang et Al. 2013)- En este estudio se aplicaron presiones entre los 20 MPa y 80 MPa , produciendo un incremento en la solubilidad del fango. No obstante, el aumento reportado de producción de biogás fue realmente bajo, menor al 5% en comparación al fango crudo.

Las principales ventajas que entraña el proceso es su facilidad de operación y su bajo coste energético operativo. No obstante, las referencias a gran escala combinan este pretratamiento con la utilización de hidróxido sódico con el fin de debilitar las paredes celulares. La utilización de este reactivo supone la principal limitación del proceso, afectando negativamente al balance económico y a su funcionamiento, ya que es corrosivo.

8.3 Procesos químicos

En los procesos químicos los ácidos y álcalis solubilizan las paredes celulares de los biopolímeros, habilitando los compuestos solubles para los microorganismos. Si principal objetivo es la desintegración de la estructura flocular mediante la ayuda de fuertes reactivos (alcalinos, ácidos, Fentón...). Mediante su interacción con el medio flocular se produce la rotura de las paredes celulares con los que reaccionen, acelerando globalmente la fase limitante de hidrólisis (Volschan et al., 2021).

En comparación con los pretratamientos térmicos y físicos, estos son menormente utilizados debido al coste económico que compromete la utilización de reactivos, los cuales no se pueden recuperar en ninguna fase del proceso. Este hecho, se une a la posibilidad de que estos reactivos generen productos intermedios tóxicos para las metanogénicas, lo cual inhibe la posterior digestión del fango pretratado.

8.3.1 Pretratamientos ácidos y alcalinos

Este tipo de pretratamientos parecen prometedores para cumplir la función de solubilizar la masa del fango debido a que presenta una serie de beneficios en comparación a otros procesos, como una menor necesidad de equipamiento, facilidad de operación y una conversión efectiva a metano a bajo costo. Los efectos positivos de este pretratamiento están relacionados con el valor de pH de trabajo que se quiera conseguir, y este parámetro a su vez será el responsable de producir las modificaciones en la estructura flocular y biopolímeros del fango.

La clave detrás de este pretratamiento reside en las propiedades fisicoquímicas de los EPS o polímeros extracelulares. Al añadir grandes cantidades de Na^+ , las membranas floculares tienden a cargarse negativamente, esto causa una fuerza de atracción/hibridación que desestabiliza la matriz de biopolímeros. Por lo tanto, a mayor valor de PH mayor desintegración se produce.

No obstante, al igual que en los pretratamientos térmicos, el pH es un parámetro que necesita ser controlado y monitorizado. Se han reportado incrementos en la producción de biogás al trabajar por encima de PH 10, reportándose un aumento de la producción de biogás del 15,4 % aunque un deterioro en este aspecto al operar en pH superiores a 12, con una reducción de esta producción del 18,1% al aumentar mucho la alcalinidad (Shao et al., 2012) . Esto es debido a la formación de recalcitrantes, que a diferencia de la hidrólisis térmica no está asociado a un aumento del contenido soluble en el mismo orden. Además, este aumento de PH es conseguido tras un uso excedido de reactivo. Cantidades excesivas de este reactivo puede provocar un aumento de su concentración residual a la salida del pretratamiento, lo cual puede afectar al PH en el digestor e inhibir los microorganismos y afectar negativamente a la producción de metano.

Con respecto a los pretratamientos ácidos, es el proceso alterno que opera en el rango de valores de PH 1 - 5,5. Un investigador realizó ensayos de digestión operando en régimen semicontinuo durante un periodo de 21 días con un sustrato pretratado en condiciones ácidas (Devlin et al., 2011). Se presentó un incremento de la producción de metano del 17% y del 32% bajo pH 2 y 1, respectivamente. Curiosamente, se requería el doble de días de digestión en el ensayo a pH 2 para alcanzar la producción de biogás que obtenía el ensayo a pH 1 a los 7 días. Para conllevar este tipo de ensayos a pH por debajo de 2 se necesitaba una mayor cantidad de ácidos, lo cual suponía un coste mucho mayor.

Además, para evitar la inhibición de las metanogénicas hay un coste adicional inevitable considerando el ajuste de pH a valores de alcalinidad. Generalmente, este tipo de pretratamientos son más problemáticos, ya que la adición de grandes cantidades de ácidos supone la corrosión de equipos y por consiguiente dificultad operativa y gran gasto asociado de mantenimiento.

Como se ha comentado, este proceso se basa en la adición de reactivos tales como HCl , H_2SO_4 , H_3PO_4 y HNO_3 en la hidrólisis ácida, mientras que los alcalinos generalmente utiliza NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, CaO y amoníaco. Trabajar con reactivos descarta el escenario de trabajar con condiciones extremas de temperatura, lo cual supone una ventaja en la operabilidad del proceso. La eficacia del pretratamiento dependerá principalmente de las características físico-químicas del fango, la cual estará relacionada con la afinidad de sus compuestos orgánicos con los reactivos añadidos (Harmsen et al., 2010).

8.3.2 Ozonización

La ozonización o también conocida como Proceso Avanzado de Ozonización (AOP) utiliza la molécula inestable de ozono O_3 como un fuerte agente oxidante cuya aplicación mas común es la línea de tratamiento terciario de aguas, para su desinfección. No obstante, ha incrementado el interés en la aplicación de esta técnica como pretratamiento de fangos activados, gracias a su alta fuerza disruptiva de membranas.

El tratamiento con ozono en fango activado es posible ya que este gas al tener un gran potencial de oxidación con algunos compuestos orgánicos puede ser utilizado para la oxidación parcial e hidrólisis de la materia orgánica biodegradable. Generalmente, a este proceso se le describe como la descomposición secuencial que provoca la ruptura, solubilización y ozonización de los flóculos del fango. Su grado de eficiencia dependerá fundamentalmente de la cantidad de ozono utilizada en el tratamiento. No obstante, esta dependerá también del grado de transferencia del ozono en el fango y su cinética. Ciertos estudios defienden que el rango óptimo de dosis de ozono se encuentra entre los 0.0035 a 0.15 g O_3 /g MS (Chiavola et.al 2019) La ozonización del fango es una tecnología que se ha conseguido implantar a gran escala como pretratamiento y se ha demostrado su eficiencia a la hora de mejorar la posterior digestión anaerobia. No obstante, esta instalación tiene un coste operativo mayor al de otras tecnologías debido a la alta demanda energética, ya que el ozono debe de tratarse previamente a su inyección por su inherente inestabilidad. Se han reportado los altos costes operativos de la ozonización como pretratamiento (Volschan et al., 2021), en la producción de ozono (12.5 kWh/kg O_3) y su transferencia al sustrato (2.5 kWh/kg O_3) No obstante, se están realizando avances muy prometedores en torno a la aplicación viable de esta técnica de pretratamiento, como por ejemplo su aplicación mediante la generación de microburbujas para facilitar la transferencia a masa de ozono, sin suponer un coste energético elevado. Los sistemas de ozonización comercializados disponibles incluyen Aspal SLUDGETM (Air Liquide, Londres, Reino Unido) y Praxair® Lyso™ (Praxair Technology, Inc., Danbury, CT, EE.UU.) (Chiavola et al., 2013).

8.3.3 Oxidación con Fentón

El proceso Fentón involucra las reacciones del peróxido de oxígeno con iones de catalización para producir radicales hidróxidos con un alto potencial de oxidación. Esta técnica transforma los recalcitrantes y refractarios en compuestos solubles fácilmente biodegradables. Este proceso se desarrolla a PH muy bajos, con los requiere la neutralización del fango tratado antes de entrar a digestión. Este proceso tiene un coste económico significativamente alto, debido a las condiciones de operación y al uso de reactivos.

Uno de los parámetros de operación más importantes del proceso es la temperatura, ya que esta determinara la concentración de fentón a añadir. A temperaturas bajas mayor concentración que a temperaturas altas (además de un mayor tiempo de tratamiento). A su vez, los parámetros operacionales que determinan su funcionamiento son la dosis de reactivos y el valor de PH de

operación. Generalmente se suele trabajar a un valor de pH bajo entre 2-4 (Zhang MH et Al., 2019), pero en valores extremadamente bajos la concentración de protones aumenta en gran medida, afectando al desarrollo de la reacción de oxidación. En cambio, a valores de pH por encima de 5-6 se produce una disminución de la capacidad catalítica de los iones Fe^{3+} , lo cual induce su precipitación. La eficiencia de este pretratamiento fue contrastada por diversos estudios a escala de laboratorio. En uno de estos estudios, se realizó un pretratamiento del fango secundario a un pH 3 y una dosis entre 50-60 g H_2O_2 /MS (Pilli et al., 2016). En estas condiciones, se consiguió un aumento de la producción de biogás del 6,8%, al incrementar la dosis de H_2O_2 . Adicionalmente, este resultado comprobó la efectividad de este pretratamiento en la desintegración de recalcitrantes a formas más solubles. Otro investigador propuso una dosis de 60 g H_2O_2 / Kg MS (Erden et al., 2011). Se llegó a la conclusión que cuanto mayor dosis de H_2O_2 se aplique, mayor eficiencia en la desintegración se consigue.

Además, otro aspecto negativo derivado del empleo de esta tecnología como pretratamiento de lodos es la formación de fangos con una cantidad significativa de complejos férricos, también denominado fango Fenton o fango de hierro (Aramyan et al., 2017). Estos complejos representan un problema al medio ambiente por lo que se limita su disposición directa en el medio ambiente, con lo que la gestión del mismo se vuelve más costosa y compleja.

A la fecha del presente estudio, no se ha encontrado ninguna referencia que se haya aplicado a una depuradora y sea completamente operativa. Por ello, se necesita mayor investigación en cuanto a su implementación a gran escala.

8.4 Pretratamientos biológicos

Los pretratamientos de tipo biológico han experimentado una creciente atención en los últimos años debido a su carácter respetuoso con el medio ambiente y a que son procesos que evitan la producción de tóxicos derivados a diferencia de los pretratamientos químicos.

No obstante, aunque sus beneficios en la biodegradabilidad y producción de metano hayan sido constatados, estos procesos entrañan un coste de inversión muy alto (equipos y tanques de aireación, digestores secundarios... etc) que en la mayoría de casos resulta inviable su amortización (Bremond et al., 2018)

8.4.1 Pretratamiento aerobio

El pretratamiento aerobio o también denominado como pre-aireación es uno de los pretratamientos biológicos capaz de incrementar la biodegradabilidad del fango y por lo tanto mejorar el rendimiento de la digestión anaerobia. Esta tecnología involucra una fase previa aireada del fango a tratar, en presencia de oxígeno. Esto facilita las capacidades de descomposición de las comunidades hidrolíticas, estimulando su actividad de excreción de enzimas. Por ello, a este proceso se le denomina “auto-hidrólisis” ya que aprovecha y depende de la propia capacidad hidrolítica endógena del fango (Newman et al., 2016).

Los estudios que han examinado el rendimiento y habilitación de esta tecnología se han aplicado en el tratamiento de fango activado y fango mezcla, en unas condiciones de temperatura sobre los 70 C°. Se observaron beneficios notables en la mejora de la solubilidad y de la producción de biogás, además de significar un ahorro energético en los digestores, al disminuir su TRH. Además, esta tecnología permite estimular el conjunto microbiano anaerobio facultativo, contribuyendo a una aportación en la producción de metano que no sería posible en condiciones penamente anaerobias. En este sentido, se debe de regular meticulosamente la cantidad de oxígeno a alimentar, ya que al sobrepasar cierto límite se puede producir la inhibición de las metanogénicas estrictas.

En este contexto, se investigó el efecto de este pretratamiento en el fango secundario nivel de laboratorio, con el objetivo de estimular las enzimas que catalizan la hidrólisis de la materia orgánica (Jang et al 2014). Tras 12 horas de ensayo se obtuvo un aumento de la solubilización de la DQO del 39% y un aumento de la producción de metano del 23%. La aireación fue realizada en reactores de 2 litros, a una temperatura de 55 °C, con un tiempo de retención hidráulico de 1 día y un ratio de aireación de 2,5 $L_{aire}/L_{reactor}/min$.

Se han obtenido resultados a escala de laboratorio, pero faltan referencias de su funcionamiento a gran escala. Se puede llegar a la conclusión de que este tipo de pretratamientos pueden resultar interesantes en instalaciones con equipaje en aireación sobredimensionado, aunque falta mucha investigación al respecto.

8.4.2 Digestión en dos fases

Un proceso efectivo de digestión en dos fases, llamado digestión anaerobia de escalado de temperatura (TPAD) en la que se combina un digestor termófilo (operado a aproximadamente 55 °C) y un digestor mesófilo (operado a aproximadamente 35 °C). Este tipo de configuraciones se utilizan con el objetivo de aislar y acelerar la fase de hidrólisis y así mejorar la eficiencia global de la digestión anaerobia.

Normalmente, los sistemas funcionan secuencialmente alimentando la materia prima al primer digestor termófilo y transfiriéndola al segundo digestor mesófilo. Esto es debido a que la primera fase de digestión trabaja en condiciones termofílicas para mejorar la etapa de hidrólisis y la posterior acidogénesis funcionando como una etapa de pretratamiento, mientras que la fase acetogénica y metanogénica son desarrolladas en la digestión mesofílica. La temperatura de trabajo termofílica varía en el rango de 45-70 °C y un tiempo de retención mucho más bajo en la primera fase, manejando tiempos de 9 a 48 horas. Este es el tiempo necesario para hidrolizar el fango en las condiciones de temperatura descritas (González et al., 2018).

Esta configuración atípica de la digestión anaerobia optimiza las fases de producción de metano, además de habilitar tiempos de retención hidráulicos menores y cargas orgánicas de entrada mejor repartidas. En sí, produce un beneficio general sobre la digestión anaerobia convencional. No obstante, cuenta con la limitación de que es una tecnología cuya viabilidad se ve limitada por la alta demanda de volumen de digestión que requiere. Por ello, los estudios se centran en su correcta integración en términos de optimización de parámetros y balance energético.

Hasta el momento del estudio, se han realizado algunos ensayos e investigaciones que demuestran los efectos de esta nueva configuración de la digestión. Una investigación evaluó el rendimiento de 2 sistemas de digestión de dos fases en 2 reactores semicontinuos (Hameed et al., 2019). El primer reactor operaba a 45 °C en el primer sistema mientras que en el segundo a 55°C. Por otro lado, en el segundo reactor se operó a 35°C en ambos sistemas, en condiciones mesofílicas. Se observó una mayor ratio de producción de metano en el primer sistema, de $3.55 \pm 0.47 \text{ L CH}_4 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$. A su vez, se observaron inestabilidades en el segundo sistema, debido al incremento de AGV's y NH₃.

Actualmente, se cuentan con pocas referencias a nivel de planta piloto como a gran escala. Por ello, se deberán de realizar los estudios de integración y balances energéticos y másicos pertinentes para estudiar la viabilidad de su implantación.

8.4.3 Hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática consiste en un proceso natural en el que las propias enzimas extracelulares producidas por la biomasa del fango cumplen la función de catalizadores en las reacciones bioquímicas encargadas de solubilizar el lodo. Es por ello, que la tecnología mejora la eficiencia del proceso añadiendo una mayor concentración de enzimas exógenas y compuestos orgánicos para la generación de biogás (Xin et al., 2018).

Este pretratamiento puede ser realizado de dos formas 1) Añadiendo de forma manual las enzimas exógenas o 2) Alimentando bacterias cuya actividad de degradación excrete las enzimas de interés para el proceso (Bremond et al., 2018).

Cada grupo de enzimas tiene una responsabilidad específica en la degradación de la materia orgánica. Por ejemplo, las amilasas y celulasas se encargan de la rotura de las estructuras macromoleculares mientras que las lipasas actúan en la fracción de lípidos, cuya biodegradabilidad es más compleja. Es por ello, que se debe de buscar una proporción adecuada de enzimas a alimentar para que la hidrólisis sea lo más equilibrada posible. Por ello, la adición de las enzimas apropiadas es el principal factor de eficiencia del proceso. Esta variable tiene un control complejo, ya que depende de procesos a nivel flocular difícilmente observables.

Los parámetros de control más importantes de esta tecnología son el pH y la temperatura. Generalmente las enzimas suelen tener cierta resistencia a cambios ambientales y de medio, aunque esto afecte a su actividad hidrolítica.

En este sentido, se realizó una investigación basada en la fermentación de *Bacillus subtilis* y *Aeromonas hydrophila*, que fueron aislados del fango secundario (Yu et al., 2013). Esto se realizó para la producción de 2 mezclas de enzimas ricas en amilasas y proteasas, respectivamente. Cuando se usaban estas soluciones de enzimas en combinación con el fango pretratado a 28 horas de incubación a 37 C° se obtuvieron mejoras en la solubilización de DQO y la producción de metano. Tras 11 días, se obtuvo un aumento de biogás producido del 23% en comparación al fango pretratado.

La hidrólisis enzimática no libera sustancias tóxicas, lo cual es una ventaja sobre los pretratamientos químicos. Por otro lado, el alto precio de las enzimas comerciales hace que su aplicación a gran escala resulte inviable. Además, los ensayos realizados demuestran que no incrementan en gran medida la solubilidad, añadiendo cierta incertidumbre sobre su efectividad.

8.5 Viabilidad económica de los métodos de pretratamiento de lodos

La selección de un método de pretratamiento no solo depende de la capacidad que tiene de aumentar la biodegradabilidad del fango y la producción de biogás, también depende del coste económico asociado que tenga. No obstante, para que la tecnología sea rentable debe de comportar una serie de beneficios que permitan balancear los costes de instalación, operación, mantenimiento y los requerimientos energéticos.

La tabla 1 expone resumidamente los costes y requerimientos energéticos entre los diferentes tipos de pretratamientos que se han descrito en este apartado.

Como se ha podido observar, el tratamiento con ultrasonidos ha sido la variante de pretratamiento físicos más extensamente utilizada. Aunque sus costes asociados son altos, una integración energética eficiente permite obtener beneficios del mismo y por tanto un ahorro energético a largo plazo (González et al., 2018). Por otro lado, la homogenización a altas presiones resulta una alternativa con un coste asociado mucho menor y una operación más sencilla, aunque no cuenta con tantas referencias a gran escala y por lo tanto su eficiencia esta poco contrastada.

Con respecto a los pretratamientos térmicos, su mayor desventaja es el consumo energético que requiere su funcionamiento. Aún así, este tipo de pretratamientos cuenta con numerosas referencias a gran escala que demuestran que su integración energética mediante un sistema de cogeneración permite obtener un ahorro energético que rentabiliza tal gasto energético. Además, es la tecnología que mayores beneficios obtiene como la mejora en la deshidratación del fango o la higienización del sustrato tratado.

Como se ha comentado anteriormente, el coste de operación asociado a los pretratamientos que usen reactivos químicos es muy alto. No obstante, en algunos estudios se ha demostrado que la producción de biogás de gran calidad puede rentabilizar este alto coste capital.

Los pretratamientos biológicos son métodos autosuficientes, con bajos costes de abastecimiento de energía y bajos costes operacionales, al no utilizar reactivos. No obstante, el alto coste de inversión y de requerimiento espacial que representa puede hacer que este pretratamiento sea poco atractivo.

Tipo de pretratamiento	Coste de inversión	Coste de operación	Requerimientos energéticos
Pretratamientos físicos/mecánicos			
Ultrasonidos	Medio-Alto	Medio-Alto	Alto
Microondas	Medio-Alto	Medio-Alto	Alto
Homogenización	Medio	Alto	Alto
Desintegración electrocinética	Alto	Alto	Alto
Pretratamientos térmicos			
De baja temperatura	Bajo-Medio	Bajo-Medio	Alto
De alta temperatura	Alto	Alto	Alto
Pretratamientos químicos			
Pretratamiento alcalino	Bajo	Medio	Bajo
Pretratamiento ácido	Bajo	Medio	Bajo
Ozonización	Alto	Alto	Alto
Oxidación con Fentón	Bajo-Medio	Alto	Bajo
Pretratamientos biológicos			
Digestión en 2 fases	Bajo	Bajo-Medio	Bajo
Pretratamiento aerobio	Bajo	Bajo-Medio	Bajo
Hidrólisis enzimática	Bajo	Medio-Alto	Bajo

Tabla 1. Evaluación cualitativa de las necesidades energéticas y de la viabilidad económica de diferentes tecnologías de pretratamiento de lodos

9. Introducción a la hidrólisis térmica

En las aguas residuales convencionales que llegan diariamente a las estaciones de tratamiento o EDAR's una relevante cantidad del material orgánico (50-70%) queda retenido en los fangos que se purgan de los decantadores. Comúnmente, la digestión anaerobia es el proceso que transforma la materia orgánica y mediante una serie de reacciones complejas obtienen biogás del mismo. La medida de DQO o Demanda Química de Oxígeno está relacionada con la obtención de energía en las EDARs por digestión, estableciéndose una relación de 3,48 KWh/tonelada (Fernández-Polanco et Al., 2021) Por ello, implementar y optimizar la digestión anaerobia es vital para obtener una generación de energía que permita conseguir la autosuficiencia energética de las Estaciones de Tratamiento de Aguas Residuales.

No obstante, si tomáramos en cuenta un esquema convencional de las plantas de tratamiento, este 50% de energía que se encuentra contenido en el fango, al pasar por la digestión anaerobia disminuye hasta el 30% y en la fase final, esta cantidad de biogás que es alimentada a los motores corresponde a un 10% de energía que es obtenida. Por lo tanto, parece claro que el esquema convencional no optimiza el aprovechamiento energético

En este contexto, el tratamiento de fangos para adecuarlos y optimizar su potencial de biometanización ha sido la principal línea de estudio a profundizar y comprender. Numerosos métodos de pretratamiento de lodos (mecánicos, químicos, térmicos y biológicos) han sido investigados en planta piloto y a gran escala para mejorar el procesamiento anaeróbico de lodos (Perez-Elvira et al., 2008; Carrere et al., 2010).

La hidrólisis térmica se ha establecido como una de las tecnologías de tratamiento de fangos previas a digestión anaerobia que más se han investigado y mejores resultados ha ido obteniendo a lo largo de los últimos años. Esto es debido a que, aunque la digestión anaerobia es el sistema utilizado para extraer la máxima energía posible del fango que se alimenta, la mayor parte de la materia orgánica del fango activo (o secundario) existe dentro de las células microbianas, y su estructura del flóculo contiene un gran volumen de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que son difíciles de degradarse durante el proceso de digestión (Lu et al., 2018; Zhen et al., 2017)

Además, dentro de los procesos que se desarrollan en la digestión, la hidrólisis resulta ser la fase limitante de las cinéticas globales del proceso. Por ello acelerar esta fase limitante mediante la pre-hidrólisis y solubilización del fango permitirá a los digestores poder conllevar el resto de procesos de digestión de una forma más efectiva. La HT ha sido ampliamente investigada e implementada comercialmente en estaciones de tratamiento debido a su capacidad para mejorar el rendimiento de la digestión, la deshidratación de lodos y la detección de patógenos para su eliminación. Entre sus prestaciones, la hidrólisis térmica como pretratamiento a la digestión anaerobia puede ayudar a lograr una solubilización entre un 40% y un 50% mayor de la materia orgánica presente en los flóculos de lodos (Fernández-Polanco, 2021), así como la reducción de sólidos volátiles junto con un mayor rendimiento de biogás. La HT también promueve la producción de biosólidos Clase A que pueden utilizarse directamente para la recuperación de suelos. Se han listado las principales ventajas y desventajas reportadas de este pretratamiento en la Tabla 2.

La implementación de este sistema de pretratamiento se ha hecho presente en numerosas estaciones de tratamiento, sobre todo en aquellas cuyo principal objetivo sea lograr el autoabastecimiento energético a partir de la producción de biogás y sistema de cogeneración que presentan. Para lograr este objetivo, numerosas configuraciones se han probado, ya sea modificando parámetros y variables de operación del sistema como su emplazamiento e instalación en la planta.

Lo anteriormente comentado, sigue siendo uno de los principales aspectos de discusión a la hora de valorar el potencial de la HT, ya que, según numerosos estudios, según la configuración elegida, el potencial de biometanización y el balance energético del sistema variará ampliamente.

Ventajas	Desventajas	
Mejora la biodegradabilidad del fango	Alta demanda de energía para algunas configuraciones (depende del proceso)	Referencias Liao et. Al, 2016 Wilson et. Al, 2009 Barber et al., 2012
Mejora la biodegradabilidad del fango primario. Aunque el aumento sea relevantemente menor al fango en exceso	Mayor concentración de amonio libre que la digestión estándar	Liao et. Al, 2016
Permite tasas de carga significativamente más altas, lo que resulta en una planta de digestión más pequeña	Potencial de producción de material refractario, especialmente con residuos de alimentos.	Xue et Al, 2015 Liu et. Al, 2012
Incrementa la ratio de producción de biogás	Incrementa la demanda de reactivo (dosificación de polielectrolito)	Higgins et. Al, 2015
Disminuye la viscosidad del fango	Complejidad elevada	Ngo P.L et. Al, 2012
Mejora la deshidratación del fango (en todos los sistemas de deshidratación)	Requerimiento de instalación de calderas	Barber et al., 2012
Esteriliza lodos proporcionando biosólidos libres de patógenos	El lodo necesita enfriamiento antes de la digestión anaeróbica (En algunos casos)	Higgins et. Al, 2015
Reduce el olor y el recrecimiento de patógenos debido a la deshidratación.	Requiere espesamiento centrífugo al 16-18% de deshidratación	Liao et. Al, 2016
Produce condiciones que no fomentan foaming	Mayor liberación de nutrientes con potencial de cristalización de sal y posteriores problemas de mantenimiento y deterioro de la capacidad de deshidratación	Ngo P.L et. Al, 2012 Liao et. Al, 2016
Minimiza la inhibición debida al sulfuro de hidrógeno		Han et al., 2017
Reduce significativamente los requisitos posteriores para el secado y otros procesos térmicos. Esto deriva en un menor consumo de polielectrolito catiónico en deshidratación tras digestión		Liao et. Al, 2016 Wilson et. Al, 2009 Barber et al, 2012
Puede llegar a reducir las necesidades de calor de los		Williams et al., 2016

digestores y suponer un ahorro energético.		
Funcionamiento con éxito a gran escala		Liao et. Al, 2016 Wilson et. Al, 2009 Barber et al, 2012

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la hidrólisis térmica

9.1. Hidrolisis térmica: Descripción del proceso

La hidrólisis térmica es una técnica de pretratamiento de la digestión anaerobia cuya implantación es relativamente reciente, con lo que es necesario indagar y entender tanto el proceso como la instalación que conlleva para poder abordar otros aspectos relativos a estos, como el análisis de su efectividad en el funcionamiento como sus balances energéticos pertinentes. Para abordar su entendimiento se ha realizado una exhaustiva tarea de revisión bibliográfica sobre diferentes estudios realizados, además de los resultados y conclusiones obtenidas.

Como hemos comentado anteriormente el principal objetivo de este pretratamiento se basa en adecuar el fango y optimizar sus condiciones para que la producción de biogás se incremente, optimizando los procesos que ocurren en la digestión anaerobia además de ofrecer otras ventajas como una mayor deshidratación del fango y generación de biosólidos de Clase A. Además, otra ventaja que proporciona es la de disminuir el tiempo de retención hidráulico en el digester. Dicho incremento en la producción de biogás es generado a causa de los cambios que ocurren en el fango a medida que se hidroliza. La propia estructura molecular del fango está formada por una serie de flóculos que se mantienen juntos mediante Fuerzas de Vander Waals y electrostáticas, suspendidos en una base de agua (intersticial y libre) que los mantienen juntos. Las propiedades de estos flóculos dependen de una serie de compuestos denominados EPS o polímeros extracelulares. Estos EPS encierran una mezcla de proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos, lípidos y ácidos húmicos, presentando entre el 40% y el 60% de la materia seca total de los flóculos del fango (Nielsen, 2002).

Existe un consenso respecto al papel destacado de las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) en la retención de agua en los flóculos de lodos y, por tanto, en el rendimiento de deshidratación (Neyens et al., 2003). Por tanto, una gran parte de la eficiencia del proceso HT está relacionado con la estructura flocular del fango, y su capacidad de desestabilización.

El funcionamiento de la hidrólisis térmica convencional conlleva una secuencia de pasos y fases que implica reactores de diferente tipología y función. Primero, el fango pasa por una fase de deshidratación previa. Esta es necesaria ya que las tecnologías de HT requieren de un % de masa seca determinado para poder funcionar. Posteriormente, el fango pre-deshidratado se lleva a un pulper o mezclador que garantiza la homogeneidad del fango alimentado y por lo tanto una fase de calentamiento uniforme. Posteriormente, el fango se somete a temperaturas entre los 160-180 C° (depende del tipo de tecnología HT) a presiones altas. Este calentamiento presurizado permite que el agua del fango se caliente en fase líquida lo cual optimiza la transferencia de calor al fango. Estas condiciones de temperatura y presión provocan la rotura de membranas celulares y la desestabilización de la estructura flocular causando 1) Un incremento de nutrientes y de contenido soluble debido a la liberación de sustancias intracelulares, 2) Un incremento del agua libre frente al contenido de agua intersticial del fango de entrada y 3) La transformación de compuestos de elevado tamaño molecular como carbohidratos y proteínas en moléculas más pequeñas, y por lo tanto mejor digeribles.

Tras esta reacción de calentamiento, se produce una descompresión súbita en el reactor. Esta violenta descompresión crea un efecto cizalla que separa aún más los flóculos y las células del

lodo. El resultado final es un fango hidrolizado con un contenido orgánico soluble drásticamente mayor y un tamaño de partícula disminuido. En estas condiciones, el fango es correctamente hidrolizado y está listo para ser alimentado a los digestores. En la Figura 4, se puede observar un esquema tradicional de hidrólisis térmica.

Normalmente, la hidrólisis térmica se configura como pretratamiento de fango fresco, aunque en los últimos años este concepto se ha ido transformando según las necesidades específicas de cada planta. Dentro de las tipologías de HT como pretratamiento que se suelen considerar, en este estudio nos centraremos en aquellas de alta temperatura ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), ya que por debajo de los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se necesitan tiempos de retención inviabilizables o condiciones alcalinas. Tampoco se tiene en cuenta la adición de reactivos.

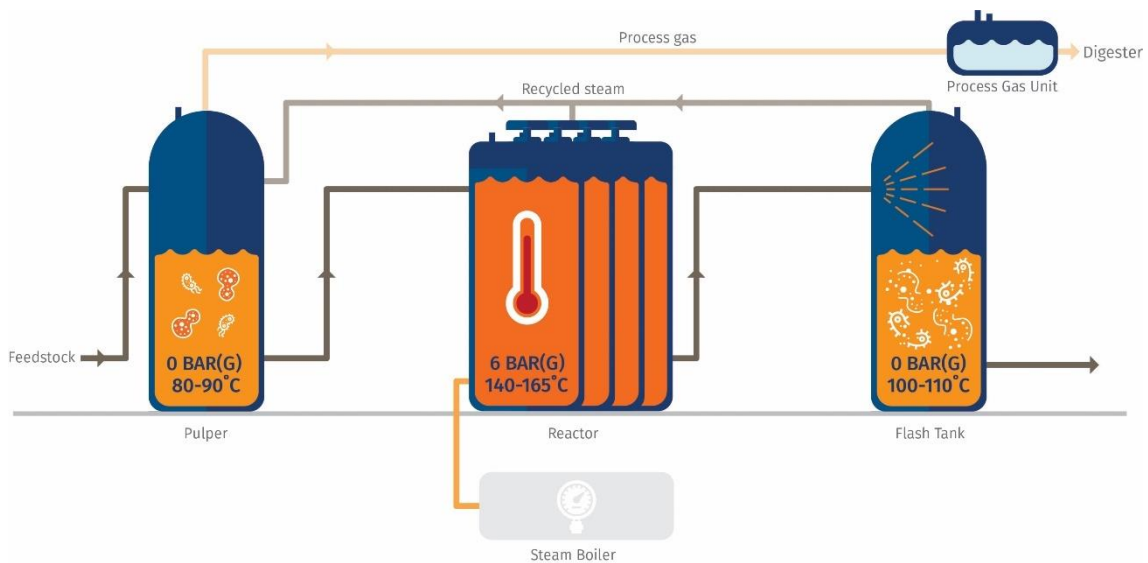


Figura 4. Esquema hidrólisis térmica convencional (Fuente: Cambi)

9.2 Parámetros de operación de la HT

A la hora de evaluar el rendimiento de la HT se debe de tener en cuenta una serie de parámetros indicadores, a lo que llamaremos índices de rendimiento (IR) que se verán afectados según las condiciones de operación. Estos son:

- Producción de biogás: CH_4 en $\text{Nm}^3/\text{ton SV añadida}$.
- Reducción de sólidos volátiles (RSV) en %.
- DQO soluble, amonio $\text{NH}_4 - \text{N}$, Absorbancia UV a 254 nm y contenido de nitrógeno orgánico disuelto en el efluente del digestor. Estos parámetros permiten evaluar la implicación de la HT en la calidad del efluente de la deshidratación.
- Deshidratación, medida como %ST en el digestato. Representa la sequedad del digestato.

Además de estos parámetros, se incluirían 2 variables adicionales relacionado sobre el impacto que tiene la instalación de la HT con respecto a una configuración convencional sin HT, que resultan de un cálculo simple:

$$\text{Incremento Producción de } \text{CH}_4 (\%) = \frac{[\text{CH}_4_{\text{HT}}] - [\text{CH}_4_{\text{Base}}]}{[\text{CH}_4_{\text{Base}}]}$$

$$\text{Incremento de SVR } (\%) = \% \text{RSV con HT} - \% \text{RSV sin HT}$$

Los parámetros operacionales principales de la HT son:

- La temperatura de trabajo de HT
- El tiempo de reacción/ proceso de HT
- La presión de trabajo de HT.
- Tipología del fango

Conocer sus rangos óptimos de operación es imprescindible, ya que de no conocer esta información el proceso pierde eficiencia e incluso podría llegar a afectar al resto de la EDAR, sobre todo a la digestión anaerobia. Estos rangos se refieren a la propia operación y funcionamiento de la HT, sin tener en cuenta parámetros externos o variables de entrada adicionales. El funcionamiento de la HT dependerá de lo cercano que se encuentren estos parámetros a sus valores o intervalos óptimos (Ngo et al., 2021).

Además, al estudiar la HT como pretratamiento, se deberán de considerar otro conjunto de parámetros inherentes a la digestión anaerobia ya que la acción conjunta de la HT + AD será la que implicará el funcionamiento de la digestión y la calidad del digestato y efluente posterior. Por lo tanto, valorar su implicación en el conjunto también resulta de interés:

- Funcionamiento de la DA (Continuo, Batch o Semicontinuo).
- Tiempo de retención hidráulico (HRT) de la DA.

Hay ciertos parámetros, como el tiempo de retención de la HT que no se toman en cuenta debido a que se ha demostrado el nulo impacto que tienen a la hora de evaluar el funcionamiento de una HT como pretratamiento, con lo que se excluirá también de este estudio (Donoso-Bravo et al., 2011). A su vez, el tiempo de retención del digestor (HRT AD) es un parámetro del cual se ha reportado que afecta significativamente a la producción de metano, aunque a partir de cierto número de días no supone un incremento relevante. Es decir, se ha reportado que no hay una diferencia muy relevante en el incremento de la producción de metano trabajando a lo largo de un intervalo entre los 10-18 días de HRT AD (Ngwenya et al., 2015). Por estas razones, ambos parámetros no se tendrán en cuenta a la hora de evaluar el rendimiento de la HT. Como consenso, se establece que el HRT de trabajo en la DA debe de ser > 15 días.

Con respecto al tiempo de reacción, se buscará el valor óptimo que permita incrementar la solubilización lo suficiente como para optimizar al máximo la producción de biogás, aunque un sobre incremento de la solubilidad puede provocar la inhibición de la metanogénesis, aunque esto lo abordaremos en el próximo apartado más a fondo. Por ejemplo, existe un estudio (Aboulofth et al., 2015) que encontró que la solubilización mejora con un tiempo de reacción de hasta 4 h. No obstante, que mejore la solubilización no implica una mejora en la producción de biogás, por lo anteriormente comentado. Por ello, este tiempo de reacción está totalmente sobredimensionado. Con el fin de evitar esta situación se establece que el intervalo óptimo de tiempos de reacción se encuentra entre los 30-60 minutos (Penaud et al., 2000). Se ha llegado a un consenso entre los investigadores que el tiempo de reacción más adecuado para operar es de 30 minutos, como máximo (si es operado en discontinuo)

En este sentido, el mayor sesgo que existe a la hora de establecer las condiciones de operación en una HT están referidas mayormente al rango óptimo térmico de trabajo de la instalación. Si tomamos como referencia el intervalo de temperaturas con las que trabajan, distinguimos: HT de temperatura baja (< 100 C°), normalmente operada en condiciones alcalinas (Nazari et al., 2017) y la de alta temperatura (> 100 C°). En un contexto de EDAR, operar a baja temperatura es completamente ineficiente debido a que se necesitan tiempos muy altos, con lo que la única opción viable es la de trabajar por encima de los 100 C°.

Para la implementación de la HT, es necesario conocer el rango óptimo de temperaturas de operación. Numerosos estudios argumentan que el rango óptimo que permite que se desarrolle correctamente el proceso y se obtengan los mayores beneficios se encuentran entre los 160 C°-180 C° (Bougrier et.al, 2006, 2008). Aunque este rango se ha ampliado a uno entre los 100 – 200 C°. Este rango ampliado engloba todo el espectro de temperaturas a las que la hidrólisis térmica puede funcionar como pretratamiento, de forma que para concretar un rango de operación más específico se deberán tener en cuenta el resto de parámetros operacionales, anteriormente comentados. Por ello, el rango de temperaturas de operación dependerá, además, de las características del fango de entrada, tales como la concentración, viscosidad, contenido orgánico o la fracción de sólidos secos y del resto de condiciones de operación de la HT y AD.

En este sentido, es necesario valorar las implicaciones que ocurren cuando se trabaja a valores de temperatura superiores al valor óptimo. La regla que se solía seguir (sobre todo en la etapa prematura de estudio de esta técnica) era la de trabajar siempre en un valor de temperaturas alto, por encima de los 150 C°, 160 C° hasta llegar a los 200 C° en algunos casos. Con ello, se aseguraban garantizar el incremento de la producción de biogás, aumentar la solubilidad de las proteínas y carbohidratos, y mejorar la deshidratación. No obstante, esto conllevaba un efecto negativo a la salida de la HT, la aparición de compuestos recalcitrantes (DQO, nitrógeno, color).. El incremento en la producción de estos compuestos a medida que se aumenta la temperatura hacia valores críticos resulta evidente según los estudios realizados (Stuckey and Mccarty, 1984). Este aspecto relacionado con la temperatura se estudiará a fondo en apartados posteriores.

Lo estudios más actualizados estudian rango de temperatura óptimos, lo cual permite una mayor flexibilidad a la hora de operar en HT, a diferencia de trabajar a una temperatura específica. Numerosos estudios se centraron en realizar una comparativa entre rango de temperatura alta de operación [140-160 C°] y temperatura crítica [160-200 C°] (Dwyer et al., 2008). Este estudio determinó que no existe una mejora relevante en la producción de biogás entre el primer y segundo rango de temperatura, anotando que por encima de los 175 C° se produce una disminución del biogás a causa de la consecución de reacciones indeseables. Además, la temperatura mínima para poder llevar a cabo el proceso térmico de alta temperatura es de 140 C°.

Si nos centramos en el aumento de la digestibilidad del fango, a medida que aumentamos la temperatura de trabajo de la HT aumenta la solubilidad del fango, lo cual supone una mejora en el posterior proceso de metanogénesis. Sin embargo, el aumento del potencial biometanización del fango se limita a temperaturas por debajo de los 200 C°, en el que este está relacionado con la transferencia de materia orgánica particulada hacia la fracción soluble que presenta una mayor tasa de biodegradabilidad que la fracción sólida (González et al., 2018).

Con respecto a la presión de trabajo, no existen demasiados estudios que valoren el impacto de trabajar a diferentes presiones en una HT. Normalmente, la presión aplicada en el reactor suele ser muy alta para que posteriormente la despresurización súbita aplique una fuerza cortante que provoque la rotura de las paredes celulares y esto haga incrementar la solubilidad del fango efectivamente. Las referencias existentes acerca de la presión de trabajo difieren entre sí, por ejemplo, la tecnología CambiTHP comercial aplica alrededor de 6 a 9 bares. Sin embargo, estudios defienden que se puede llegar a operar a presiones de hasta 21 bares, aunque su implicación en el funcionamiento de la instalación a largo plazo no se conoce (Photilangka et al., 2008)

Realizar una evaluación sobre que combinación de intervalos de valores para los parámetros de operación de la HT que se haya instalado sean los más eficientes o mejores resultados obtengan resulta bastante complicado, ya que aunque haya un número significativo de estudios sobre el proceso HT hay realmente pocas revelaciones y conclusiones reales que puedan aplicarse una instalación operativa debido a la falta de instrumentos y aparatos convencionales para la

realización de pruebas a escala de laboratorio. Esto es un aspecto vital para poder entender el alcance de los estudios que se puedan revisar para optimizar una instalación HT, ya que aunque existan estudios que revelen unas determinadas condiciones óptimas de operación si no se prueban a gran escala no tiene gran validez, debido a que hay muchos factores que no se podrán tener en cuenta, como el pH, la temperatura ambiente, el tipo de fango del que se disponga en un caso de estudio determinado y sobre todo el funcionamiento de la instalación, que no ofrecerá los mismo resultados una HT a gran escala que una en planta piloto.

Si tomáramos como referencia la cantidad y tipología del fango a tratar, se tienen referencias de numerosas instalaciones realizadas a gran escala en plantas de tratamiento (Kor-Bicakci et al., 2019) que diferencian entre 2 tipos de tratamiento: (1) lisis parcial, cuando sólo el fango activado residual es térmicamente pretratado o (2) una lisis completa, cuando toda la corriente de fango (primario y secundario) sufre hidrólisis térmica. Las características del fango a tratar es otro parámetro importante a tener en cuenta, ya que de este dependerán otros parámetros de operación de la instalación como la temperatura de trabajo o su integración energética. Además, el fango primario destaca por su contenido en lípidos, el cual es más fácilmente biodegradable en comparación a las proteínas, que es el componente mayoritario del fango secundario (Wilson et Al., 2009). Por tanto, este parámetro es esencial a la hora de realizar un estudio de la HT ya que, debido a sus diferentes características, la digestión anaerobia varía su rendimiento según el tipo de fangos que alimentes (Carrere et al., 2008). Este estudio demostró el impacto relacionado con la tipología de los fangos revelando una tendencia lineal positiva entre la biodegradabilidad inicial del fango y su eficiencia en el tratamiento térmico. No obstante, la HT se centra en explotar al máximo el potencial de biometanización del fango de entrada, y en este caso, resulta mucho más rentable llevar a tratamiento el fango secundario que el fango primario.

Otra gran diferencia entre ambos reside en los costes de instalación y operación que suelen incrementarse al instalar una configuración HT de lisis completa. No obstante, además de que se conseguiría aumentar la cantidad de biogás producida se conseguiría higienizar el 100 % del fango producido por la planta. Esto no solo afecta al propio coste de la instalación, sino que según se trate el fango secundario únicamente, o la mezcla entre secundario y primario, las condiciones de operación variarán debido a que las características del fango no son las mismas en ambas situaciones. Por ello, otros de los aspectos a tener en cuenta será las propiedades, morfología, concentración y composición del fango que se alimente a la HT (Ngo et al., 2021).

Todavía no existen estudios que hayan analizado las implicaciones adicionales que comportan trabajar con una mezcla de fangos tan heterogénea, ya que es susceptible a empeorar su funcionamiento debido a que el fango primario tiene un contenido energético diferente al secundario.

Independientemente de la mezcla de fango que se quiera adoptar para llevar a hidrólisis como caudal de alimentación, las propias características del fango que se tratan en la EDAR son las que determinarán y reajustarán las condiciones de operación óptimas de la HT. Esto resulta obvio al realizar una búsqueda bibliográfica, por ejemplo, existen estudios que determinan que al trabajar con 145 C° y un tiempo de 20-30 minutos no se observaba un cambio significativo en la producción de biogás (Devos et al., 2021), mientras que otro estudio (Dwyer., 2008) determinó que en un pretratamiento de fango secundario la temperatura óptima de operación eran los 145 C°. En estos 2 estudios se realizaron en plantas HT similares, pero en lugares del mundo diferentes, con diferentes propiedades de fango producido y diferentes condiciones ambientales. Por ello, la única forma de poder determinar el rango óptimo de los parámetros operacionales de una HT es mediante su ajuste a gran escala o, por consiguiente, en una planta piloto, y trabajando con el fango de diseño de la instalación real.

9.2.1 Reducción de sólidos volátiles

La reducción de sólidos volátiles a la salida de la DA, constituye un beneficio adicional que comporta la instalación de una HT como pretratamiento. Los gráficos y figuras expuestas se han confeccionado a partir de los resultados obtenidos por diferentes estudios y observaciones. No obstante, tan solo se han podido observar las implicaciones con el aumento de temperaturas en el fango secundario/activado, debido a la falta de datos que se tienen sobre el fango primario. En este caso, el estudio se centra en el valor obtenido de VSR y en el aumento de VSR tras implantación de hidrólisis, diferenciando entre mezcla de fangos y fango secundario (únicamente como pretratamiento). Esta comparativa se puede observar en las figuras 4,5,6 y 7.

Esta representación en gráfico Box-Whiskers nos permite visualizarlos de una forma conjunta mucho más clara. Observamos que los valores de SVR fueron significativamente mayores en el rango de temperatura de $[160-200]$ °C, en comparación con $[100-140]$ °C. Se observó una diferencia significativa entre rangos $[100-140]$ °C y $[140-160]$ °C para el incremento de VSR. No se encontró ninguna diferencia significativa tanto para el valor de SVR como para el indicador de incremento de SVR entre $[140-160]$ °C y $[160-200]$ °C. Además, se observa como a partir de los 100 C° ya existe una reducción de sólidos en un 50 %, lo cual refuerza la afirmación de que el proceso HT se puede llevar a cabo a partir de los 100 C°.

Específicamente, se observa un incremento de un 5%, 15% y 19%, respectivamente para cada rango de temperatura. Generalmente se espera entre un 26-35 % de reducción de SV, observándose 38 %, 43 %, 49% respectivamente para cada rango, cumpliéndose esta premisa con creces.

Con respecto a los resultados obtenidos para la mezcla de fangos, no se ha observado un impacto significativo al compararlo con los obtenidos en la HT del fango secundario. Esto puede ser debido a la falta de datos que se han encontrado para los primeros rangos de temperatura, aunque esto se asocia además a la inherente biodegradabilidad del fango primario, ya que su composición no sinergiza con el proceso HT (Carrere et al., 2010).

En orden ascendente de rangos de temperatura, hay aumentos del RSV de 2,7%, 9 %, 8 % destacando así la utilidad de la hidrólisis térmica incluso para lodos mixtos.

Por ello, según los resultados obtenidos y relacionándolo con el funcionamiento de una instalación HT, se concluye que el rango óptimo de Tª con respecto a la reducción de SVR es el de $[140-160]$ C°. No obstante, para fango activado los resultados son más favorables por encima de los 160 C°, aunque esto no se sustenta al trabajar con la mezcla de fangos en la que la media tiende a disminuir al aumentar las temperaturas por encima de los 140 C°. Por ello, a medida que aumentamos la temperatura, también supone un incremento en la variación del rendimiento del parámetro VSR.

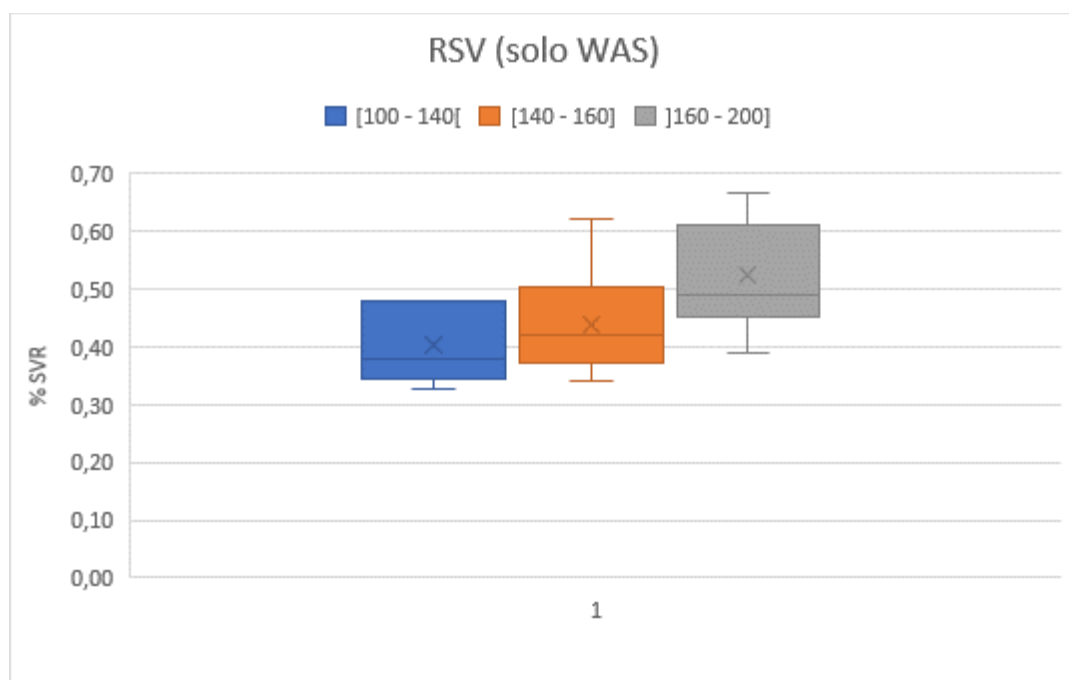


Figura 5. Gráfico del SVR en fango secundario

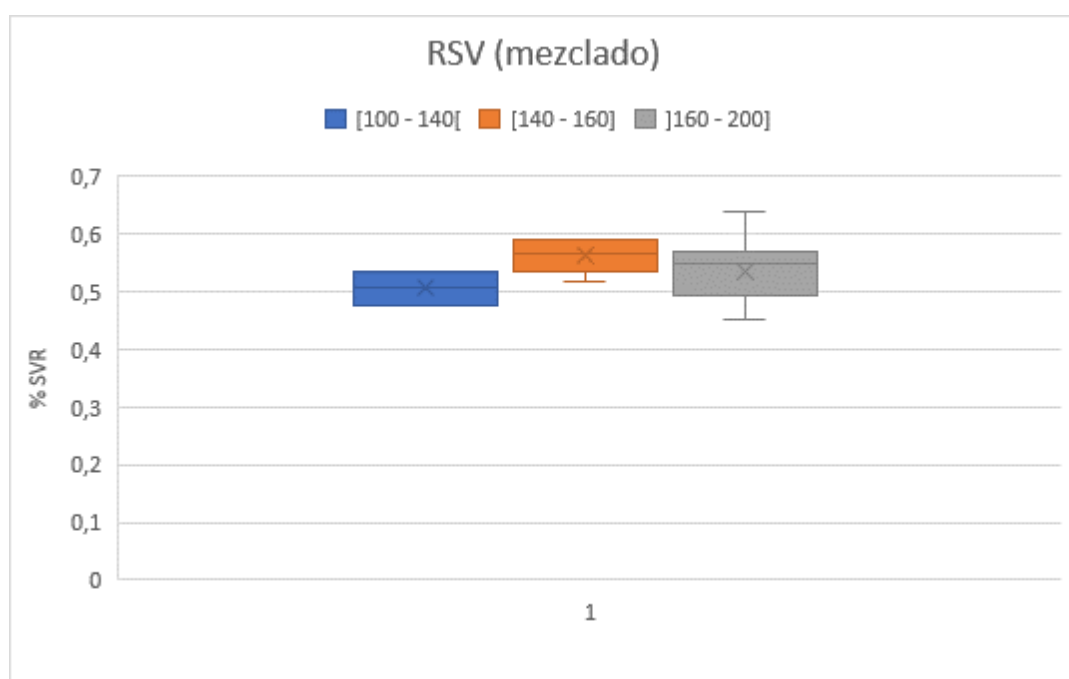


Figura 6. Gráfico del SVR en mezcla de fangos

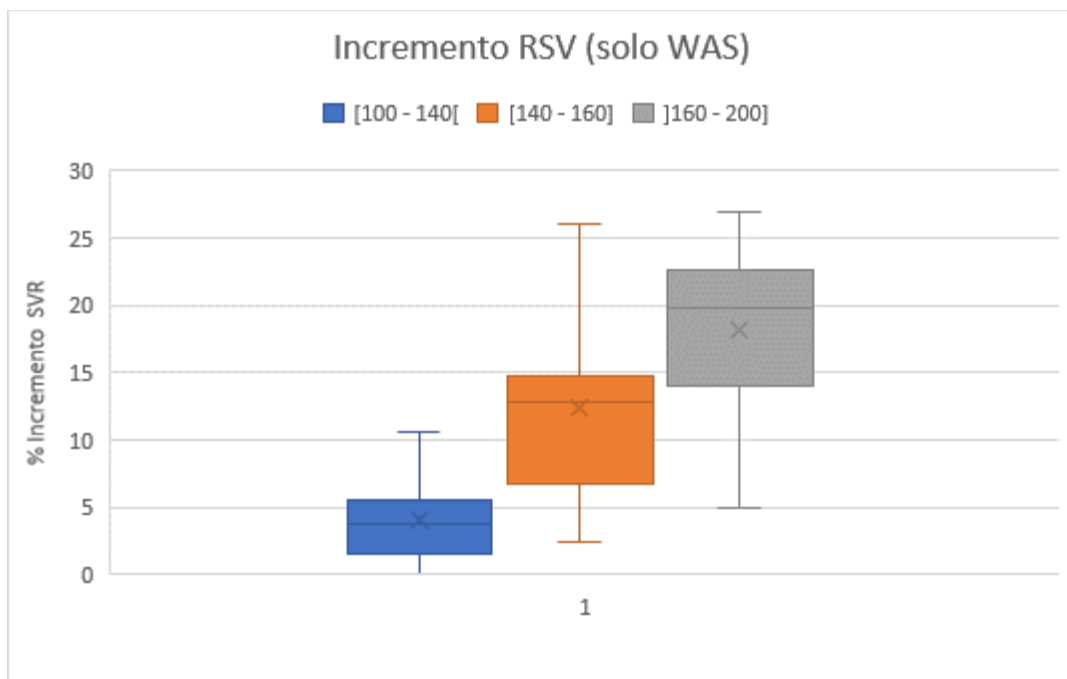


Figura 7. Gráfico del incremento de SVR en fango secundario

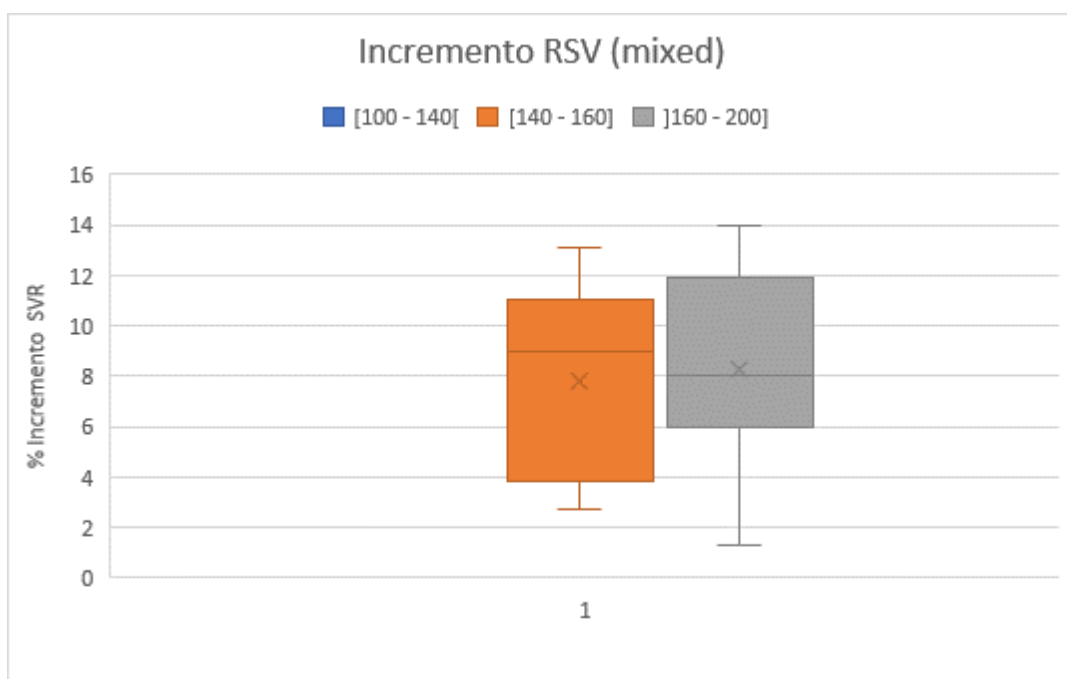


Figura 8. Gráfico del incremento de SVR de la mezcla de fangos.

9.2.2 Producción de metano

La producción de metano es uno de los parámetros que más suelen utilizarse para evaluar el rendimiento de la digestión anaerobia, ya que es un indicador que refleja el potencial que tienen los digestores para constituir una fuente de energía aprovechable. Por ello, analizar y optimizar este parámetro resulta vital, sobre todo para las plantas de cogeneración que se nutren del biogás que generan en estos procesos. El biogás generado puede ser utilizado para generar calor y electricidad, cuando se alimentan a motores de cogeneración, o también denominados sistemas CHP.

Observando los resultados utilizados para el análisis, observamos el significativo impacto que tiene el rango térmico de operación del proceso HT como pretratamiento en la producción del biogás. Las diferencias más apreciables se observan al comparar los resultados obtenidos entre los rangos de temperatura de [100 C°-140 C°] y [140 C°-160 C°], aunque no son tan significativos entre [140 C°-160 C°] y [160 C°-200 C°]

Esto coincide con las revelaciones realizadas por ciertos estudios (Dwyer et al., Wilson et al.,) en las que no se observa un aumento significativo al incrementar la temperatura de trabajo de la HT de 140 C° a 170 C°.

La tendencia observada demuestra un aumento en la producción de biogás a medida que incrementa la temperatura del proceso, específicamente obteniendo 29%, 48% y 59% respectivamente siguiendo el orden marcado de rangos de temperatura. No obstante, numerosas publicaciones demuestran que al trabajar la HT en temperaturas críticas (> 175 C°) se pueden desencadenar una serie de reacciones indeseables (por ejemplo, la reacción Maillard) que provocan la generación de compuestos inhibidores como las melanoidinas. Esto, asociado al hecho de que trabajar por encima de los 140-150 C° no reporta un beneficio que sea relevante con respecto a la producción de biogás, hace que trabajar en rango de temperatura como el de [160-200 C°] sea difícilmente implementable en una instalación HT real.

Con respecto al incremento en la producción de biogás, parece que al trabajar con mezcla de fangos se obtiene un mayor incremento en la producción de metano al trabajar con un rango de temperaturas intermedio, rompiendo con la linealidad que se observaba al aumentar la temperatura de trabajo. Además, no se reporta beneficio alguno al comparar la HT cuando trata el fango secundario o la mezcla de secundario y primario. Lo cual concluye, que el trabajar con el fango primario en la HT no optimiza la producción de biogás, debido a su inherente biodegradabilidad.

Por tanto, los resultados obtenidos en esta parte del estudio son similares a los de VSR, determinando una temperatura mínima de trabajo de 140 C°, aunque sin un máximo definido (aunque la literatura defiende que no se debe de trabajar por encima de los 175 C°).

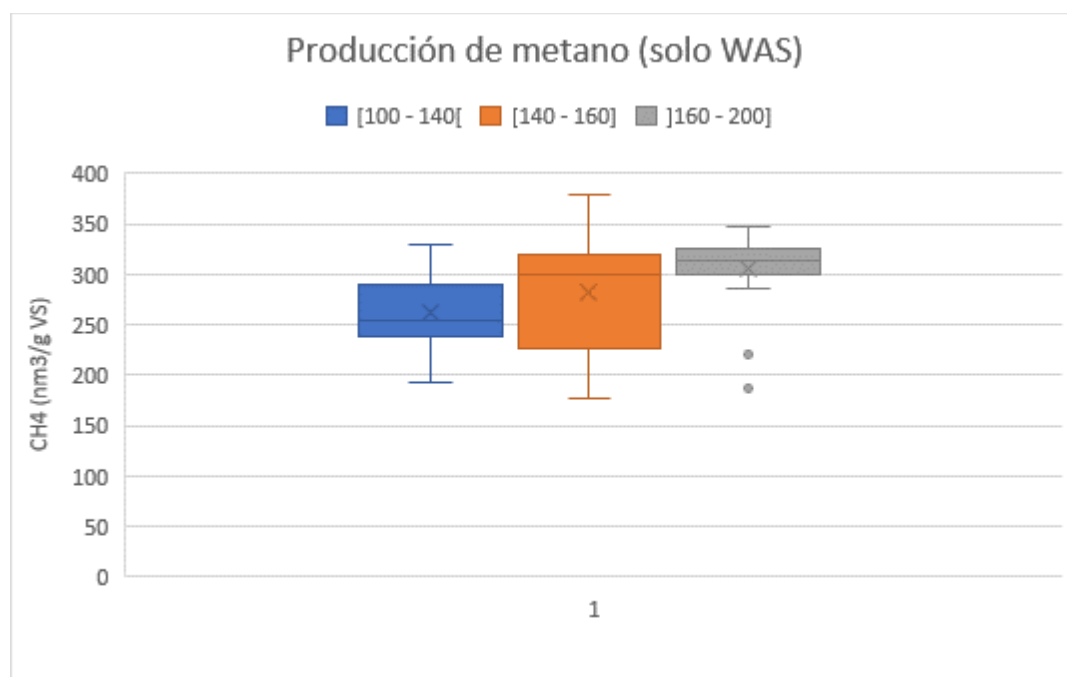


Figura 9. Gráfico de la producción de metano del fango secundario

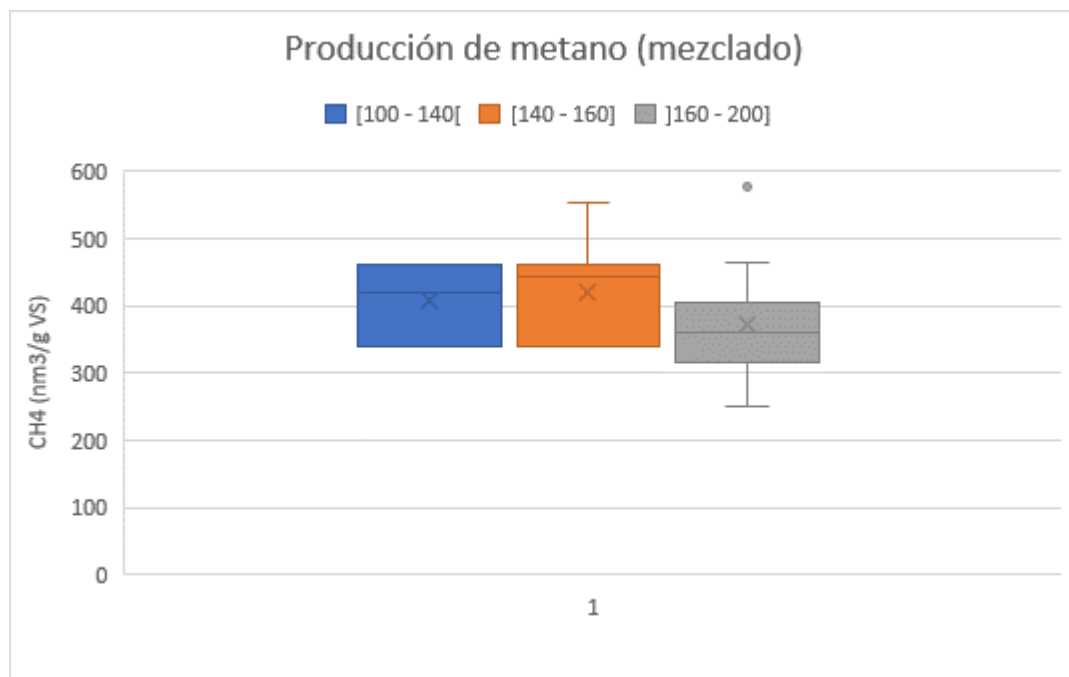


Figura 10. Gráfico de la producción de metano de la mezcla de fangos

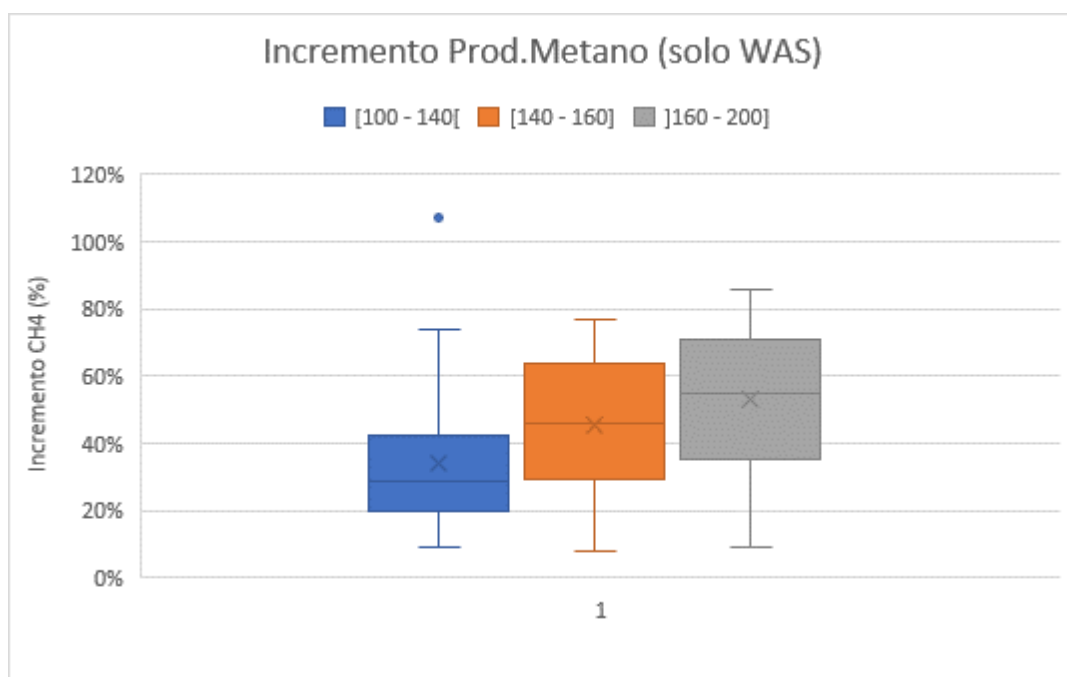


Figura 11. Gráfico del incremento en la producción de metano del fango secundario

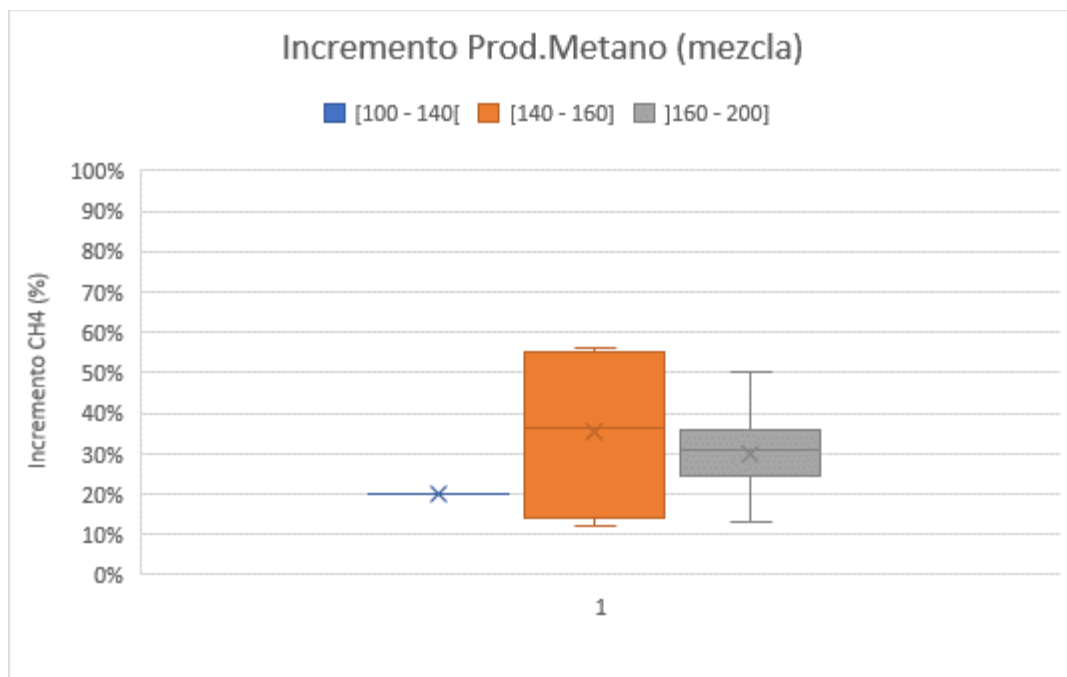


Figura 12. Gráfico del incremento en la producción de metano de la mezcla de fangos.

9.2.3 Deshidratabilidad del digestato

Para el estudio de siguiente parámetro tan solo se cuenta con resultados obtenidos para la mezcla de fangos. No obstante, debido al limitado impacto que comporta el hecho de trabajar con una mezcla de fangos o tan solo el activado, estos resultados de deshidratabilidad se pueden extrapolar al trabajar solo con fango secundario en la HT.

Hay numerosos reportes que han demostrado la mejora de la deshidratabilidad cuando se implementa una HT previo a digestión anaerobia. Por ejemplo, se ha revelado que la HT mejora el contenido de solidos secos en el digestato obtenido tras digestión mesofílica en un 10 % adicional, pudiendo llegar a conseguir un contenido de solidos del 30 % en la composición del digestato final (Barber et al., 2016). Si no fuera implantada, tan solo se esperaría un 22 % para la mezcla de fangos digerida tras el paso por deshidratación mecánica.

Observando los resultados obtenidos se observa un incremento de la deshidratabilidad al aumentar la temperatura en los rangos de trabajo de [140-160 C°] y [160-200 C°], obteniendo valores de 30% y del 33 %, respectivamente. Estudios revelan la mejora de la filtrabilidad cuando se trabaja por encima de 150 C°, Por encima de esta temperatura se demostró un incremento lineal de esta capacidad a medida que la temperatura se incrementaba (Fernandez-Polanco et al., 2008).

La deshidratabilidad del digestato mejora según 2 fenómenos principales: 1) La degradación de polímeros extracelulares (EPS) lo cual reduce su capacidad de retención de agua y 2) la estimulación de su floculación, lo cual mejora el proceso de generación flóculos grandes, reduciendo la aparición de flóculos finos o pequeños (Neyens et al., 2004). La destrucción de EPS que mantiene el agua intersticial es uno de los procesos que ocurren durante la hidrólisis, y juega un papel vital en la deshidratabilidad del digestato posteriormente obtenido.

Con respecto a deshidratación del fango, se debe de tener cuenta que la HT aumenta la demanda de dosis de polielectrolito, que es necesario para mejorar la floculación y obtener un fango mejor

concentrado. El poli a dosificar en la HT dependerá del tipo de fango que se trata y las características del polímero.

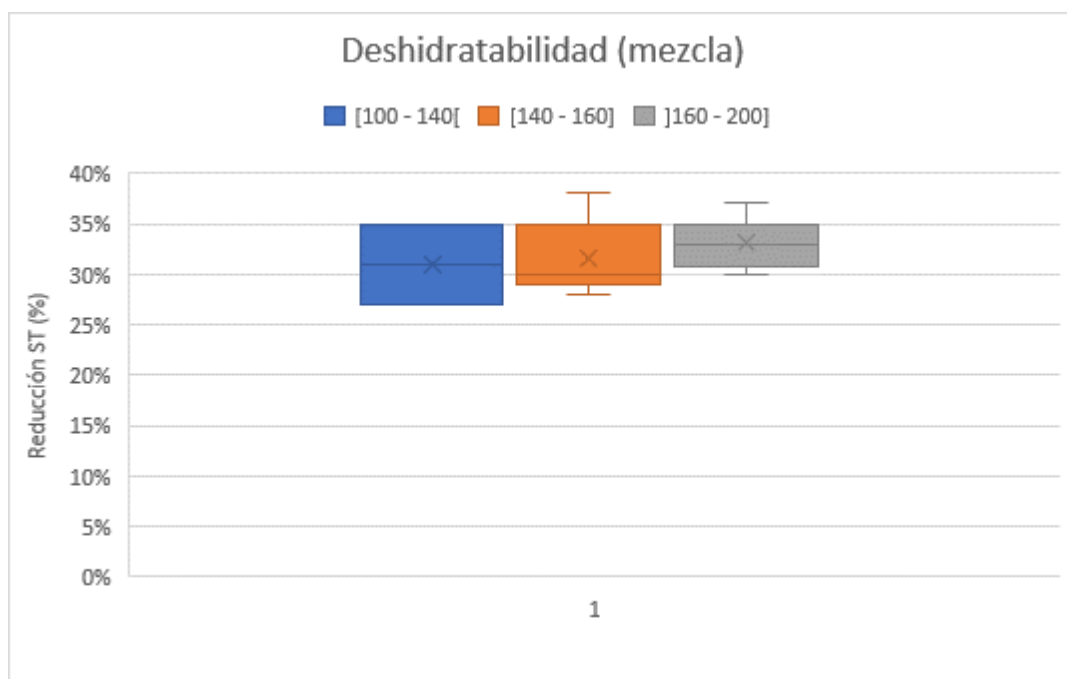


Figura 13. Gráfico de la deshidratabilidad de la mezcla de fangos.

9.2.4 DQO soluble de salida

Se ha demostrado en numerosos estudios como el incremento de la solubilización del fango tratado en la HT aumenta con la temperatura de trabajo. No obstante, al comparar este efecto que provoca la HT con la biodegradabilidad posterior del fango pretratado se llega a la conclusión de que un aumento del contenido soluble no siempre supone un aumento de su capacidad de biometanización, especialmente a temperaturas muy altas (Higgins et al., 2014).

La primera afirmación se cumple al observar el gráfico, observando una clara tendencia lineal positiva del parámetro estudiado a medida que la temperatura se incrementa. Este incremento es sustancialmente más abrupto en el tercer rango de temperaturas [160-200 C°], con lo que se puede concluir que la solubilidad aumenta de forma exponencial a partir de los 160 C°.

Al trabajar con temperaturas tan altas se puede dar una sobreproducción de DQO soluble y nitrógeno orgánico disuelto, debido a ciertas reacciones que pueden ocurrir como la Maillard o Amadori que se explican en detalle en el apartado “Inhibidores tras HT”.

No obstante, hay estudios que defienden que la aparición de estos no está relacionada con las altas temperaturas, sino al propio proceso de hidrólisis, explicado por 1) una mayor concentración de fango a la entrada y 2) un incremento en la solubilización del contenido de DQO.

Analizar el contenido de DQO soluble a la salida del digestor es importante, ya que el retorno de este efluente a cabecera puede tener ciertos efectos en el funcionamiento del resto de la EDAR. Pocas investigaciones se han realizado con el objetivo de estudiar estos efectos, no obstante, se ha reportado un aumento en la concentración de compuestos inertes solubles (Phothilangka et al., 2008), de 0,9 Kg DQO/m³ a 5,7 Kg DQO/ m³ tras la implantación de un pretratamiento HT. La presencia de estos compuestos inertes causó incrementos en la concentración de DQO en el efluente de 10 mg/L, lo cual redujo el rendimiento de eliminación de DQO del biológico de un 95% a un 93%.

Otro estudio fue el primero en establecer una correlación exponencial entre las temperaturas operativas de un proceso HT y la producción de compuestos orgánicos recalcitrantes o DQO recalcitrante. Los resultados propusieron un incremento de DQOsol del 3,9 % al 8,4 % al operar en HT a temperaturas de 130-170 C°, respectivamente. Realizar las revisiones pertinentes parece necesario, ya que el efluente retornado puede tener implicaciones serias el tratamiento biológico posterior. Actualmente, solo se tienen referencias de aparición de compuestos inhibidores de las bacterias annamox, inhibiéndolas de forma remanente, aunque se diluya con el agua residual influente (Gu et al., 2018)

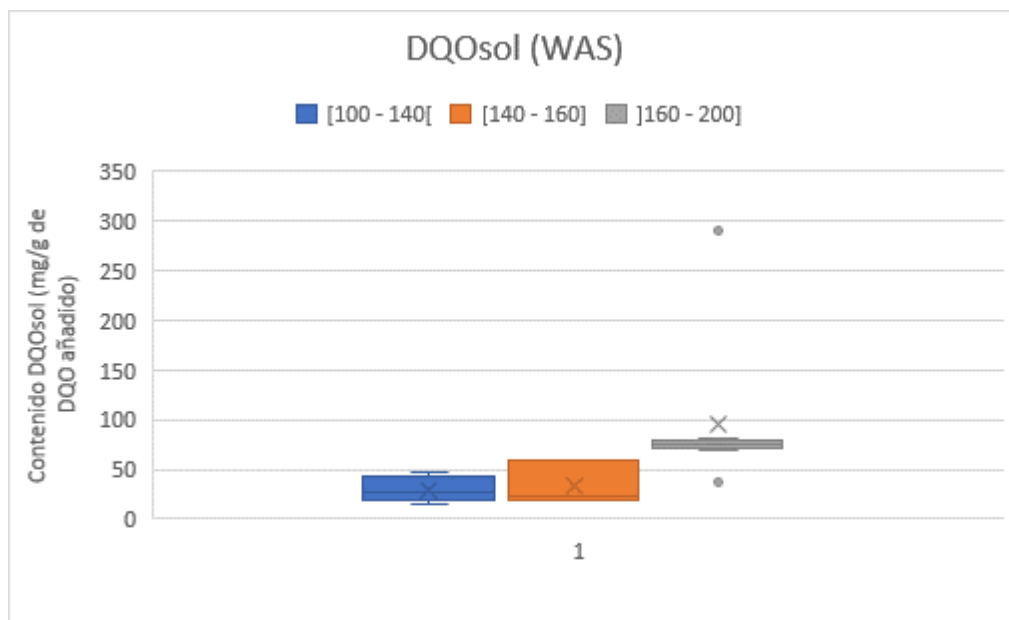


Figura 14. Gráfico de la DQOsol del fango secundario

9.2.5 Nitrógeno

Debido a la falta de resultados analíticos de contenido de amonio y nitrógeno, en este apartado se tratará de ofrecer una visión basada en la literatura.

El escurrido deshidratado procedente de una digestión anaerobia con hidrólisis térmica como pretratamiento contienen concentraciones de nitrógeno muy superiores a las obtenidas por el escurrido de una digestión convencional mesofílica (Photilagnka et al., 2008). Este licor del proceso de HT normalmente retorna a cabecera de planta y puede afectar al proceso de nitrificación y a la remoción de nitrógeno total en las consiguientes unidades del tratamiento secundario. De acuerdo con algunos estudios (Wilson et al., 2011) al implementar un pretratamiento HT, el escurrido del digestor contaba con una concentración aproximada de 2500 mg/l, la cual había incrementado tras dicha instalación si se comparaba con la que se obtenía en el proceso convencional, de 1800 mg/L. El aumento de estas concentraciones es producido por diversos efectos 1) un incremento en el ratio de descarga del fango en el digestor, debido a la reducción de su viscosidad, 2) el aumento de solubilidad producido por el proceso HT y 3) el incremento de biodegradabilidad del fango, lo cual mejora la liberación de nutrientes.

Aun así, aunque el proceso de hidrólisis térmica incrementa las concentraciones de nitrógeno el tratamiento biológico secundario tiene un potencial de remoción de nutrientes el cual es capaz de poder tratar eficientemente estas sobrecargas de nitrógeno (Ahuja et al., 2015). No obstante, hay que tener en cuenta que gran parte del nitrógeno formado en estas condiciones de temperatura crítica es recalcitrante (rDON), bajo una forma orgánica soluble. Este no puede ser eliminado biológicamente por acción de las bacterias (Dwyer et al., 2008). Normalmente, el contenido recalcitrante compone el 20-85 % del nitrógeno orgánico total producido por estos procesos.

Por tanto, se concluye que existe una correlación lineal entre la concentración de nitrógeno orgánico con respecto al incremento de la temperatura de trabajo, observándose incrementos de hasta el 25 % cuando se incrementaba la temperatura de la HT de 120 C° a 150 C° (Ahuja et al, 2015). Este incremento con la temperatura no solo es causado como consecuencia del aumento de la solubilidad inherente a la hidrólisis térmica, sino también a que el hecho de trabajar a temperaturas críticas habilita la participación del grupo amino en la reacción de Maillard, derivando en la generación de compuestos recalcitrantes difícilmente biodegradables e inhibidores.

El incremento del contenido recalcitrante de nitrógeno orgánico a causa de determinadas condiciones de operación de la HT ha sido uno de los temas recientes de comprensión y entendimiento. Un reciente estudio revela que la formación de este compuesto depende de una serie de parámetros 1) tipo de fango, 2) Duración del proceso HT, 3) Temperatura de operación 4) PH y presencia de iones metálicos. Debido a que el proceso depende numerosos parámetros, se recomienda trabajar con la temperatura mínima que permita obtener los beneficios de diseño de una instalación HT. Además, se caracterizan por ser compuestos citotóxicos, con lo que su presencia en el escurrido del digestor tras deshidratación puede llegar a afectar al tratamiento biológico secundario, afectando específicamente al proceso de eliminación de nitrógeno (tal y como ocurre con la DQOsol recalcitrante).

Aunque exista un consenso que dictamine esta relación linear existente entre el contenido de nitrógeno orgánico (y recalcitrante) con el incremento de la temperatura en la HT, serán necesario estudios que permitan cuantificar el contenido de nitrógeno orgánico disuelto (DON) y su fracción recalcitrante (rDON) en el escurrido digerido con respecto a diferentes condiciones de operación de la HT, con el fin de optimizar tanto el funcionamiento de la hidrólisis térmica instalada como del tratamiento biológico secundario de eliminación de nitrógeno.

Con lo cual se concluye que, al trabajar con altas temperaturas en la HT las concentraciones de nitrógeno orgánico y su contenido recalcitrante se incrementan lo cual puede llegar a provocar problemas en el resto de la instalación.

9.2.6 Fósforo

La implicación que tiene la HT en las concentraciones de fósforo en el efluente del digestor son difíciles de predecir, ya que dependen del diseño de la línea de tratamiento de aguas residuales (eliminación biológica de fósforo o/y uso de iones metálicos como magnesio, calcio, aluminio y hierro en la línea de tratamiento de agua). Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura del proceso incrementa la solubilización de nutrientes, como el fósforo. Con lo cual se prevé un aumento del fosfato en las corrientes escurridas de deshidratación de la DA con hidrólisis en comparación con la digestión convencional.

Aún no existen estudios que revelen el impacto que tiene este incremento de fosforo en el funcionamiento de los reactores biológicos. Actualmente, debido a la creciente demanda de fósforo la implementación de tecnologías de recuperación de nutrientes debería de ser un campo de investigación de gran interés, sobre todo para aquellas plantas de tratamiento que ya tengan instaladas una tecnología HT.

9.2.7 Rango de temperatura óptimo

Entonces, según lo comentado anteriormente, resulta claro que el rango de temperatura óptimo de trabajo será el de [140-160 C°], y su justificación viene expuesta y cuantificada en la tabla 2.

Índices de rendimiento (IR)	Cuantificación		
	[100-140 C°]	[140-160 C°]	[160-180 C°]
Remoción de sólidos volátiles			
Producción de metano			
Deshidratación			
Calidad del escurrido			

Tabla 2. Cuantificación de los rangos térmicos de operación según los resultados obtenidos en los índices de rendimiento. En color verde Resultado Óptimo, en amarillo Resultado Aceptable y en rojo Resultado Inaceptable.

9.3 Formación de inhibidores en hidrólisis térmica

Como hemos comentado en apartados anteriores, la hidrólisis térmica es un proceso que lleva consigo una serie de ventajas que permiten optimizar las plantas de tratamiento en varios aspectos de su funcionamiento. No obstante, las condiciones críticas de presión y temperatura pueden llegar a afectar la composición y morfología del fango, llegando a generar reacciones inesperadas que provocan la aparición de compuestos indeseables como productos de estas reacciones súbitas (Gu et al., 2018). La mayoría de estos productos o reacciones que se desencadenan son inhibidores de los procesos anaerobios, con lo que su aparición provocaría que no se optimice la producción de biogás además de otros efectos negativos a la salida de la digestión.

Uno de los compuestos inhibidores que más se han documentado como consecuencia de la HT son los compuestos recalcitrantes. Los compuestos recalcitrantes o recalcitrantes orgánicos son una serie de compuestos que pueden llegar a generarse en el contexto de altas temperaturas en las que opera la hidrólisis térmica, derivando en una disminución del potencial de biometanización del fango secundario. Según numerosos estudios, temperaturas por encima de los 190 C° provoca un incremento de los refractarios en su fase líquida (Bougrier et al. 2016). Además, la producción de biogás incrementa al trabajar entre 130 – 170 C° mientras que al trabajar por encima de los 175 C° (Barber et al., 2016), no se observa ningún beneficio en la producción del biogás. El análisis de la formación de compuestos inhibidores es un aspecto que no se suele tener en cuenta en la mayoría de plantas, mayoritariamente debido a su desconocimiento. Otro de los compuestos recalcitrantes más documentados en instalaciones y plantas piloto de HT son las melanoidinas, los cuales son generados como producto de la reacción de Maillard.

La reacción Maillard, es una reacción química no enzimática que se produce entre el azúcar reductor y el grupo amino a altas temperaturas, formando polímeros de color marrón-oscuro que oponen resistencia al paso del UV (refractan) y que son difícilmente biodegradables. La química subyacente al Maillard entraña reacciones de una gran complejidad debido a la gran variedad de reacciones internas que la componen, incluyendo condensación, ciclización, deshidratación, retroaldolización, isomerizaciones, y su fuerte dependencia de ciertas condiciones de reacción como la temperatura, tiempo, pH y composición de los reactivos (Ellis, 1959). El mayor campo de estudio que se ha documentado la ocurrencia de este tipo de reacciones son el sector de la comida y alimentación (Echavarria et al. 2012). No obstante, en el caso de las plantas de tratamiento la ocurrencia de estas reacciones es posible debido a que la alimentación de fangos de depuradora contiene una gran cantidad de proteínas y polisacáridos, sobre todo el fango secundario, y debido a las condiciones de altas temperaturas a las que trabaja un pretratamiento de HT habilita que estas reacciones químicas se desencadenen (Zhang et al. 2020). Se ha documentado que las reacciones de Maillard, empiezan a ocurrir a partir de los 100 C°, y que su potencial está determinado por la concentración de aminoácidos del fango alimentado a HT, el aumento de la temperatura y el tiempo de residencia a la que se mantiene la operación de la HT a esa temperatura (Roslyakov et al. 2017, Rodríguez-Abalde et al., 2011). Específicamente, las

melanoidinas son producidas como consecuencia de la interacción y polimerización de compuestos moleculares intermedios de bajo peso molecular. La evolución en la producción de inhibidores se puede observar en un gráfico resumido en la Figura 15, a grandes rasgos.

Un estudio (Shuai Wang, 2024) se encargó de analizar la ocurrencia de estos compuestos a la salida de una HT que opera a diferentes condiciones de trabajo y la implicación que tiene la presencia de estos compuestos en la posterior digestión y producción de biogás, revelando que al superar aproximadamente los 160 C°, se producía la aparición de estos compuestos suponiendo un aumento de la DQO soluble y una disminución en la producción del biogás entre el 49,1 – 89,9 %. Esta disminución es causada por la inhibición de las metanogénicas acetoclásticas y acidogénicas, revelando así que estos compuestos también pueden afectar la propia distribución proporcional natural microbiológica del digestor. Este efecto negativo no solo afecta a la producción de biogás y al rendimiento de la EDAR sino que, además, las melanoidinas con colores oscuros y alto contenido de nitrógeno orgánico tienen un gran potencial para contaminar el medio natural y el suelo (Verma et al. 2021). Además, se ha demostrado que la presencia de estos compuestos produce el consumo de proteínas y en algunos casos puede derivar en la desorción de ácidos húmicos del fango (Yang et al., 2022), lo cual reduce la eficiencia de la propia hidrólisis térmica. Además de su pobre biodegradabilidad estos compuestos pueden generar efectos biológicos adversos, como genotoxicidad o citotoxicidad (Wang et al., 2011) El factor de estudio más relevante a la hora de evaluar la implicación de la presencia de melanoidinas (al igual que otros compuestos refractantes) es su peso molecular, que incrementa dependiendo de la temperatura de calentamiento y el tiempo de exposición (Wilson and Novak, 2009).

Además, se ha reportado que el proceso de hidrólisis provoca un aumento en la producción de ácidos grasos volátiles (AGV), específicamente del doble de su producción normal al operar en un pretratamiento HT a 160 C° durante 30 minutos (Jeong et Al., 2019), debido a la lisis de lípidos insaturados. La concentración de AGV's tiene un rol muy importante en la posterior digestión anaerobia, sobre todo en el proceso de metanogénesis. Niveles elevados de AGV's puede asociar altas concentraciones de propiónico y butírico las cuales pueden provocar una inhibición del crecimiento de las metanogénicas. Hay estudios que respaldan estas afirmaciones (Wagner et Al., 2011), determinando que concentraciones superiores a 8 mg/l (Manimin et Al.; 2017) de butírico y altas concentraciones de propiónico pueden inhibir completamente el proceso de producción de metano en los digestores anaerobios.

Como se ha comentado anteriormente, las reacciones formadoras de inhibidores ocurren a temperaturas muy altas, a un tiempo de exposición determinado. En la mayoría de referencias documentadas se trabajan a tiempos de reacción entre los 30-60 minutos. No obstante, nuestro caso específico de estudio tiene una residencia a altas temperaturas de segundos con una operatividad continua, evitando estos escenarios. Por ello, es un factor que resulta interesante documentar, pero su implicación en nuestro análisis posterior es irrelevante.



Figura 15. Esquema teórico de la influencia del aumento de la temperatura en la HT

9.4 Tecnologías comerciales HT

Las tecnologías comerciales que se han desarrollado a nivel mundial se centran en explotar el mismo principio de funcionamiento, pero difiriendo en las condiciones de operación con las que trabajan (Temperatura, configuración de equipos, rendimientos...) y en su modo de operar. Estas diferencias junto con ciertas implicaciones externas tiene una fuerte repercusión que se debe identificar y estudiar a la hora de elegir la propuesta final a gran escala.

Por ello, en este apartado se describirán los aspectos más característicos de cada alternativa comercial de una forma comparativa.

9.4.1 Cambi THP

En un contexto en el que la hidrólisis térmica se ha convertido en una tecnología madura con respecto a su implementación e investigación, Cambi es la opción más referenciada con una prominencia mundial de más de 70 instalaciones en 22 países.

La idea detrás del objetivo que tiene dicha tecnología tiene dos direcciones: 1) Observando los resultados obtenidos en laboratorio trabajar el fango a altas presiones en un rango de temperatura entre los 150-180 C° comportaba una serie de beneficios para la digestión y 2) Trabajar en estas condiciones solía generar una serie de efectos negativos derivados del proceso como corrosión, toxicidad y compuestos recalcitrantes. Por ello, el proceso Cambi fue concebido para evitar los problemas del proceso.

Una de sus principales características es la de que no utilizan intercambiadores de calor. Este proceso inyecta directamente el vapor vivo producido en la caldera al fango de entrada, con el fin de calentarlo. Esto es posible debido a que integra una fase de precalentamiento, lo cual evita la situación problemática que se genera al inyectar directamente el vapor al fango frío (vibraciones, cambios en la reología). Este hecho combinado con el de que el proceso implementa una recuperación interna de calor provoca que el balance energético sea positivo, ya que todas las pérdidas del proceso son aprovechadas para la fase de calentamiento del mismo (los gases de la etapa final del proceso son utilizados en la fase de precalentamiento).

En un proceso Cambi el fango de entrada es previamente deshidratado (hasta un 16-17 % DS) y es almacenado en un silo para concentrarlo. Después, es alimentado a un pulper de mezcla y se precalienta, hasta una temperatura de 100 C° gracias a los vapores recuperados del proceso. Posteriormente, el lodo se hace pasar por el reactor, donde tendrá lugar el proceso de hidrólisis a 160 C° y una presión de 6-9 bar durante 20-30 minutos. Para llevar a cabo la rotura celular, se da la descompresión súbita (o flash) ocasionada por una caída de presión al destinar el fango a un depósito de expansión, llevándolo de nuevo a 100-105 C° de temperatura. Finalmente, se le hace pasar por una corriente de agua de dilución que lo enfría, acondicionándolo a la entrada de la digestión anaerobia mesófila. Se puede observar un esquema de su configuración en la Figura 16.

El fango hidrolizado sale con un contenido en sólidos del 14.18 % y es continuamente alimentado al digestor. Normalmente se trabaja con un contenido de DQO (la mayoría en forma de ácidos volátiles) que puede llegar a los 50000 mg/L. En la Tabla 3 se resumen las principales ventajas al pretratar el fango mediante esta tecnología. El escenario supuesto para la confección de las tablas supone únicamente la hidrólisis del fango secundario, ya que es nuestro caso de estudio.

Cuando salió al mercado esta era la opción de mayor eficiencia energética, y por lo tanto las más interesante

Ventajas
• Mejora de la deshidratabilidad del fango en un 60-80 % con respecto a la AD convencional • Aumento del biogás y la capacidad de biometanización del 45-60 % • Reducción de la producción de biosólidos del 40-50 % • Opción comercial de HT que presenta mayor reducción de la huella de carbono • Mayor número de referencias a nivel global
Desventajas
• Operación en Batch o discontinuo. Esto provoca que el tamaño de la instalación y la producción de fangos sean mayores. • Mayor necesidad de espacio para su instalación. • Trabajar a tiempos de residencia entre 20- 30 min puede provocar la aparición de recalcitrantes. Existen referencias de ello.

Tabla 3. Ventajas/Desventajas de la HT de Cambi

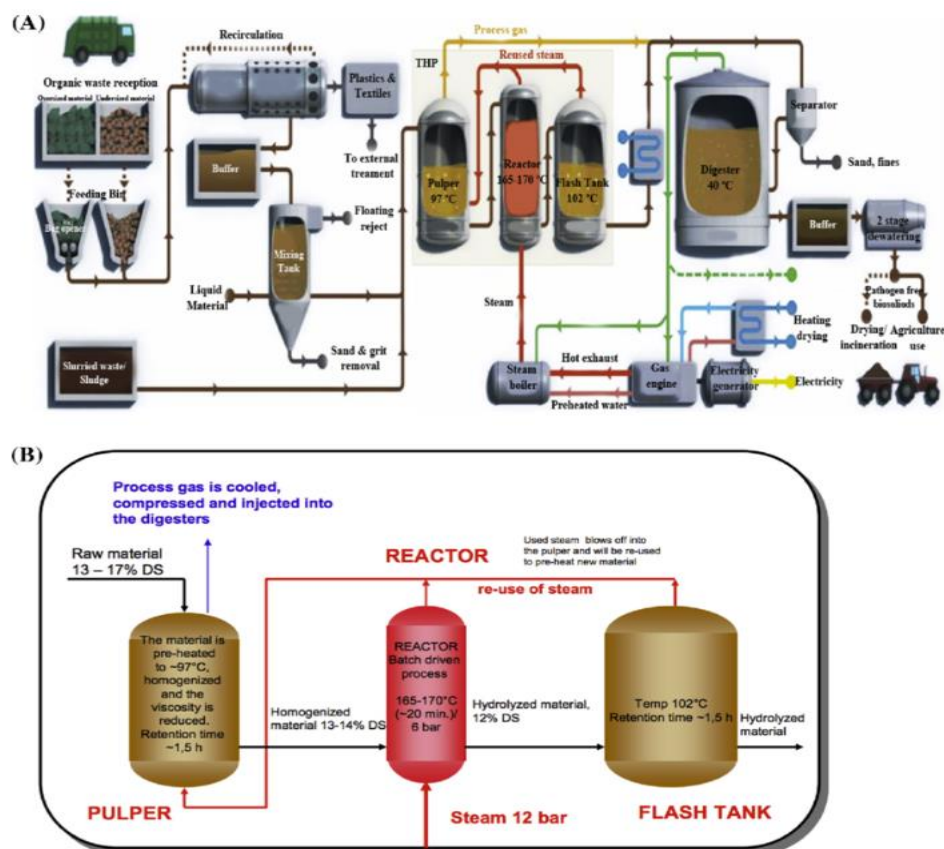


Figura 16. Esquema simplificado del proceso Cambi: A) Proceso completo B) Proceso detallado de la HT
Fuente: Pagina web oficial de Cambi

9.4.2 Biothelys

El proceso Biothelys es desarrollado por la empresa francesa Veolia. Este proceso tiene un modo de operación en Batch o discontinuo tal y como ocurre con Cambi. No obstante, en este caso se sitúan los reactores en paralelo. Esto provoca que se necesiten varias líneas de reactores, los cuales en este caso tienen la misma función. Por lo tanto, se elimina la necesidad de pulper o flash.

El funcionamiento de este proceso es similar al de Cambi, pero sin tener en cuenta los equipos anteriormente nombrados. El vapor vivo se inyecta a la entrada del reactor de hidrólisis, llevándolo a temperatura entre 160-185 C° y un tiempo de retención de 30 minutos. Previamente, es precalentado por los vapores recuperados de los otros reactores en paralelo y deshidratado hasta un porcentaje de 15-18 % DS. Se puede ver una representación gráfica del proceso en la Figura 17.

Ventajas
- Sus resultados con respecto a su eficiencia y funcionamiento presentan beneficios bastante similares a los del proceso Cambi. - Aunque opere en Batch, la inyección de vapor se realiza en continuo - Es una tecnología mas compacta y de menor requerimineto espacial que Cambi - No necesita dilución previa
Desventajas

- Al igual que el proceso Cambi, su modo discontinuo de alimentación provoca que la instalación sea de mayor envergadura y sus números de operación sean más problemáticos.
- Trabajar a tiempos de residencia entre 20- 30 min puede provocar la aparición de recalcitrantes. Existen referencias de ello.

Tabla 4. Ventajas/Desventajas de la HT de Biothelys

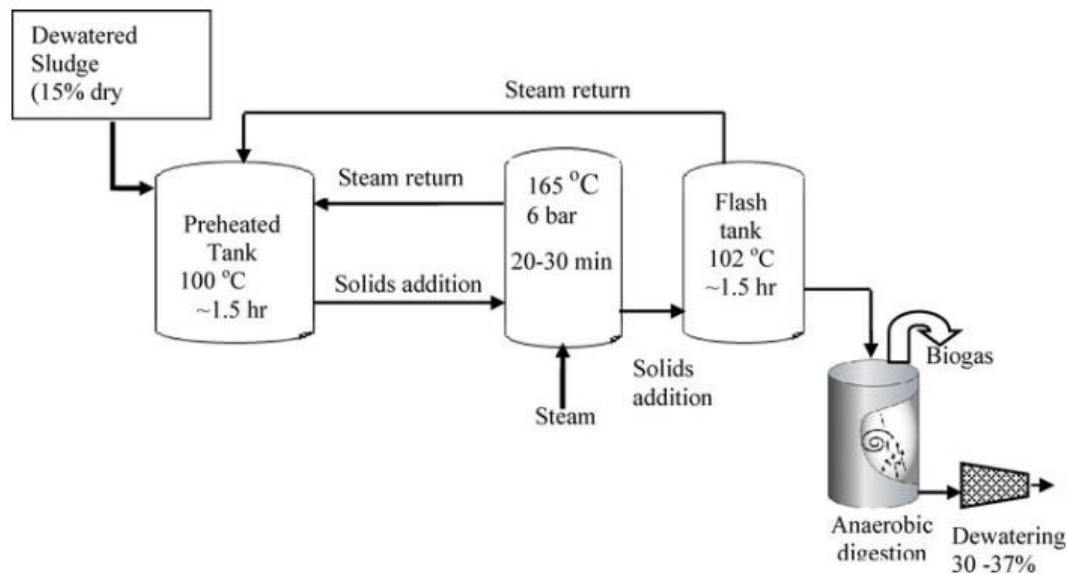


Figura 17. Esquema simplificado del proceso HT Biothelys. Fuente: Pagina web oficial de Veolia

9.4.3 Exelys

Exelys, es otra tecnología desarrollada por la empresa Veolia. Su principal característica, que la diferencia del proceso Biothelys, es que tienen un funcionamiento en continuo. Esto otorga una serie de ventajas a su funcionamiento y eficiencia, la cuales se resumen en la Tabla 2.

Las condiciones de operación son similares a las previamente expuestas: 140-165 C° y una presión entre 9-11 bar. El fango es deshidratado sobre un 20% de DS y es alimentado continuamente a un reactor tubular al que se le inyecta una corriente de vapor vivo a 165 C°. El reactor asegurará una mezcla homogénea entre fango y vapor. Posteriormente, se enfría gradualmente mediante un intercambiador con recuperación de calor hasta llegar a la temperatura de operación del digestor anexo.

Ventajas
• Su principal ventaja es la operación en continuo lo cual deriva en muchas ventajas como: • Menor requerimiento de espacio. Menor coste de instalación y de operación • Mayor facilidad de operación • Menor producción de fangos y menores gastos de gestión derivado de ello • Funcionamiento en continuo 24/7: Mayor rendimiento y mayor incremento de biogás • Al operar en continuo, se puede ajustar la cantidad de alimentación y el rendimiento a tiempo real.
Desventajas
• Número reducido de referencias ya que son tecnologías más recientes que los sistemas discontinuos. Menor capacidad de tratamiento que Biothelys. • Mayor incertidumbre con respecto a su eficiencia de funcionamiento.

Tabla 5. Ventajas/Desventajas de la HT de Exelys

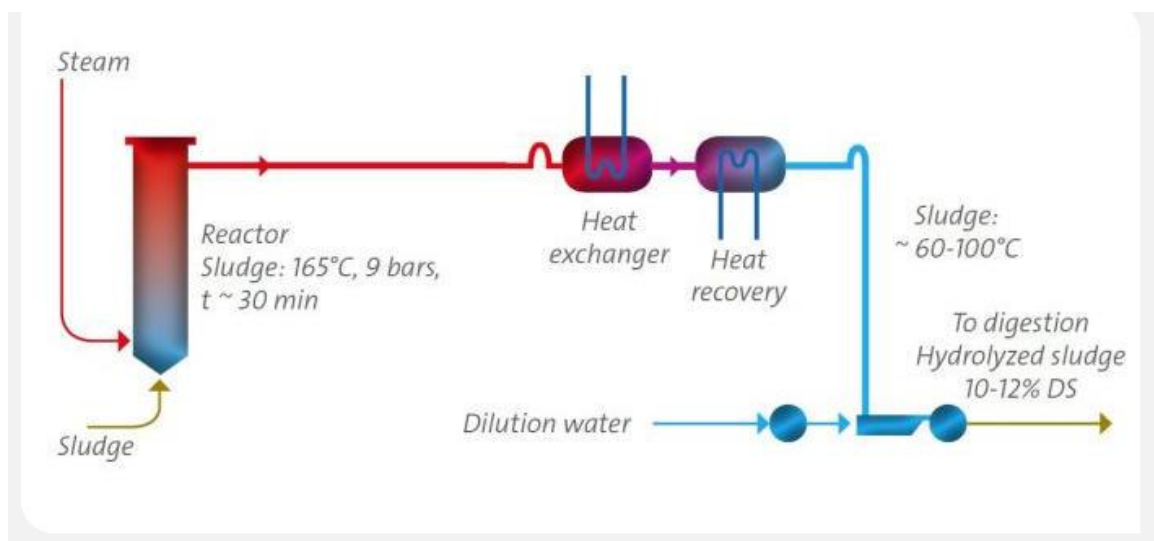


Figura 18. Esquema simplificado del proceso HT Exelys. Fuente: Pagina web oficial de Veolia

9.4.4 TPH ("Thermal Pressure Hydrolysis")

Proceso desarrollado por la compañía ATZ denvelopment center. Este sistema está pensado para el tratamiento en continuo de lodos de depuradora, residuos animales, residuos procedentes de mataderos o residuos alimenticios).

Para llevar a hidrólisis del fango influente se desarrolla un calentamiento en 2 etapas: 1) Se calienta el fango directamente mediante vapor vivo 2) Seguidamente habrá un aumento acusado de temperatura gracias a la acción indirecta de intercambiadoras de calor.

Sus principales ventajas y desventajas se exponen en la Tabla 6.

Ventajas
• Ofrece las ventajas inherentes a su funcionamiento en continuo, ya comentadas.
Desventajas
• Escasas referencias sobre plantas a escala real y ninguna sobre su funcionamiento real • Observando sus condiciones de operación (220 C° a 25 bar durante 20 minutos) se puede prever la dificultad de su operación a escala real, y los problemas que puede entrañar su funcionamiento.

Tabla 6. Ventajas/Desventajas de la HT de TPH

9.4.5 Lysotherm

El proceso de hidrólisis térmica desarrollado por la tecnología Lysotherm es patentado por la empresa *Eliquo Water&Energy*.

Tiene como fin el pretratamiento de fangos mediante su alimentación en continuo tratando fangos pre-deshidratados con un contenido de 5-12 % DS. Este es alimentado por una bomba a un intercambiador de calor donde se lleva a cabo la fase de precalentamiento. Posteriormente, se lleva al fango a temperatura de hidrólisis (175 C°). El esquema simplificado se puede observar en la Figura 19.

Su principal característica es la utilización de circuitos de intercambio para conseguir el objetivo marcado. Primero, con un circuito de aceite que se encarga del calentamiento aportando calor al fango, mientras que el segundo es un circuito de agua con función regenerativa, recuperando el calor emitido por el sistema en forma de pérdidas para su reintroducción en la fase de precalentamiento.

Ventajas
• Ofrece las ventajas inherentes a su funcionamiento en continuo, ya comentadas. • Tecnología novedosa, la cual no necesita del uso de vapor para el calentamiento del fango. No obstante, se debería de probar la eficiencia de esta alternativa.
Desventajas
• No hay referencias a escala real, solo a nivel de planta piloto. Por lo tanto, no existen referencias de su capacidad de tratamiento.

Tabla 7. Ventajas/Desventajas de la HT de Lysotherm

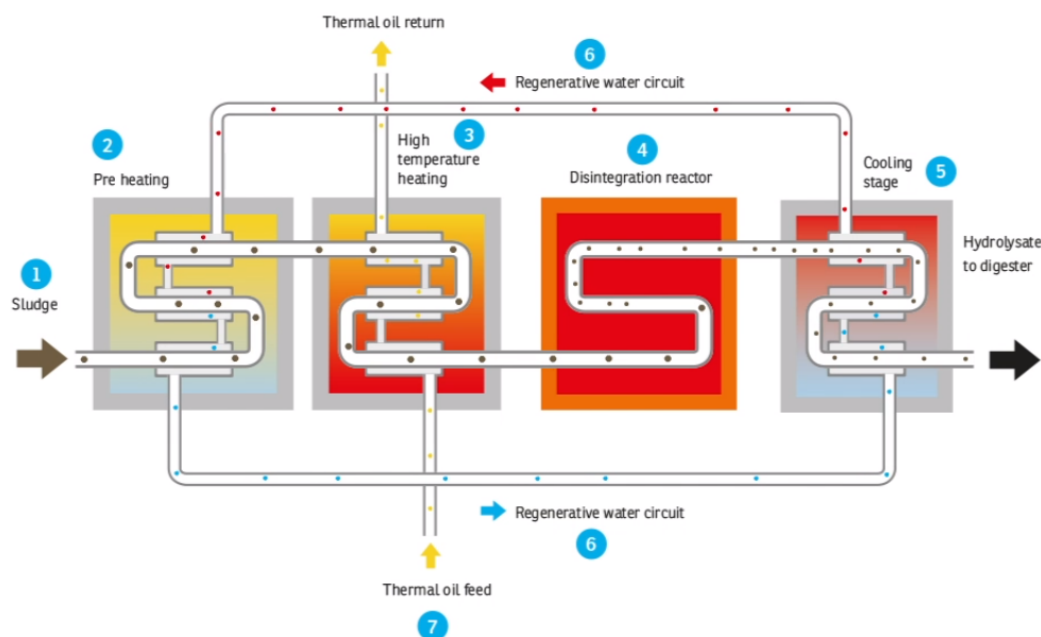


Figura 19: Esquema simplificado del proceso HT Lysotherm. Fuente: Pagina web oficial de Eliquo

9.4.6 Turbotec

Turbotec es la tecnología de hidrólisis térmica desarrollada por la empresa Sustec. Actualmente, tiene 3 tipologías según el residuo que se desee tratar. En este caso, nos centraremos en a denominado Turbotec 1, la cual está destinada al tratamiento de fangos de depuradora.

Al igual que en el resto de tecnologías de pretratamiento térmico denominadas, el fango se introduce en un reactor en el que se somete a una temperatura de 140 C° y una presión de 6 bar, operando en continuo. El tiempo de reacción es aproximadamente de 30 minutos.

Ventajas
Ofrece las ventajas inherentes a su funcionamiento en continuo.
Desventajas
Escasas referencias a escala real. Actualmente su capacidad de tratamiento se limita a dos instalaciones (aprox 20000 t fango/año.)

Tabla 8. Ventajas/Desventajas de la HT de Turbotec

9.4.7 TeCH4⁺

TeCH4⁺ es una empresa española desarrolladora de una tecnología de hidrólisis térmica. La principal innovación que presentan es la utilización de un doble mecanismo de reactores Flash. El objetivo de esto es mejorar la integración energética de la instalación gracias a la introducción de una fase de precalentamiento, que es alimentada por los propios flashes de media y baja que se producen en los reactores.

Cuentan con 2 referencias a gran escala en España, en la EDAR de Copero (Sevilla) y en nuestro caso de estudio, la EDAR Pinedo II (Valencia).

Ventajas
• Funcionamiento en continuo. • Mejor integración energética • Configuración innovadora
Desventajas
• Baja robustez de periféricos. Esto provoca en algunos casos costes de mantenimiento altos en su puesta en marcha.

Tabla 9. Ventajas/Desventajas de la HT de TeCH4⁺

9.5. Configuraciones de la hidrólisis térmica

La hidrólisis térmica es un proceso cuya implantación en la línea de fangos de las depuradoras está en constante investigación y análisis. Ya que, aunque sus beneficios en la mejora del desempeño de la digestión anaerobia y en el aumento de su deshidratación se haya comprobado fehacientemente, el principal objetivo de este tipo de instalaciones está relacionado con su integración energética. En específico, se busca llegar a la autosuficiencia energética de forma que esta instalación impacte positivamente en el balance energético/económico global de la planta (para ser concisos, que no se quemé biogás para cumplir la demanda energética que conlleva el funcionamiento de la instalación).

En este contexto, el ajuste de parámetros operacionales puede llegar a mejorar la eficiencia del proceso, pero no resulta muy relevante. Por ello, surgen diferentes configuraciones que componen las alternativas existentes de integración de la HT en la línea de fangos. Las mayormente referenciadas serían la HT como A) Pretratamiento (fangos mixtos o solo secundarios) B) HT intermedia o Inter tratamiento y C) Postratamiento. Su representación esquemática se puede observar en las Figuras 21, 22 y 23. Para realizar la comparación se ha tomado una base de cálculo estándar (100 toneladas de masa seca al día y 60%/40% PS/WAS) y se han comparado los números de funcionamiento partiendo de una configuración convencional de línea de fangos con digestión anaerobia (Figura 20).

Primero, nos centraremos en la configuración como pretratamiento, a la que podemos nombrar como HT-DA (hidrólisis previa a digestión). Generalmente la implementación de la HT en EDARs se ha concebido como pretratamiento debido a que ha sido la distribución convencional mayormente documentada y que mejores resultados ha obtenido (Pilli, 2015). La HT como pretratamiento presenta 2 alternativas con respecto a la tipología de fango de entrada que se alimenta, sea la mezcla de fangos o tan solo el fango secundario. Cuando se lleva tanto el fango activado como el primario a hidrólisis térmica se asume una mezcla de fangos en un porcentaje determinado (p.e 40% WAS y 60% PS). Siguiendo estos porcentajes se alimentan a HT conjuntamente. Según los resultados obtenidos a gran escala (Fernández-Polanco et al. 2012) se obtienen como beneficios un aumento en la producción del biogás bruto del 23 %. Además de una reducción del biosólido del 36%, del 48% del volumen de digestión y la higienización de la totalidad de fango producido (a nivel de Biosólido Clase A). No obstante, parte del biogás se quemará a la caldera para poder cumplir la demanda de biogás de la HT, la cual no puede ser completada mediante el uso aislado de los gases de escape de los motores. Aproximadamente, 30% del biogás generado se destinará a este uso, con lo que el aumento neto de producción de biogás se reduce a un 6 % del obtenido en una digestión convencional.

Si pretratáramos solo el fango secundario, obtendríamos un aumento de biogás bruto similar al caso anterior. Esto es debido que el hecho de llevar a hidrólisis el fango primario no conlleva un aumento en su capacidad de biometanización significativo (aunque si de su solubilización y otros beneficios como su higienización) debido a su composición. Por ello, desde el punto de vista de la eficiencia energética, resulta más viable llevarlo a digestión directamente, junto con el fango secundario hidrolizado. A su vez, esta configuración HT (WAS)-DA obtiene mejores resultados con respecto a la producción de biogás neta, del 20%. Esto es debido a que la demanda energética se completa utilizando los gases de escape de los motores, habilitando la autosuficiencia energética de la instalación. Esta opción resulta interesante para líneas de expansión de fangos en plantas en las que no se requiera la higienización de todo el fango producido. No obstante, como consecuencia se debe de gestionar una mayor cantidad de biosólido (un 6% mayor) y se produce una reducción del volumen de digestión menor.

En este sentido, para lograr estos objetivos de higienización y cumplir con la autosuficiencia energética de la HT se debería de plantear otro tipo de configuración. Para ello, se plantea la hidrólisis térmica intermedia o Inter tratamiento que integra este equipo entre 2 fases de digestión 1) Una predigestión de la mezcla de fangos y 2) Una post digestión del hidrolizado. Gracias a esta alternativa, la HT logra la autosuficiencia energética tratando todo el fango producido por la depuradora. Además, esto mejora el dimensionamiento de la planta ya que se tratan menores cantidades de materia seca debido a la predigestión (- 30% de volátiles). Se obtienen mejores números de producción de biogás (+31%) y un menor volumen de biosólidos (-42%). No obstante, la viabilidad técnica de esta instalación se limita a plantas con volúmenes de digestión sobredimensionados. Se estima que a partir de los 40000 m³ de digestión es viable la HT intermedia. No obstante, esta estimación depende de la cantidad de masa seca a tratar.

Finalmente, se puede dar una HT post digestión anaerobia, aunque esta configuración cuenta con muy pocas referencias a gran escala. Supone un menor volumen de biosólido y su higienización completa. No obstante, su principal desventaja es su integración energética, ya que no produce un aumento en la biometanización del fango ni tampoco es autosuficiente. Por ello, esta alternativa solo resulta viable a precios relativamente altos de biosólido, aunque aún falta experiencia operativa con esta configuración.

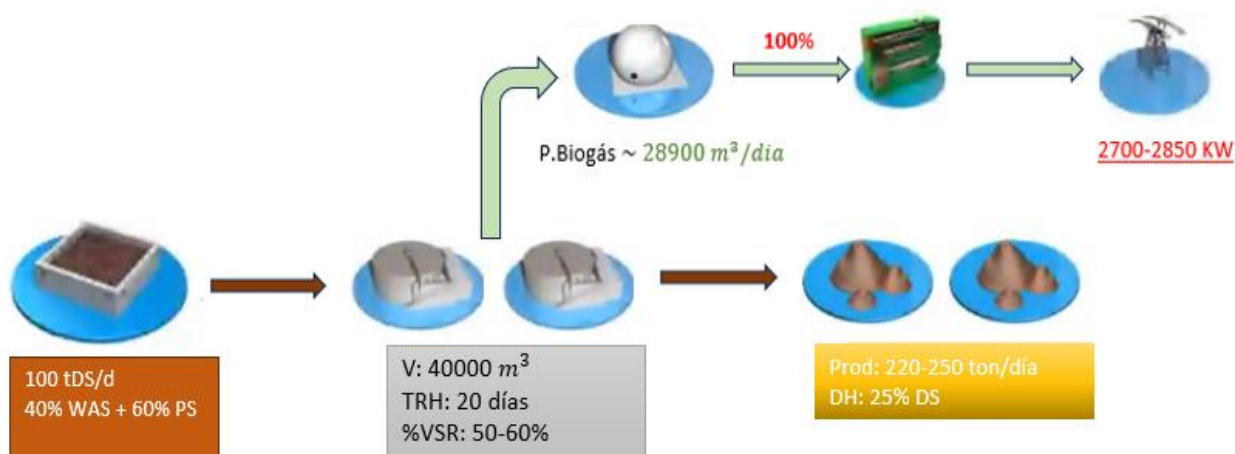


Figura 20. Configuración convencional de la línea de fangos

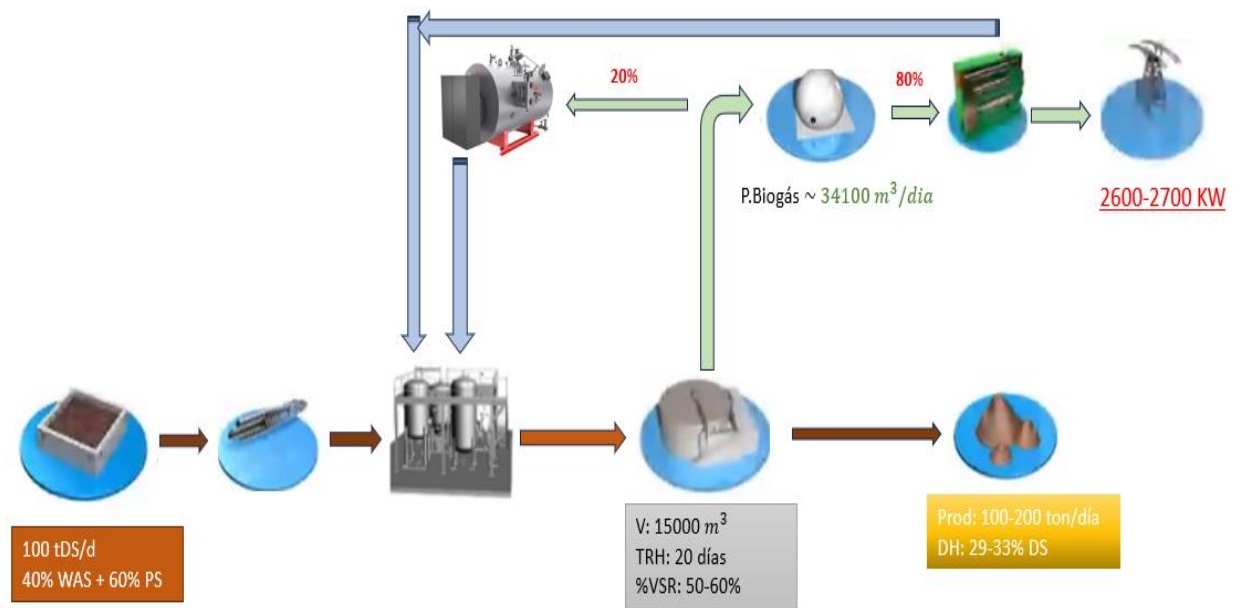


Figura 21. Configuración pretratamiento de mezcla de fangos (secundario y primario)

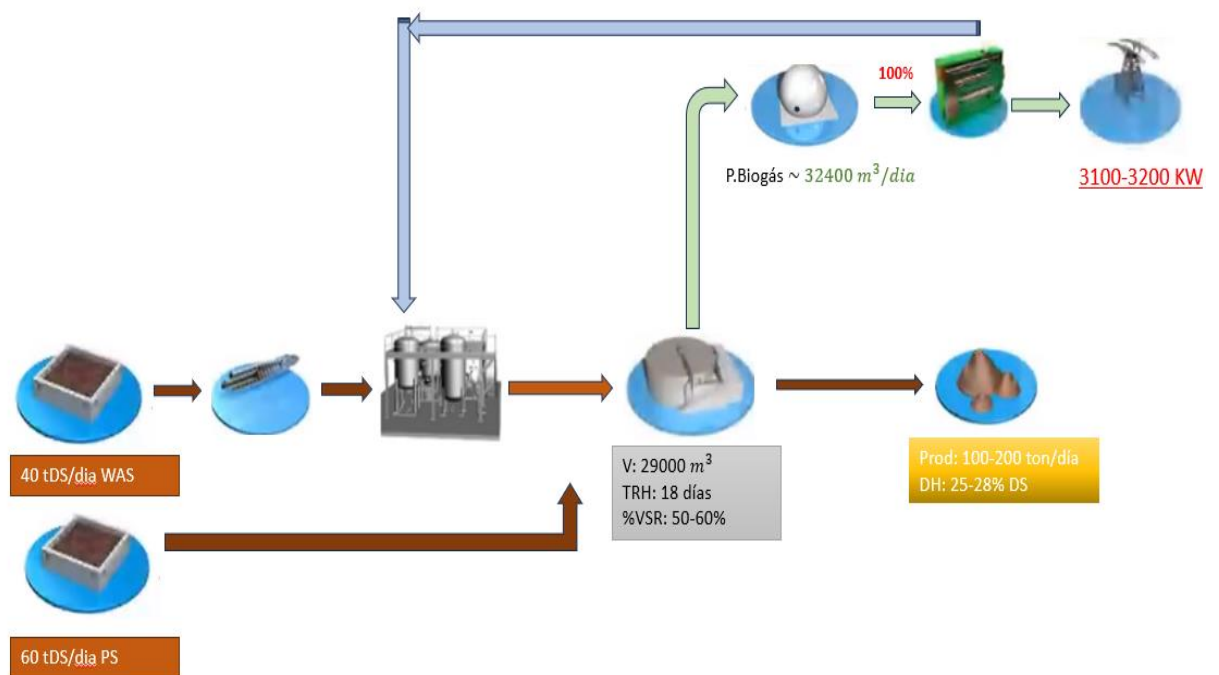


Figura 22. Configuración pretratamiento de solo fango secundario

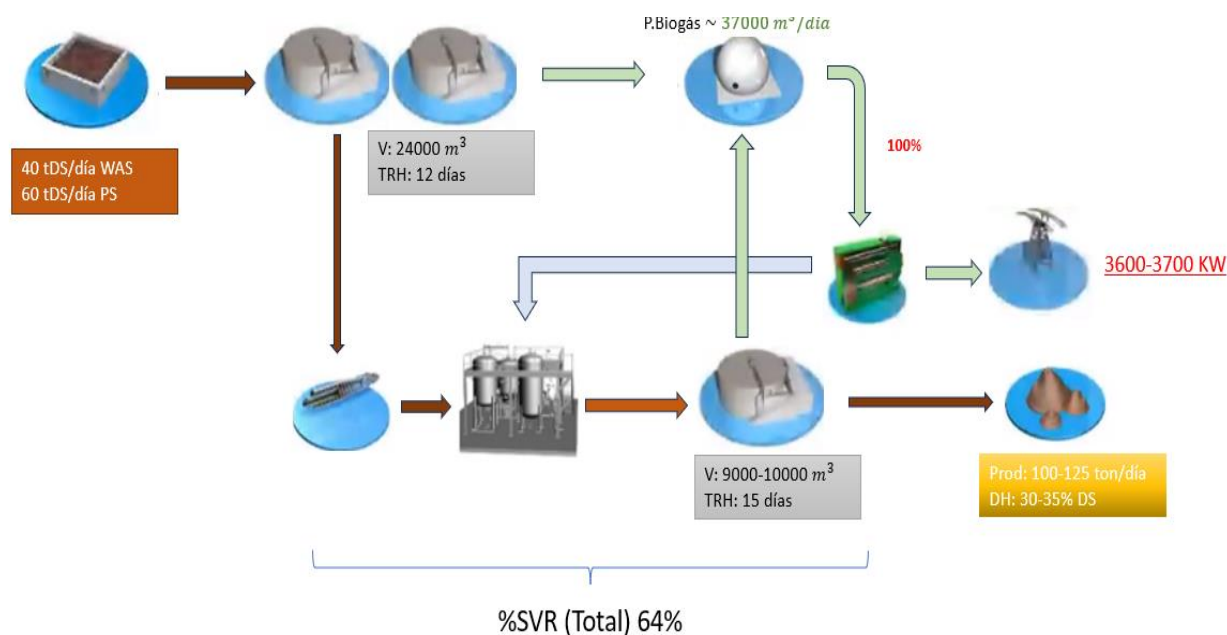


Figura 23. Configuración HT intermedia o intertratamiento

15.Estación Depuradora de Pinedo 2

La instalación de HT de la que vamos a centrar principalmente nuestro análisis y de la que hemos podido obtener los datos y resultados necesarios para poder cumplimentar este estudio se sitúa la EDAR de Pinedo 2, en Valencia. Específicamente, el sistema de hidrólisis térmica se encuentra instalado en la zona conocida como “Ampliación Pinedo 2”, a modo de pretratamiento de la digestión anaerobia, también situada en la misma zona.

Pinedo 2 es una de las 2 plantas de tratamiento que integran la EDAR de Pinedo. Es importante hacer hincapié en esta diferenciación debido a que cada una de las plantas se encarga de tratar aguas residuales que provienen de diferentes sectores de Valencia, distribuidas respectivamente gracias a una red de colectores. La distribución de aguas se puede observar en la siguiente tabla:

Colector que distribuye	Planta de tratamiento	Procedencia
Colector norte	Pinedo 1	Ciudad de Valencia
Colector Sur-Oeste	Pinedo 2	Municipios de la pista de Silla, Burjassot, Paterna, Mislata y Xirivella

Tabla 9. Distribución de aguas influentes de Pinedo II

Las aguas tratadas por Pinedo 2 son vertidas para riego, específicamente en los arrozales cercanos a l’Albufera como en la propia Albufera, la cual además constituye una zona sensible. Con lo que la planta se adapta para cumplir estas exigencias que se presentan.

Las condiciones con las que la planta de Pinedo 2 suele operar son las siguientes:

- Tipo de tratamiento: Mixto (físico-químico y Biológico)
- Caudal de diseño: 200000 m³/día

- pH 7,6-7,8
- DBO5 influente: 250 mg/L
- SS influente: 350 mg/L
- NT influente: 40-50 mg/L
- PT influente: 5-6 mg/L
- DBO5 efluente $\leq$ 25 mg/L
- SS efluente $\leq$ 35 mg/L
- NT efluente: 9,3-9,6 mg/L
- PT efluente: 0,10-0,30 mg/L
- Población servida (60 g de DBO5 h/d): 833.33 h-eq

Esta estación depuradora tiene como objetivo la eliminación de nutrientes a la salida del tratamiento, debido a su vertido posterior a zona sensible (zona agrícola de L'Horta del sud, al Oeste de Valencia) teniendo que cumplir con concentraciones inferiores a 10 mg/L de NT y 0,3 de PT.

Se puede observar en la Figura 24, un esquema simplificado de la planta. En los siguientes apartados se analizará el funcionamiento de las diferentes líneas de trabajo, además de la caracterización del agua de entrada que se encarga de tratar la planta. Además, en la Figura 25 podemos observar un plano de todos los tratamientos y equipos de la EDAR de Pinedo.

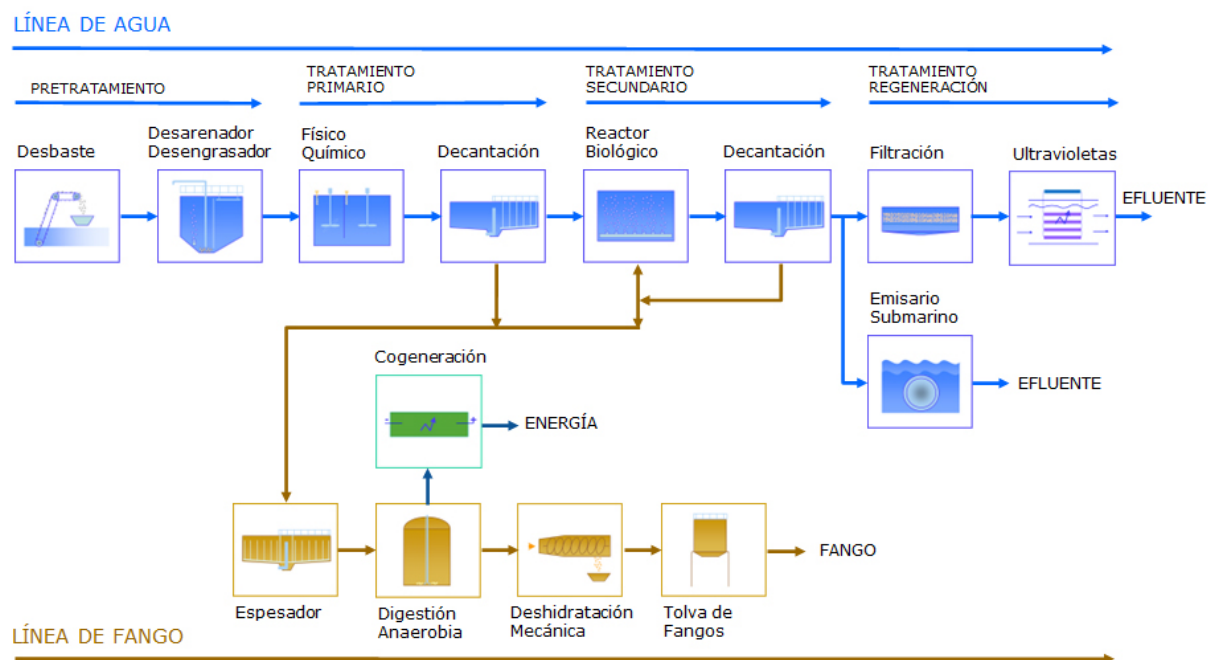


Figura 24. Esquema simplificado Pinedo 2. Línea de aguas y de fangos.

15.1 Tratamiento biológico

Línea de agua

En este apartado se relatarán todo el conjunto de tratamientos biológicos por el que se hace pasar el agua de entrada de Pinedo 2. Este conjunto de tratamientos permite conseguir rendimientos de

eliminación del 78 % en nitrógeno total (NT) y del 88 % fósforo total (PT), del 87% en sólidos suspendidos (SS) y del 88% de la demanda química de oxígeno (DQO).

Primero el caudal de entrada se regula mediante un sistema de control por nivel del agua, el cual cuenta con un aliviadero para poder extraer el exceso de caudal que se presente. Posteriormente, el agua se bombea por elevación gracias a 6 bombas (+1 de reserva) sumergibles a lo largo de una tubería de impulsión donde convergen, la cual es controlada por 1 medidor electromagnético de caudal. Este bombeo concluye en una arqueta de reparto donde se mezclarán con las corrientes escurridas o licores que provienen de diferentes equipos de la planta (Deshidratador, Flotadores...).

Desde esta arqueta se impulsa a una unidad de pretratamiento compuesta por 6 tamices de 6 mm de paso de luz y 3 unidades de desarenadores dinámicos aireados con separación de arenas y concentrador de grasas. Seguidamente, el agua pretratada llega al tratamiento primario compuesto por 4 unidades de decantadores circulares de 47 m de diámetro, 5204 m³ de volumen unitario y 20.816 m³ en total

El posterior tratamiento biológico se compone de una línea de agua con tratamiento de fangos activos y una línea de fangos con estabilización por digestión anaerobia y envío de fango generado a Pinedo 2 para su deshidratación.

Se compone de 4 reactores biológicos de 16018 m³ cada uno, formados por 2 selectores anóxico + aerobio y cada reactor cuenta con 1 zona principal anóxica (33% del volumen total) y 3 zonas aerobias (22% del volumen cada zona aerobia). Este tipo de distribución en el biológico está pensado esencialmente para la eliminación de nitrógeno, aunque se haya reportado eliminación de fósforo. La aireación de estas zonas aerobias es suministrada por un conjunto de turbosoplantes. La recirculación interna del licor mixto es llevada a cabo mediante 4 tuberías de impulsión, con sus medidores electromagnéticos respectivos.

Posteriormente, Pinedo 2 cuenta con 6 decantadores circulares secundarios de 51 metros de diámetro y 3,6 metros de altura de vertedero. Desde los decantadores se produce una recirculación de fangos a partir de 1 tubería de impulsión.

Línea de fangos

Los fangos en exceso son bombeados mediante 2 bombas centrifugas (+1 de reserva) a los espesadores por flotación, que están compuestos por 2 unidades de flotadores de 15 m de diámetro. Por su parte, los fangos primarios son bombeados a 3 unidades de espesadores circulares dinámicos de 20,4 m de diámetro, 1320 m³ de volumen unitario y 3960 m³ en total.

Seguidamente, los fangos flotados son bombeados a una arqueta de reparto. Esta arqueta es un depósito de 80 m³. Previo a la implantación de la hidrólisis esta arqueta mezclaba el fango flotado (secundario), el espesado (primario) y el que proviene del depósito de cosustratos y los llevaba a digestión. No obstante, tras la implantación de la hidrólisis térmica esta arqueta se ha dividido en 2 zonas mediante una barrera separadora, ocupado una de las mitades los fangos en exceso flotados los cuales se bombean individualmente a la HT y una vez pasan por este proceso, el fango hidrolizado retorna a la arqueta y se mezcla con el resto de corrientes (cosustratos y fangos espesados) en la otra mitad del depósito. Se debe de tener en cuenta que esta arqueta está regulada por cota de nivel. Es decir, cuando la hidrólisis no es capaz de tratar todo el fango flotado pasa a la otra parte de la arqueta. Esta situación ocurre siempre, ya que la HT tan solo es capaz de hidrolizar un determinado porcentaje del fango flotado producido (hasta la fecha del presente estudio).

Ocasionalmente, a la planta se le realiza un aporte de cosustratos (normalmente con un alto contenido de azúcar) que se utilizan para incrementar la producción de biogás en gran medida. Estos llegan a parar a esta misma arqueta de mezcla.

Esta mezcla de fangos es bombeada a 3 digestores anaerobios por agitación de 8700 m3 cada uno, los cuales al ser digeridos se almacenan en un depósito tampón de 20000 m3, que al ser almacenados son bombeados por 3 bombas de tornillo (+1 de reserva) a deshidratación mecánica.

Por último, la planta se rige por un principio de cogeneración eléctrica, consiguiendo suplir el 45 % de su demanda energética total. Para ello, cuentan con un sistema de motores de cogeneración eléctrica de 526 kW de potencia eléctrica y 555 de potencia térmica, los cuales son alimentados con el propio biogás que genera la planta

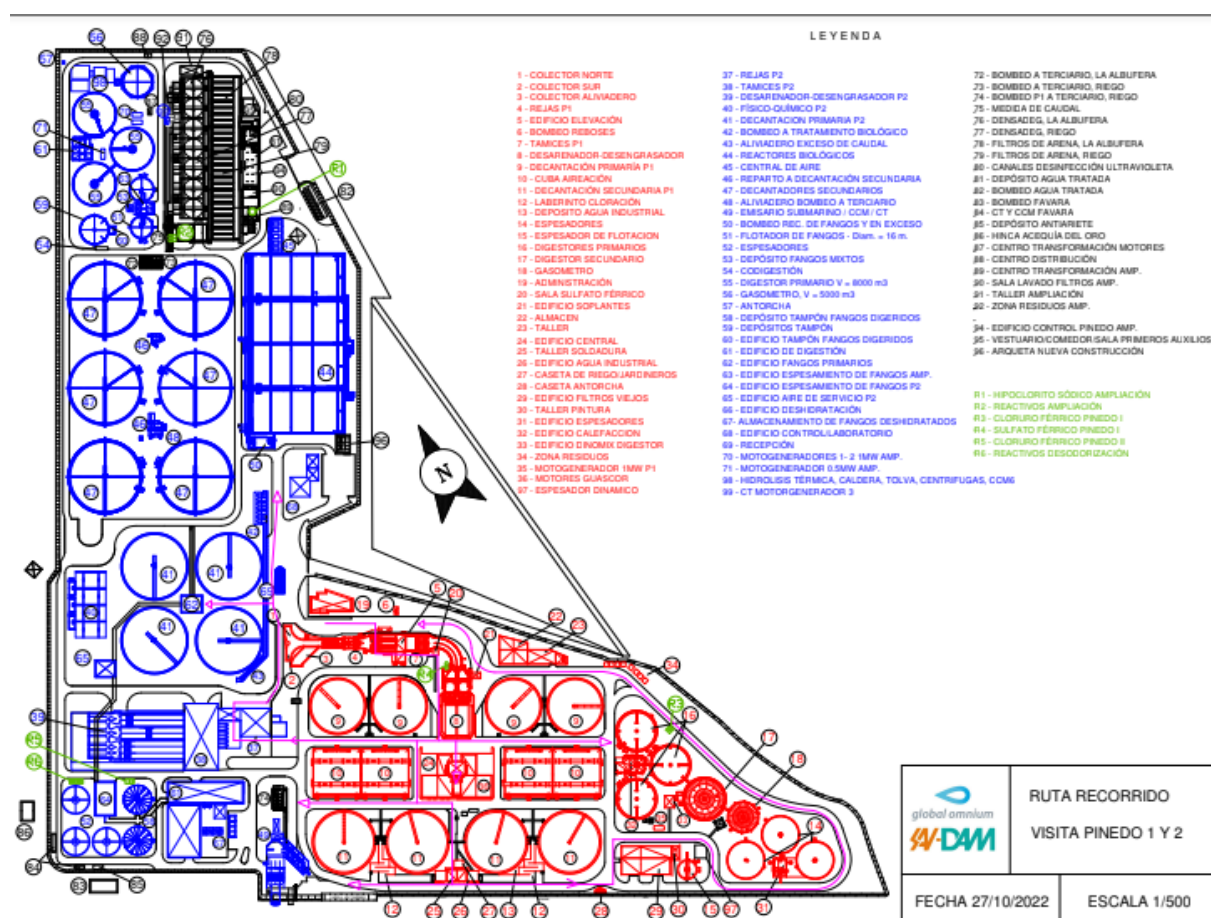


Figura 25. Plano de la EDAR de Pinedo (I,II y ampliación)

15.2 Caracterización del agua residual de Pinedo 2

Con respecto a los análisis que se realizan en el laboratorio semanalmente se sigue un protocolo en la que se analizan ciertas características del agua siguiendo una distribución concreta a lo largo de la semana:

ESTACIÓN INVIERNO				
	Entrada	Entrada Biológico	Salida Decantación secundaria	Salida Terciario
Temperatura (C°)	13,73	13,24	13,16	
pH	7,75	7,66	7,62	7,52
Conductividad ($\mu S/cm$)	1992,31	2022,86	1818,07	1777,75
V60 (mL/L)	7,82	1,09		
SS (mg/L)	207,66	108,76	14,45	2,64
DBO5 (mg/L)	233,33	160,42	8,21	3,91
DQO (mg/L)	457,38	330,55	35,38	18,69
NT (mg/L)	48,97	47,19	11,58	9,33
N-NO3 (mg/L)	0,22	0,28	5,73	6,64
NKT (mg/L)	48,88	46,88	3,89	2,21
N-NH4 (mg/L)	36,95	38,47	2,75	1,07
N-NO2 (mg/L)	0,02	0,03	1,02	0,48
PT (mg/L)	6,34	5,55	0,90	0,14
Turbidez (NTU)	176,76	105,86	8,97	1,66

ESTACIÓN VERANO				
	Entrada	Entrada Biológico	Salida Decantación secundaria	Salida Terciario
Temperatura (C°)	22,55	22,31	22,12	
pH	7,83	7,84	7,61	7,61
Conductividad ($\mu S/cm$)	1835,81	1855,90	1666,45	1665,45
V60 (mL/L)	4,03	0,80		
SS (mg/L)	160,61	71,55	8,83	3,04
DBO5 (mg/L)	141,15	78,57	5,68	2,87
DQO (mg/L)	309,52	177,35	21,07	13,78
NT (mg/L)	37,89	35,55	9,34	8,85
N-NO3 (mg/L)	0,28	0,36	6,59	6,81

NKT (mg/L)	37,76	35,28	4,58	3,95
N-NH4 (mg/L)	30,21	30,00	0,30	0,09
N-NO2 (mg/L)	0,02	0,03	0,12	0,08
PT (mg/L)	5,02	4,33	0,95	0,20
Turbidez (NTU)	147,55	58,01	5,53	1,70

Tabla 10. Caracterización línea de aguas Pinedo II

Como podemos ver en estas tablas analíticas observamos que además de recibir una alta carga orgánica, una vez se llevan a cabo todas las tareas de tratamiento del agua, se cumplen los requisitos de vertido a la salida del terciario.

Dicha corriente será la que se lleve a riego a los destinos que se han comentado en el primer apartado. Los porcentajes de eliminación de nitrógeno son realmente altos, ya que es una planta que está destinada a esta acción de eliminación de nutrientes y tratamiento de aguas para su vertido a zona sensible.

Además, como se observa en la segunda columna de la tabla previa, gran parte del fósforo es eliminado en el tratamiento biológico. Esto es debido a que la zona anóxica de los reactores es realmente superior al resto de las zonas aerobias. Este hecho unido al gran potencial de desnitrificación con el que cuenta la planta y a las grandes cantidades de poli aluminio (PAX), que se suelen dosificar para combatir la aparición de *microthrix parvicella*, permiten de forma adicional que se incremente la floculación y se produzca la eliminación de fósforo.

16. Hidrólisis térmica de Pinedo 2

Como hemos anotado en el apartado anterior, Pinedo 2 tiene como principal objetivo optimizar su balance energético, y para ello decidieron implementar mejoras para incrementar la producción de biogás. Con esta consigna decidieron, hace aproximadamente un año, estudiar la posibilidad de implementar una instalación que permitiera explotar al máximo el potencial de biometanización de los fangos biológicos producidos. Dentro de las tecnologías de pretratamiento que se barajaron, la adquisición de una tecnología comercial de hidrólisis térmica resultó la más idónea ya que es la que mayor cantidad de beneficios produce y la que mejores resultados obtiene a gran escala.

Entre las varias tecnologías comerciales de HT en el mercado, para Pinedo 2 se escogió la instalación del sistema teCH4 +, el cual ya cuenta con varias referencias en otros lugares de España (EDAR de Ranilla y Coper, Sevilla o en la planta de biometanización de Las Dehesas, Madrid).

La tecnología teCH4 + se diferencia del resto de tecnologías convencionales de HT de alta temperatura en el grado de innovación que presenta. Esta se basa en el autodenominado “Proceso Polanco”, consistente en optimizar el proceso de explosión de vapor mediante un doble mecanismo flash. Esto demanda calentar el sistema a temperaturas superiores, en un intervalo de tiempo muy corto. El rápido calentamiento del sistema se supone para evitar reacciones químicas indeseables, como las reacciones Maillard y la producción de recalcitrantes que hemos comentado en apartados previos. En la Figura 26. se puede observar un esquema de los equipos y corrientes de funcionamiento con las que cuenta la HT.

Mediante esta configuración, se consigue cumplir con una serie de objetivos de integración y eficiencia que mejoran las prestaciones de otras tecnologías comerciales. Se han resumido las ventajas de este proceso en la Tabla 11.

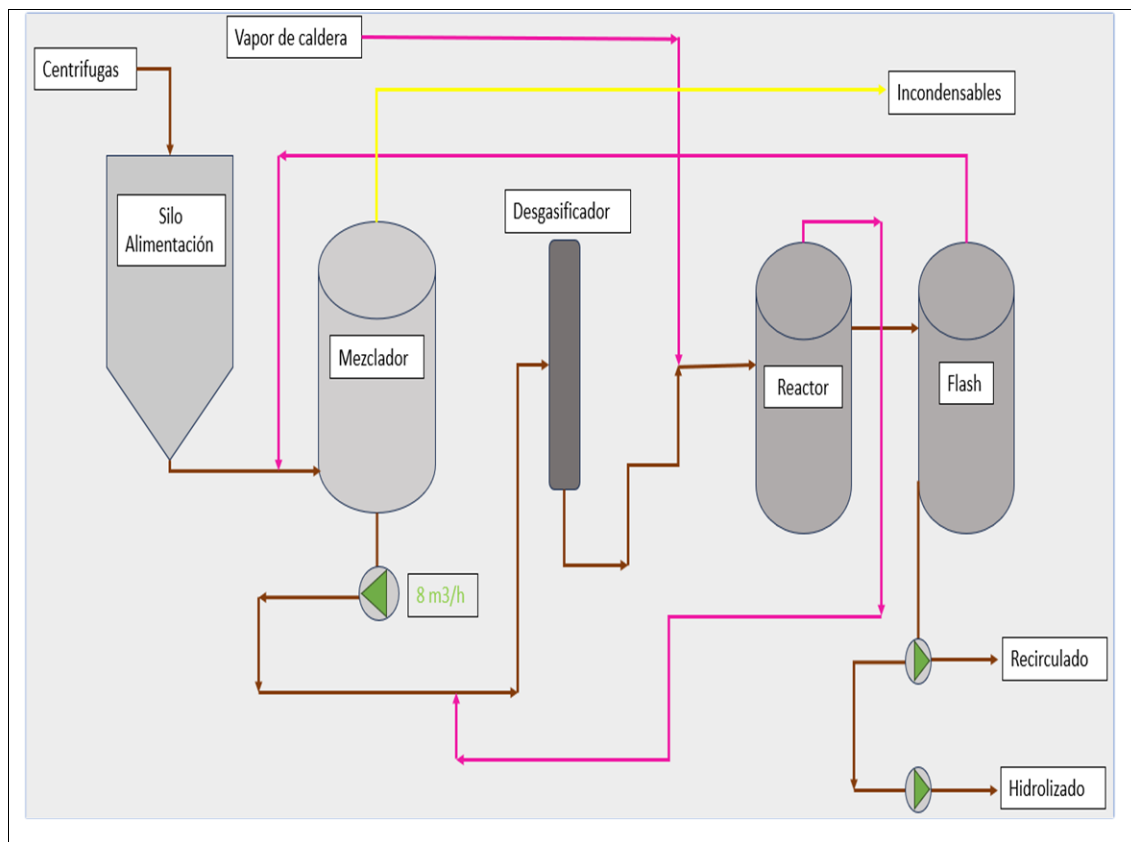


Figura 26. Esquema de los equipos de la HT. 1) En rosa, las corrientes de vapor 2) En amarillo, los incondensables 3) En marrón las de fango.

La instalación a gran escala consta de 2 unidades principales: 1) Unidad de alimentación y precalentamiento, la cual se alimenta principalmente de los calores recuperados del proceso y del vapor de alta presión que suministra la caldera y 2) Unidad de hidrólisis consistente en un triple mecanismo flash-cocción-flash, lo cual hace que el residuo se hidrolice correctamente.

Anexa a la unidad de alimentación se encuentran las centrifugas de pre-deshidratación (Figura 27). Estas permiten aumentar la sequedad del fango de entrada para cumplir la demanda de %MS que requiere la hidrólisis térmica. Este fango pre-deshidratado es impulsado (Figura 28) y almacenado en una tolva de concentración (Figura 30). Esto favorece la homogeneidad del fango, lo cual evita posibles problemas en la operatividad de la instalación.

Tras esta unidad de preparación, el fango ya puede alimentarse a la hidrólisis térmica. La clave de este proceso se basa en la innovación que presenta su modo de operación frente a otras tecnologías HT. El mecanismo de doble flash es su elemento caracterizador, expuesto a gran escala en la Figura 29. Desde que se alcanza la temperatura más alta del proceso (185-190 C°) correspondiente al punto de la inyección en línea del vapor de la caldera hasta el primer flash hay segundos, ya que es el tiempo que tarda en llegar de un punto a otro de la conducción. Esto permite que se lleguen a las temperaturas y presiones altas que requiere el proceso en un tiempo de reacción ínfimo, y posterior enfriamiento rápido en el primer flash. Gracias a esto se evitan la formación de compuestos recalcitrantes, ya que las reacciones que los generan no tienen el suficiente tiempo de producirse. Por ello, al reactor se le alimenta un fango “pre-hidrolizado” que,

con un menor tiempo de residencia, puede realizar el mismo trabajo térmico. Posteriormente, el fango se somete a una segunda fase de reactor flash, cuya salida tiene una temperatura de 80-90 C° para su posterior acondicionamiento previo a su entrada y alimentación a los digestores.

Este mecanismo tiene unas implicaciones muy beneficiosas en la integración energética de la instalación. El vapor de baja que es producido a causa del segundo flash se caracteriza por ser un vapor atmosférico (es decir, a 100C°), con lo que desde el punto de vista termodinámico no nos permite calentar el fango de entrada por encima de esta temperatura. En cambio, al tener un sistema con doble flash, en el que se producen dos corrientes de vapor respectivamente, se puede asumir un precalentamiento progresivo, utilizando el vapor de media del primer flash (a 150C°) en este proceso. La demanda de vapor de la caldera se obtiene a partir del balance de entalpía (entradas-salidas) teniendo que compensar las pérdidas. No obstante, al recuperar el 100% de vapores producidos se minimiza el consumo específico de energía (el del vapor que traigo de la caldera). Además, esta fase de precalentamiento permite trabajar con un %MS menor a la entrada de las centrifugas. Consiguientemente, representando un beneficio económico, ya que reduce la demanda de polielectrolito en las centrifugas de pre-deshidratación.

Técnicas	Beneficios	
Mecanismo Flash/Reactor/Flash	Mayor producción de biogás	Menor coste de operación (OPEX)
Inyección de vapor en línea	Higienización del fango tratado	
Optimización de la operación. Tiempos de retención mínimos	Menor producción de inhibidores y recalcitrantes	
Proceso continuo. Régimen estacionario	Mejor control y operatividad	
Recuperación de calor residual	Integración energética	
Calentamiento sin intercambiadores	Menor coste de mantenimiento	
Hidrólisis continua	Mayor compactibilidad	Menor coste de instalación (CAPEX)
Experiencia a gran escala. Beneficios contrastados	Mejor rendimiento en la digestión	
Empresa nacional	Barrera del lenguaje	

Tabla 11. Beneficios del proceso Polanco.

La instalación y estrategia de implementación de la HT resulta ser uno de los aspectos más importantes a revisar y profundizar, ya que determinará la mayoría de condiciones de funcionamiento del sistema y su conocimiento será clave a la hora de realizar los análisis energéticos y balances pertinentes.

En su momento, esta tecnología se instaló en la planta como pretratamiento del fango, situada previa digestión anaerobia. Obviamente, la intención detrás de esta configuración es la de obtener un beneficio directo en el rendimiento de la DA, adelantando su fase limitante en la HT.

En el caso de Pinedo 2, se ha realizado una instalación HT que se adapta al tratamiento del fango secundario o flotado. Esto es debido a que actualmente la planta no tiene requisitos de higienización con lo que no es necesario llevar el fango primario a hidrolizar. Este hecho junto con la alta biodegradabilidad del fango primario, hacen que no sea rentable llevarlo a HT, ya que además esto comportaría un gasto energético mayor, tanto en instalación como en demanda de vapor, siendo necesario quemar biogás (Fernández-Polanco et Al., 2021). No obstante, esta situación está sujeta a cambio en el futuro próximo, ya que es posible que las administraciones demanden la higienización del 100% del fango que genere la planta. En este escenario sería obligatorio llevar todo el fango a hidrolizar, con lo que se analizarían otro tipo de condiciones de trabajo o modificaciones para poder compensar el balance energético.

Desde el punto de vista energético, la demanda de la HT se centra principalmente en la fase de calentamiento o inyección de vapor vivo. En esta fase, se debe de calentar el fango ya deshidratado (14-16% de VS) y concentrado de la tolva con, principalmente, el vapor que le suministra la caldera. Este vapor de alta presión se obtiene gracias al calentamiento de agua en una caldera anexa a la instalación HT. Esta es una caldera de doble entrada que puede ser alimentada por los gases de escape de los motores de cogeneración, y en ciertas ocasiones por parte del biogás producido por la planta. Pinedo 2 cuenta con 3 motores de cogeneración, 2 de un 1 MW y otro de 0.5 MW.

La quema de biogás se debe de realizar debido a que normalmente no es suficiente la alimentación de gases de los motores para cumplir con la demanda de vapor de la HT. El objetivo principal del Jefe de Planta, por tanto, es conseguir que sea energéticamente autosuficiente para el caudal de alimentación de fangos.

La instalación fue diseñada para el pretratamiento térmico de $30 \text{ m}^3/\text{hora}$ de fango flotado. Sabiendo que existe una fase de pre-deshidratación que adecua el fango de entrada a un 12-14% MS, se aplica la siguiente ecuación para conocer la cantidad de fango hidrolizado producido por diseño.

$$\begin{aligned} \text{Caudal F. Hidrolizado} &= \frac{Q_{\text{entrada}} * \%MS_{F.\text{Flotado}}}{\%MS_{HT}} = \frac{30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 40 \frac{\text{KgMS}}{\text{m}^3}}{140 \frac{\text{KgMS}}{\text{m}^3}} = 8.57 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \\ &= 205.68 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \end{aligned}$$

$\%MS_{HT}$: Porcentaje de masa seca del fango con el que trabaja la hidrólisis térmica

$\%MS_{F.\text{Flotado}}$: Porcentaje de masa seca del fango flotado

Esto todavía no se ha conseguido, aspirando como mucho a hidrolizar el fango a una razón de 6 m³/h a partir de los humos producidos por 2 de los 3 motores de cogeneración funcionando a máxima potencia (un motor de 1 MW y otro de 0.5 MW). Es muy posible que este hecho esté asociado a un deficiente bombeo de fango por las conducciones de la HT, al no presentar las prestaciones suficientes para adaptarse a los cambios reológicos del fango y la reducción de su viscosidad. Hay que tener en cuenta que una instalación como la HT que presenta un reto operativo dificultoso a gran escala, necesita de una gran robustez de periféricos. En este sentido, la solución más predecible es la de sustituir las bombas actuales por otras de mayor potencia para reducir al máximo las perturbaciones y consiguientes paradas de la hidrólisis.

La hidrólisis térmica de Pinedo II está diseñada como pretratamiento de fangos flotados, y su capacidad de tratamiento esta ajustada a esta premisa. Este aspecto es fundamental para saber si la configuración presente es eficiente y funcional con las características de la planta en la que está instalada la HT. En caso de que no se pudiera llegar a la autosuficiencia energética, se debería de

explorar otras opciones. Por ejemplo, se podría plantear cambiar la configuración actual de la HT en Pinedo 2.

Como se ha comentado en el apartado 9.5 Configuraciones de la hidrólisis térmica, la opción del tratamiento intermedio mediante HT es especialmente interesante cuando se tiene un volumen sobredimensionado de digestión anaerobia, y en el caso de Pinedo 2 si no se llegase a lograr la autosuficiencia sería la alternativa más eficiente.

Además, como hemos comentado anteriormente, se tiene indicios de que se pida la higienización del fango total producido por la EDAR en un futuro muy próximo. Por tanto, esto supondría llevar todo el fango a hidrólisis lo cual aumentaría la demanda de vapor de la HT, al tener que tratar una cantidad mayor de fango. Este aumento en la demanda de vapor se traduce en la necesidad de quemar una parte del biogás para poder cumplirla, lo cual impactaría negativamente en el balance energético y en los resultados operativos. Por ello, en este escenario la configuración que es más interesante es la de inter-tratamiento, sobre todo porque el gran volumen de DA con el que cuenta Pinedo 2 puede habilitar este tipo de configuraciones.

No obstante, este tipo de cuestiones se abordarán en un apartado complementario posterior, en el que se intentará justificar el cambio de configuración mediante la realización de una serie de cálculos. Con lo que respecta a los objetivos del estudio nos centraremos en la configuración y estado de funcionamiento actuales.



Figura 27. Centrifugas de deshidratación



Figura 28. Impulsión y válvula de control del deshidratado



Figura 29. Reactor de la HT



Figura 30. Tolva de concentración de entrada

18. Metodología de laboratorio

Los tests BMP's (BioMethane Potential) son ensayos que simulan el proceso complejo de la digestión anaerobia a escala de laboratorio. Son usados para determinar la biodegradabilidad o potencial de producción de metano de los sustratos o biomasa que se alimentan al mismo y que son objeto de estudio.

Un ensayo convencional de BMP es realizado como indicador preliminar de la biodegradabilidad de un determinado sustrato. El procedimiento involucra la biomasa o residuo que se quiere valorizar mezclado con una cantidad regulada de inóculo anaerobio (en este caso, una muestra del mismo fango tras su paso por digestión). Tras la realización de los cálculos necesarios para la determinación de las cantidades utilizadas y la relación sustrato/inóculo se incubarán las botellas en una estructura de bañada a una temperatura controlada.

La tecnología comercial utilizada en este caso es la de AMPTS II, la cual se corresponde con un modelo automático de medición del desarrollo del ensayo. Esto reduce en gran medida el trabajo de supervisión que realice el personal del laboratorio. Se obtienen datos a tiempo real de caudales y volúmenes acumulados del metano producido con una alta calidad de datos, lo cual refuerza la fiabilidad del proceso.

Las muestras utilizadas para la realización de los ensayos fueron las siguientes:

- Muestra de fango flotado
- Muestra de fango pre-deshidratado. Esta muestra se ha tomado del silo de almacenamiento previo a HT y representa el fango que sale de las centrífugas.
- Muestra de fango hidrolizado
- Muestra de fango digerido. Será utilizado como inóculo en el test BMP

Para poder llevar a cabo el ensayo, se debe realizar previamente la determinación del contenido orgánico de los sustratos utilizados. Para ello, se analizó el contenido en DQO (Demanda Química de Oxígeno) de las muestras recogidas. Para ello, se ha seguido el método de reflujo abierto. En este método la materia orgánica es oxidada con una mezcla caliente de dicromato potásico (Cr_2O_7) en exceso en un medio ácido y en presencia de un catalizador (Ag). Con el fin de minimizar el error obtenido en la medida, cada ensayo se ha realizado por duplicado.

El material utilizado para la realización del método es el siguiente:

- Tubos de digestión de vidrio con cuello esmerilado
- Gravilla y soporte para las gravillas
- Bureta (Con su soporte y pinzas)
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL
- Imán agitador y agitador magnético
- Tubos condensadores con boca esmerilada
- Bloque digestor
- 50 mL de muestra. Previamente, las muestras se diluyeron a una razón 1:100
- 1 gramo de sulfato de mercurio ($HgSO_4$)
- 5 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4)
- 20 mL de solución de dicromato 0,25 N (Cr_2O_7)
- 70 mL de disolución sulfato de plata/ácido sulfúrico (Ag_2SO_4/H_2SO_4)

Una vez han sido tratados en el bloque digestor durante 2 horas a 148 C° (condiciones de reflujo total), se observan los resultados obtenidos de forma automática en el ordenador (Imagen 27). El contenido en DQO de las muestras se puede observar en la Tabla 12.

Se tuvieron que llevar a 1 L de dilución debido a composición pastosa de los fangos no digeridos, que dificultaba la utilización de pipetas para determinar un volumen exacto. Por ello, se pesaron 1,5 gramos de fango hidrolizado y deshidratado y 2,23 gramos de flotado. Además, se llevó la muestra de fango digerido a una dilución en volumen de 1.100. Esto, junto con la dilución se ha tenido en cuenta a la hora de corregir la medida de DQO obtenida.

19. Cálculos y resultados del ensayo

En la tabla 12 se exponen los resultados obtenidos de los ensayos de DQO. Tal y como se ha comentado anteriormente se ha realizado una corrección a causa de la dilución que ha posibilitado la realización del ensayo. En el caso de los fangos no digeridos (Flotado, Deshidratado e Hidrolizado) la corrección provoca que las unidades cambien a mg/g ya que se tomaron las muestras en peso, no en volumen (ya que no pudieron pipetarse). En este caso, la dilución sigue el siguiente cálculo, que se aplicará a estas 3 muestras de fangos no digeridos:

$$DQO_{real} \left(\frac{mg}{g} \right) = \frac{DQO \left(\frac{mg}{L} \right) * 100}{\frac{Cantidad\ añadida\ (g)}{1\ L\ de\ disolución}}$$

Como se puede observar en la tabla de resultados, la cantidad de DQO entre el fango de entrada y de salida de la HT son prácticamente iguales. Esto es debido a que la HT no incrementa la DQO total, sino la DQO soluble.

El contenido en DQO total entre el deshidratado y el hidrolizado es similar, aunque no ocurre lo mismo al compararlo con el valor obtenido por el fango flotado. Esto se produce debido a que, aunque el contenido en DQO no varíe en todo el proceso, el fango flotado al pasar por deshidratación pierde una cantidad considerable de agua, por lo que se concentra más. Por ello su concentración es más elevada en el fango pre-deshidratado que en el fango flotado.

Muestra	DQO M1 (mg/L)	DQO M2 (mg/L)	Media (mg/L)	Corrección dilución
Fango flotado	72,71	69,23	70,97	3182,51 mg/g
Fango hidrolizado	226,92	154,61	190,765	12717,67 mg/g
Fango pre-deshidratado	167,68	192,8	180,24	12016 mg/g
Inóculo	592,84	589,1	590,97	59097 mg/L

Tabla 12. Contenido en DQO de las muestras analizadas en laboratorio



Figura 31. Obtención y lectura de los resultados de DQO

El contenido en DQO total de las muestras no es un parámetro de estudio del proceso de la HT, como se ha demostrado. No obstante, este dato es clave para la realización del ensayo de las BMP's. Específicamente, es vital para conocer la cantidad de sustrato a añadir a la botella. Se debe tener en cuenta que se ha seguido una relación sustrato-inóculo de 2:1. El volumen a añadir de inóculo es de 300 mL para cada botella

La cantidad de sustrato a añadir se obtiene siguiendo la siguiente fórmula:

$$Cant. Sustrato = \frac{DQO \text{ inóculo } \left(\frac{mg}{L}\right) * 0.3 L}{2 * DQO \text{ sustrato } \left(\frac{mg}{g}\right)}$$

$$Cantidad \text{ Fango flotado} = 278,53 \text{ gramos}$$

$$Cantidad \text{ Fango hidrolizado} = 69,70 \text{ gramos}$$

$$Cantidad \text{ Fango pre - deshidratado} = 73.67 \text{ gramos}$$

Como vemos, la cantidad de fango flotado resalta por ser bastante elevado, ya que es la que menor contenido en DQO posee. Esto es problemático ya que las botellas necesitan un determinado

espacio de cabecera para que el ensayo se realice correctamente. Por ello, se ha planteado disminuir el sustrato a añadir diluyendo a 1:3 la cantidad del inóculo utilizada en esta muestra:

$$Cant. Flotado = \frac{\left(\frac{59097}{3}\right) \left(\frac{mg}{L}\right) * 0.3 L}{2 * 70,97 \left(\frac{mg}{g}\right)} = 92,85 \text{ gramos}$$

El montaje del ensayo consistía en las botellas de cada tipo de fango (por duplicado, excepto las del fango flotado) tal y como se muestra en la Figura 32. Estas botellas tienen una capacidad de 615 mL, y se llenan a partir de la cantidad de sustrato calculada + 300 mL de inóculo. Tras un periodo aproximado de 20 días, la curva que caracteriza la acumulación de biogás se estabilizará dando a entender que la producción de biogás ha cesado. Una vez se cumple esta premisa se revisan los resultados obtenidos, obteniendo la Tabla 13.

Para poder analizar los resultados más eficientemente, construimos la gráfica de la Figura 33. Observamos una clara mejora en la producción de metano tras el paso por HT, al comparar las curvas obtenidas del fango pre-deshidratado y flotado con el hidrolizado. Se ha utilizado como unidad de medida la relación mL CH₄/g SV con el fin de normalizar la medida obtenida para el metano producido con la cantidad de materia volátil alimentada.

Como se puede observar, la principal premisa de la HT se cumple: la producción de biogás aumenta tras su paso por la hidrólisis térmica. Específicamente, el incremento conseguido es del 30,4 % en la producción de biogás.



Figura 32. Ensayos BMP

No obstante, para poder cuantificar correctamente esta ventaja proporcionada por el pretratamiento se debe de comparar la biodegradabilidad de los fangos. Previamente, se debe de calcular la cantidad de CH₄ teórica del fango, teniendo en cuenta la relación 0,35 L CH₄/g DQO. Teniendo en cuenta esta relación, la biodegradabilidad se calcula siguiendo la siguiente formula

$$\% \text{ Biodegradabilidad} = \frac{CH_4 \text{ acumulada (mL)}}{CH_4 \text{ teórica (mL)}} * 100$$

Según los resultados obtenidos en la Tabla 13, observamos un aumento de la biodegradabilidad en un 39% entre el fango de entrada o flotado y el hidrolizado tras su paso por HT. Por ello, queda demostrado el correcto funcionamiento de la tecnología (al menos en este aspecto, de momento).

Con respecto a la determinación del contenido soluble DQO sol, NH₄ y PO₄ han sido realizados con kits de prueba. Se ha seguido la rutina de análisis que suelen adoptar en los laboratorios de la depuradora.

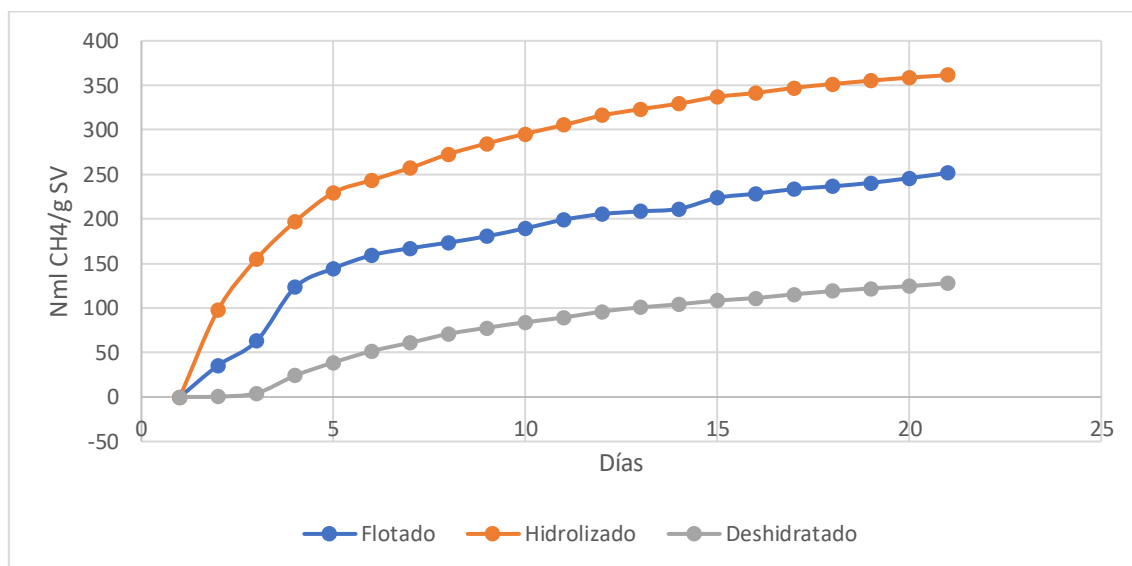


Figura 33. Resultados de los tests BMP's

Tipo de fango	CH ₄ teórica (nmL)	CH ₄ real acumulada (nmL)	Biodegradabilidad (%)
Fango flotado	3102,59	732,2	24%
Fango deshidratado	3102,59	878,1	28%
Fango hidrolizado	3102,59	1956,5	63%

Tabla 13. Cálculos de biodegradabilidad

La caracterización del fango a lo largo de su transformación a medida que pasa por hidrólisis térmica es vital para comprender el proceso global. Realizar este análisis de forma comparativa entre las diferentes tipologías de lodos que distinguimos nos permite observar el conjunto de transformaciones que se dan, y sus implicaciones en la composición química y física del fango.

Para llevar a cabo esta comparativa, se realizaron numerosas analíticas en laboratorio para la obtención de parámetros físicos y químicos de los fangos: ST, SV, DQO soluble, NH₄⁺ y PO₄⁻. Para el cálculo de sólidos se han pesado 8 recipientes (2 por cada muestra), y se ha anotado el valor de la báscula.

Para el cálculo del % de ST se han llevado 50 gramos en el recipiente de cada muestra a una estufa a 135 °C. Este porcentaje se ha calculado siguiendo la siguiente fórmula:

$$\%ST = \frac{\frac{\text{Peso del recipiente}}{\text{Peso tras estufa a } 135\text{ C}^\circ}}{\text{Masa de fango (50 g)}} * 100$$

Posteriormente, estas muestras tras estufa se llevan a una mufla a 550 C°. Se determinan el %SV de la siguiente forma:

$$\%SV = \frac{\frac{\text{Peso tras estufa a } 135\text{ C}^\circ}{\text{Peso tras mufla a } 550\text{ C}^\circ}}{\text{Masa de fango (50 g)}} * 100$$

Los resultados se exponen en la Tabla 14. Como podemos observar, se produce un aumento considerable en los sólidos totales a causa de la fase de pre-deshidratación para adecuar la masa de fangos al proceso HT. Además, existe una reducción de SV entre la entrada y la salida de la HT. Esta reducción es causada por el propio proceso HT tal y como se ha estudiado en el *Apartado 3. Parámetros de operación y su influencia*.

Si observamos la evolución del contenido soluble del fango expuesto en la Tabla 14 a lo largo del proceso se puede certificar que se está produciendo una solubilización correcta del fango. Específicamente, se está produciendo un incremento de la DQOsol del orden de 252 veces el de la DQOsol de entrada (flotado). Esto supera por mucho los valores de solubilización vistos en otras tecnologías, que era aproximadamente de 10 veces mayor tras el paso por HT. Por ello, se justifica el buen rendimiento de la instalación en este aspecto, certificando así el proceso Polanco. Además, el aumento de solubilidad de nutrientes NH₄⁺ y PO₄⁻ es de un orden mucho menor, de 15 y 4 veces más altos respectivamente. Esto supone otra ventaja ya que la gestión de retornos tras deshidratación resulta mucho más viable.

Se debe comentar que el aumento de solubilidad del fango no se produce en el mismo orden que el de producción de biogás. Esto deja entrever que la configuración HT-DA no optimiza al máximo el funcionamiento del digestor. Una posible razón es que la solubilización del fango es tan alta, que pueda llegar a causar algún tipo de inhibición en alguna de las fases que integran el proceso de digestión. La digestión es un proceso en el que interviene una comunidad microbiana muy diversa cuyo metabolismo y actividad celular está interrelacionado. Por lo tanto, debido al grado de dificultad asociado demostrar esta hipótesis resulta inviable con los medios concedidos.

Por tanto, se puede concluir que el aumento de solubilización inherente al proceso HT queda demostrado y certificado en este apartado.

Tipo de fango	Fango flotado	Fango deshidratado	Fango Hidrolizado
ST (%)	3.78	10.92	9.54
SV (%)	2.97	9.09	7.68
DQO sol (mg/L)	109	1350	26612
NH ₄ ⁺ (mg/L)	28	101.7	414
PO ₄ ⁻ (mg/L)	30	23.8	122

Tabla 14. Caracterización de los fangos que participan en el proceso HT

19. Análisis de datos de funcionamiento

El análisis e interpretación de datos de funcionamiento en las estaciones depuradoras de aguas residuales es una labor clave para determinar el rendimiento de las mismas. En el caso de la hidrólisis térmica no es diferente. Su estudio se reduce en gran medida, centrándolo en la línea de fangos y elementos que se ven afectados por la implantación del pretratamiento.

Este tipo de estudios reúne un esfuerzo de síntesis y compilación de información relevante, ya que implica muchos datos y variables. Por ello, nuestra labor se centrará en cuantificar los números de funcionamiento de la HT con el objetivo de valorar la eficiencia de la instalación entorno a los índices de rendimiento (IR) expuestos en el apartado 9.2. Parámetros de operación de la HT: Producción de biogás, Reducción de sólidos volátiles, Mejora de la deshidratabilidad del fango. Además, evaluaremos la integración energética de la instalación mediante la comparación de sus números de producción de energía cogenerada. Esto nos permitirá sintetizar mejor la información con el fin de dictaminar conclusiones sobre la operatividad de la HT.

Para poder evaluar la implicación de la HT se han comparado los datos de funcionamiento de la depuradora en un plazo de 6 meses, antes de su implantación respectivamente hasta la fecha de realización del presente estudio (Abril del 2024). Esta fue la idea a llevar a cabo previo al estudio, no obstante, se hizo un replanteamiento. Esto se debe a que en estos primeros 6 meses de funcionamiento de la HT aún no se contaba con la experiencia operativa requerida para conseguir un rendimiento estable de la instalación, y por tanto, se realizaron numerosas pruebas. Esto afectó a sus números de funcionamiento, los cuales siguen una tendencia muy irregular. Por ello, la comparativa se complementará con los números obtenidos en el último mes de Mayo del 2024 con el fin de otorgar un contexto actual de la hidrólisis térmica de Pinedo 2 y poder observar si la evolución de la instalación ha sido favorable.

Como se ha comentado en el apartado descriptivo de la instalación, actualmente el rendimiento de la hidrólisis térmica de Pinedo 2 no se ha explotado al máximo. La falta de experiencia operativa y baja robustez de la instalación ha provocado que no se opere al caudal de tratamiento de diseño. En la Figura 34 se puede observar la implicación que ha tenido la HT en el reparto porcentual de tipologías de fangos que se mezclan y mandan a digestión conjuntamente. Como se puede observar, el fango hidrolizado representa el 14.7 % del caudal del fango mezcla total.

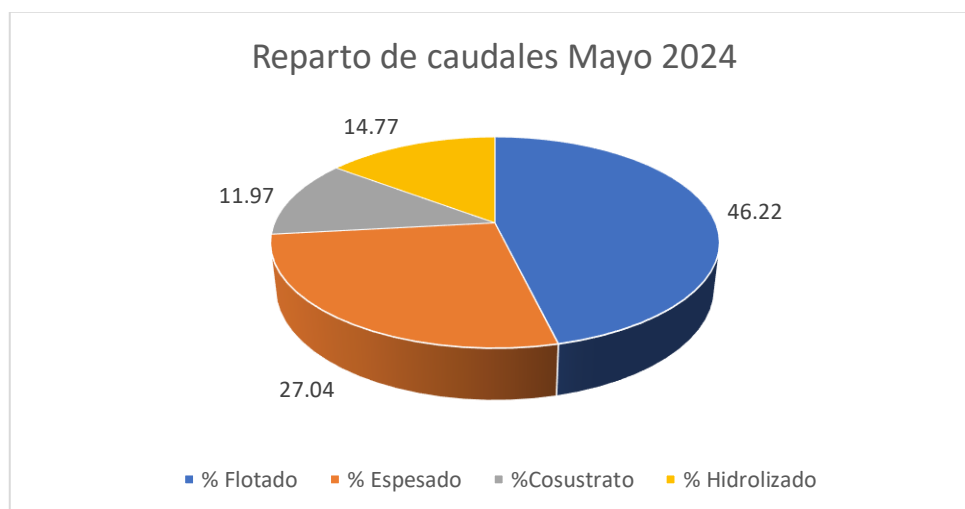


Figura 34. Reparto de caudales (%) de fango tras HT

En primer lugar, se ha analizado comparativamente la implicación de la HT en la consiguiente digestión. El beneficio más relevante de la hidrólisis térmica es la mejora de la biodegradabilidad del fango y de la producción de biogás en los digestores. En la Figura 35 se puede observar un

gráfico en bruto de la cantidad de biogás generado a lo largo del plazo estudiado, antes y después de la hidrólisis. Estos gráficos nos permiten observar que la hidrólisis ha elevado el límite de producción de biogás, manteniéndose bastante constante a lo largo de los días y meses. Existe una excepción a esa dinámica que corresponde al mes de Agosto de 2023. En este mes la planta tuvo problemas de funcionamiento, sobre todo en los digestores. Por ello, sus números de funcionamiento son bastante malos en general, con lo que no resulta un mes nada representativo.

Este tipo de gráficos expone la fluctuación del biogás producido a lo largo de los meses, pero para que la comparativa a realizar sea clara la información debe agruparse correctamente.

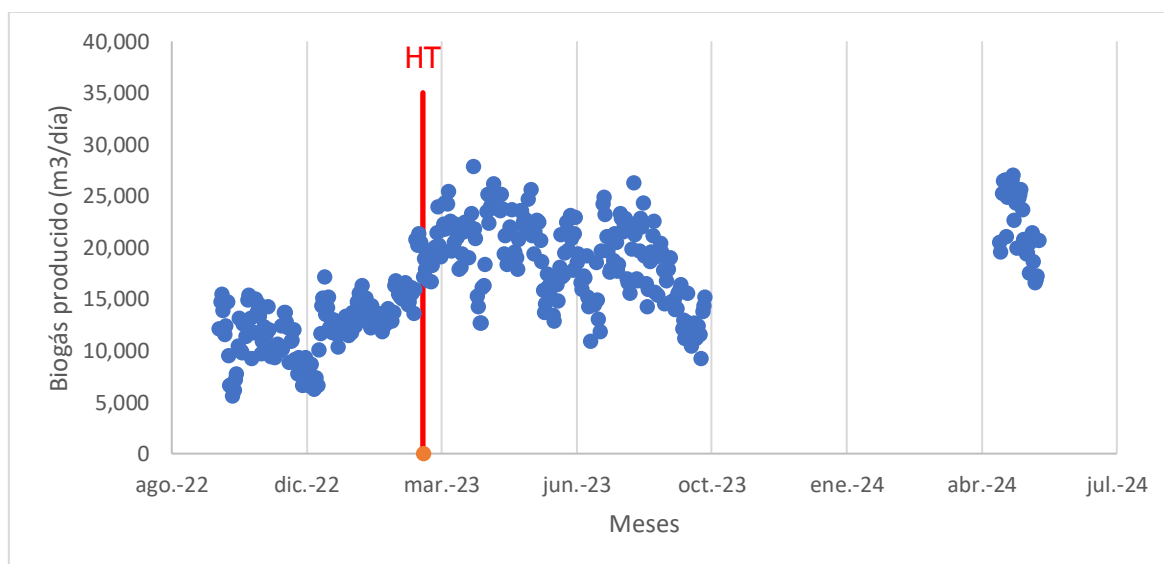


Figura 35. Producción de biogás en todo el periodo de estudio

Por ello, la confrontación de datos se realizará analizando la suma de biogás producido por día en cada mes. Esto permitirá simplificar el estudio en gran medida, además de poder añadir numerosas variables en un mismo estudio. Así, la Figura 36 nos otorga una visión sobre el balance y flujo general del biogás en su valorización en los meses de estudio, distinguiendo su uso destinado a alimentar los motores y a la alimentación auxiliar a la caldera. Una gran parte del biogás generado se alimenta a los motores de cogeneración para la producción de energía mientras que otra fracción menor del biogás se alimenta a caldera para la producción de vapor. En un principio, todo el vapor se alimentaba como principal medio calorífico para el calentamiento de los digestores. Es por ello, que el consumo de la caldera es mucho mayor en meses fríos. A partir de marzo, se instala la HT lo cual significa una demanda adicional de vapor de la caldera ya que en los primeros meses de arranque de la instalación no se cumplió con la autosuficiencia energética. Este consumo específico de vapor de la HT en estos meses corresponde al obtenido en los meses de Junio, Julio y Agosto. En estos meses no hay demanda de vapor para el calentamiento de los digestores, con lo que todo el biogás quemado corresponde al abastecimiento de la demanda de vapor vivo que requiere la HT. Esto, corresponde con un consumo de aproximadamente 7000 m³ en cada mes con respecto a los 55200-58300 m³ de biogás generado. Representando entre un 1,2-1,3% de biogás generado, por lo que resulta bastante despreciable. Esta situación no mejora en el último mes del estudio donde se produce la mayor producción de biogás bruto, aunque esto supone una quema de biogás a caldera de 91143 m³ totales, y una media de 2954 m³/día lo cual corresponde a la pérdida del 13,35 % del biogás generado. Aunque la cantidad de biogás destinada a los motores es la máxima observada en todo el estudio, la producción neta de biogás llega a su pico máximo. Con lo que la quema de biogás puede parecer justificada desde ese punto de vista.

Si observamos la evolución de la variable "Biogás a motores" se observa claramente como la instalación de la HT mejora la producción de biogás relevantemente. Concretamente, el aumento

generado es del 28,9 % aproximado desde el mes de marzo. Por ello, desde el punto de vista energético la instalación parece estar justificada. No obstante, habría que tener en cuenta el resto del coste operativo de la HT, aspecto que se valorará en su sección específica.

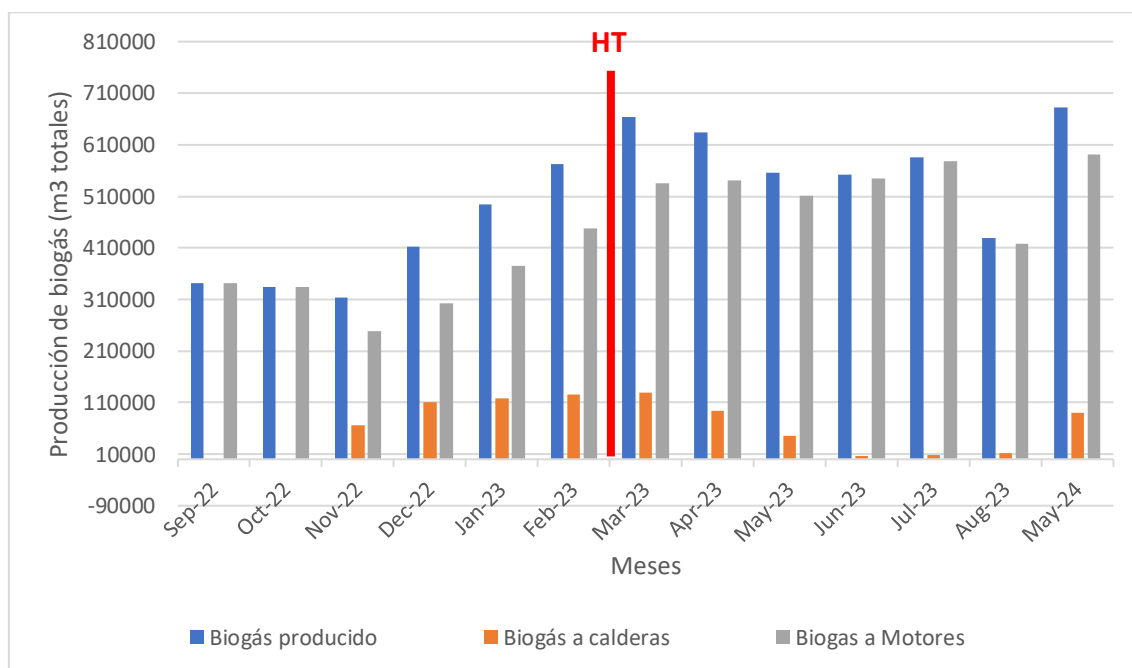


Figura 36. Reparto de uso de biogás generado

Un aspecto importante en esta valoración es la implicación de los cosustratos en la digestión. Los cosustratos representan un aporte adicional de materia orgánica o DQO que aporta a su conversión a metano. Entonces, para valorar el impacto que tiene la HT sobre el fango flotado de entrada se debe sustraer la cantidad de biogás (o en su defecto metano) que se genera por los cosustratos, para que su influencia no afecte al análisis.

No obstante, los cosustratos no solo representan una cantidad de DQO añadida al digestor, sino que mejora el proceso de digestión en sí. Estos pueden llegar a mejorar la relación C/N, el cual es un parámetro de la digestión anaerobia que afecta en gran medida al rendimiento de los digestores y por tanto a su capacidad de producción de biogás. Es por ello que el análisis realizado en esta sección es meramente teórico, con el fin de observar la implicación de la HT en la mejora de la biodegradabilidad del fango activado posteriormente flotado. A su vez, no se contaron con los datos de cantidad de DQO que representa cada corriente de fango, con lo que tampoco se ha podido diferenciar la aportación real de materia orgánica por cada sustrato alimentado.

En la gráfica de la Figura 37 se ha realizado un cálculo que nos permite diferenciar entre el metano producido por los cosustratos y por los fangos de la depuradora. Este cálculo ha sido posible al contar con los porcentajes de %CH₄ de cada mes y la cantidad de cosustratos de kilogramos de DQO, suponiendo un factor de conversión típico de 0,35 m³ CH₄/Kg DQO. La base de cálculo se centra en la cantidad de metano producida, ya que es aquella aprovechable por los motores de cogeneración. Como este cálculo es puramente teórico, adicionalmente se han calculado los caudales máxicos de volátiles que entran al digestor para tener una idea de la cantidad de materia orgánica del fango producido que se está alimentando.

Se ha observado un aumento generalizado de la producción de metano correspondiente al aprovechamiento de fangos de depuradora desde la implantación de la HT. Concretamente del 36,4 %, lo cual corresponde a un incremento en un orden similar a la mejora de la producción de

biogás destinado al motor. Esto es debido a que la alimentación de cosustratos ha sido similar en los diferentes meses del estudio, con lo que su implicación relativamente siempre es la misma. Generalmente la producción de metano aumenta a medida que se alimenta mayor cantidad de contenido volátil. No obstante, se observa que a partir de la implantación de la hidrólisis térmica en Marzo de 2023 hay un claro aumento de la producción de metano con una alimentación de masa volátil similar a la de meses anteriores. Por ello, se demuestra así la clara influencia positiva que ha tenido la HT en la mejora de la biodegradabilidad del fango alimentado. Aproximadamente, el fraccionamiento del metano producido es del 24,4% por cosustratos / 75,5 % por lodos antes de la HT y del 21% por cosustratos / 79% lodos post-HT.

El último mes del estudio registra la mayor producción de metano observada. No obstante, también es el mes en el que mayor cantidad de cosustratos se ha alimentado a los digestores y ello justifica el valor total de metano obtenido. Por la información que tenemos se puede concluir que este último mes de Mayo no tuvo un buen rendimiento de la HT. En la gráfica anterior se ha observado que en este mes la producción de fango hidrolizado ha alcanzado su máximo, a diferencia de la Figura 37 en la que la producción de metano no ha alcanzado la cota más alta del estudio. Esto puede corresponder con un mal funcionamiento del digestor, ya que el valor de metano producido por fango generado por planta se obtiene por diferencia con el valor teórico calculado de biometanización de los cosustratos. En este aspecto, este último mes de estudio no es muy representativo a la hora de evaluar la implicación de la HT en el potencial de biometanización ya que los números obtenidos son incoherentes y la influencia de los cosustratos es demasiado alta como para aislarla del estudio.

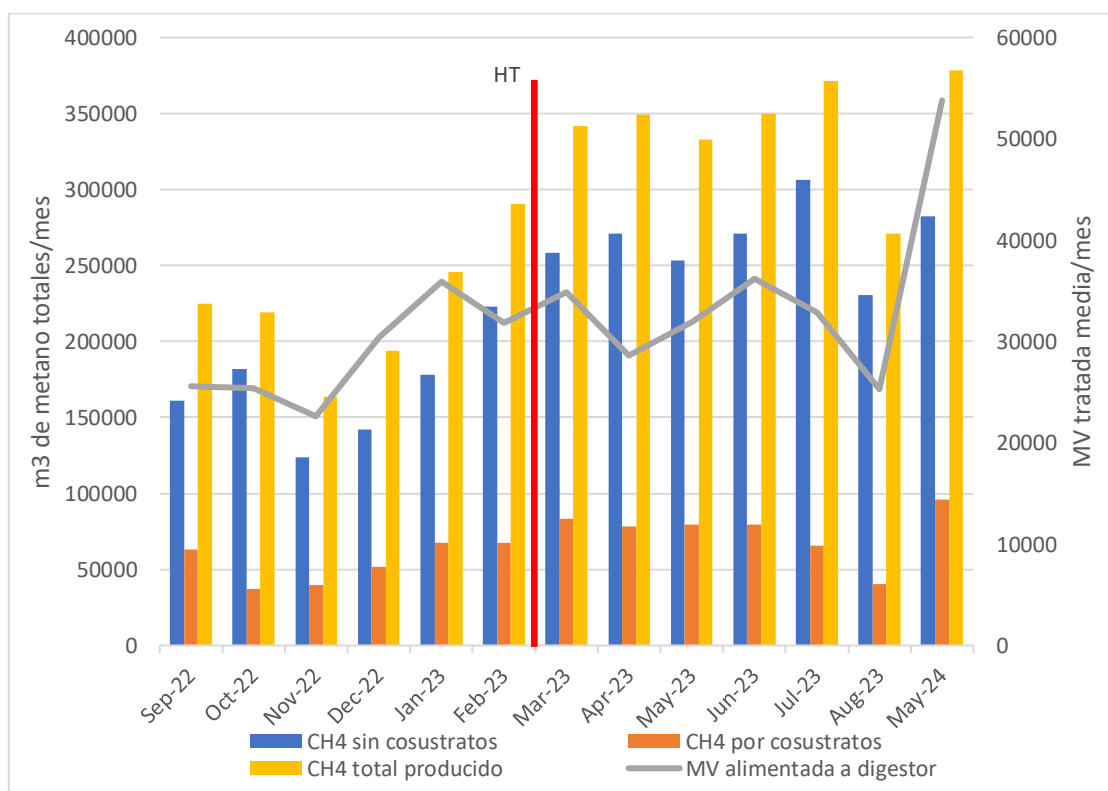


Figura 37. Producción de metano de cada corriente de fango

La anterior comparativa se ha planteado con el objetivo de aislar la influencia de la mezcla de fangos producidos en planta en la consiguiente digestión, con el fin de poder analizar en profundidad la implicación de la HT en la producción de biogás y energía. Como hemos comentado, esto se entiende desde un punto teórico de partida que sigue dos principios: 1) El digestor funciona correctamente a lo largo de los meses de estudio, con lo que se mantiene la

conversión de DQO a CH₄ y 2). La introducción de cosustratos tan solo implica un aporte de DQO adicional al digester. No obstante, esta situación no corresponde con la realidad ya que la influencia de los cosustratos va más allá del aporte de DQO que representa.

Por ello, es vital realizar un estudio comparativo entre la producción de fango hidrolizado y los cosustratos para poder evaluar la implicación de ambos en el proceso de digestión, a partir de los datos de funcionamiento obtenidos. En la Figura 38 se representan los resultados gráficos en torno a esta comparativa. Se puede confirmar que la cantidad de cosustratos utilizados en la digestión tiene una mayor implicación en la producción de biogás que la cantidad de fango hidrolizado suministrada. El segundo mes de mayor producción de biogás fue Marzo de 2023, con 664483 m³ totales producidos, el cual corresponde con el segundo mes de mayor aporte de cosustratos de 2834 m³, siendo el mes en el que menos caudal de fango hidrolizado se había producido, de 824 m³ a lo largo del periodo. Aun así, se concluye que la hidrólisis tiene un efecto positivo en la producción de biogás. No obstante, el punto clave de evaluación reside en el balance económico/energético de la HT y será el que determinará si el aumento de biogás justifica los recursos necesarios para llevar a cabo el pretratamiento actual que sigue la planta.

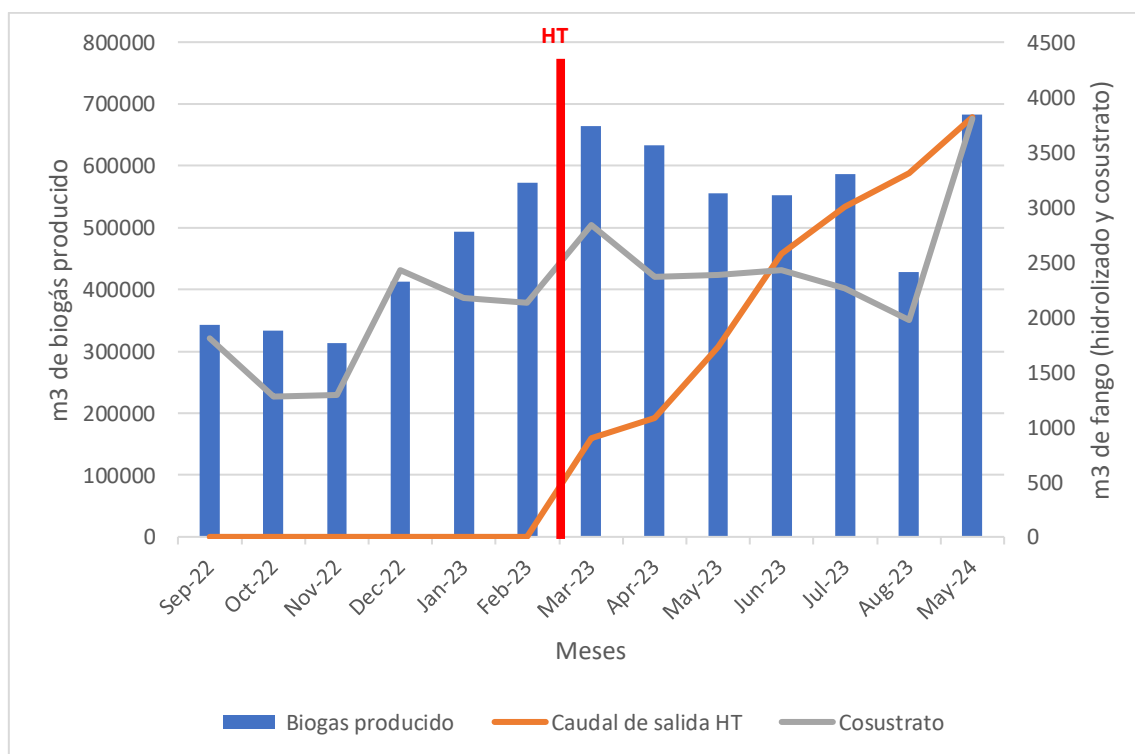


Figura 38. Producción de biogás con respecto a la producción de caudal hidrolizado

Otro aspecto estimable de la introducción de la HT como pretratamiento en la línea de fangos es el incremento en la reducción de sólidos tras el paso por la digestión. Estudiar este parámetro nos ayuda a complementar la comparativa anterior, con el fin de confirmar un impacto positivo de la HT en la fase de digestión. La reducción del contenido sólido del fango digerido es un factor que determina la estabilidad del fango de salida y que nos informa sobre el rendimiento del digester en la conversión de volátiles a biogás. Así en la Figura 35 se ha expuesto la evolución de esta reducción de sólidos producida tras digestión anaerobia. En ella se representan el porcentaje de reducción de sólidos totales (RST), de sólidos volátiles (RSV) con respecto al caudal de salida de la instalación de hidrólisis térmica

Observando los resultados de la Figura 39, queda demostrado que la hidrólisis térmica cumple con las expectativas demandadas. Se observa una reducción de ST del 43% y del 52% de SV de

media tras la implementación de la HT, frente al 25% de reducción de ST y 36% de SV en la digestión convencional. Esta reducción de sólidos deriva en beneficios en la posterior deshidratación, ya que al trabajar una menor cantidad de masa seca la demanda de polielectrolito debería bajar. Además, la reducción de sólidos se cuantifica a medida que la producción de fangos hidrolizados alimentados aumenta, con lo que su impacto es claramente positivo en este aspecto.

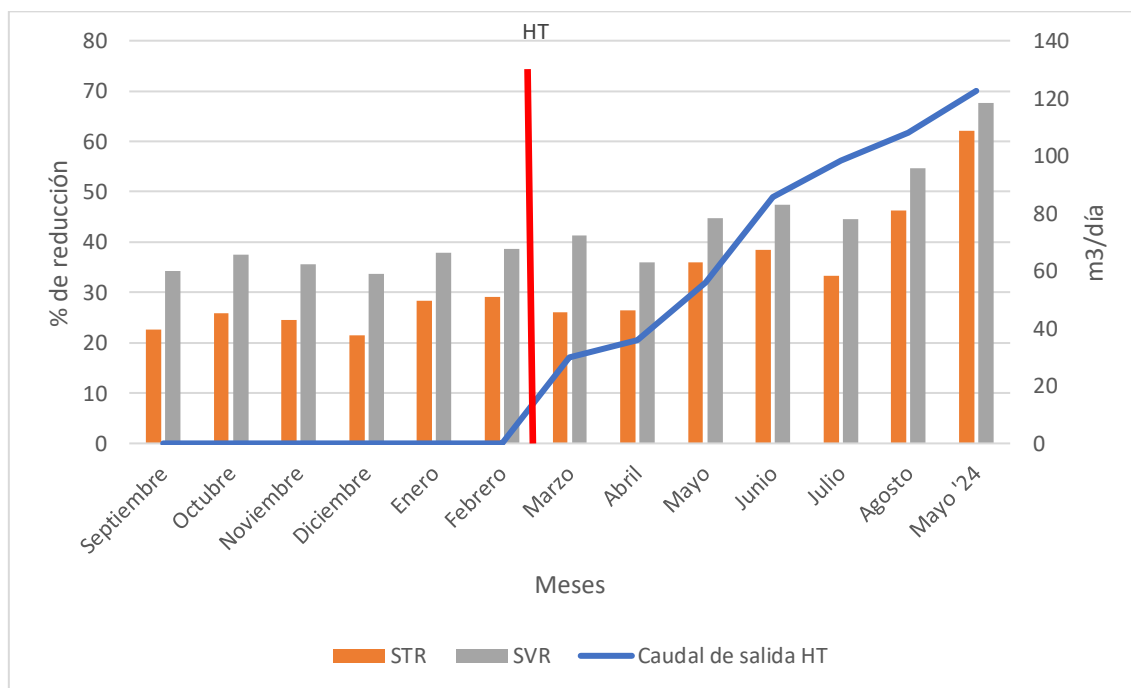


Figura 39. Reducción de sólidos tras digestión anaerobia

En relación a lo expuesto en el anterior párrafo, se ha evaluado en la Figura 40 la influencia que ha tenido la HT en la fase de post-deshidratación del fango, con respecto a los datos de biosólido obtenidos. Una de las prestaciones de la HT de alta temperatura es la reducción del coste de polielectrolito usado en la deshidratación, causado por la liberación de agua intersticial flocular del fango y su transformación a agua libre deshidratable. No obstante, a esta cantidad se le debe sumar el poli usado en las centrifugas de pre-deshidratación a entrada de la HT, que permiten trabajar al 14% de MS.

Observando los resultados gráficos no se pueden sacar conclusiones muy claras. Se observa un aumento del poli utilizado a medida que incrementa la cantidad de biosólido que sale de las centrifugas de deshidratación. La HT no ha supuesto una mejoría relevante en ninguno de estos aspectos, siendo bastante similares los resultados obtenidos a lo largo de los 12 meses de estudio (exceptuando los primeros meses de invierno, en los que los caudales de fangos digeridos fueron realmente bajos). Esto puede ser debido a que el caudal hidrolizado representa tan solo un 14.8 % del caudal de la mezcla de fangos, con lo que el aumento de deshidratabilidad causado por la HT no tiene un impacto muy relevante en la reducción del biosólido producido y, por lo tanto, en el consumo de polielectrolito en post-deshidratación.

Hay que tener en cuenta que la HT implica un claro salto de consumo de polielectrolito. Esto es debido al consumo de polielectrolito en pre-deshidratación de las centrifugas de la HT, que aumenta el consumo total. Por ello, la HT en este sentido representa una desventaja: mayor consumo de polielectrolito a causa de la demanda de materia seca que requiere la hidrólisis y un volumen de biosólido producido similar al que se obtenía sin HT.

Durante los últimos meses la producción de fango hidrolizado siguió una tendencia positiva de incremento, y por tanto la influencia de la HT, aunque también derivó en un mayor consumo de

polielectrolito en las centrifugas de HT. Por ello, se deduce que este aspecto del rendimiento de la HT no se cumple siguiendo la configuración y modo de funcionamiento presentes.

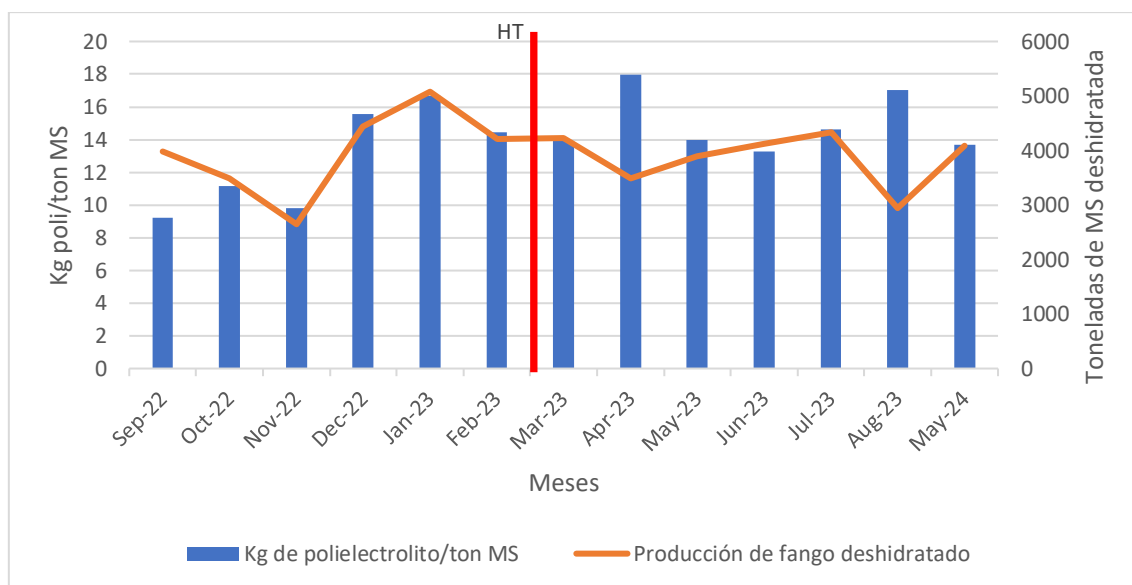


Figura 40. Rendimiento de la post-deshidratación

Finalmente, se ha realizado un análisis de la cantidad de energía producida a partir de la alimentación del biogás generado a los motores correspondientes, con el fin de evaluar el impacto de la HT sobre la cogeneración de Pinedo 2. Al igual que en otras comparativas, se relacionarán estos resultados con la evolución de la cantidad de fango hidrolizado que se observa en el periodo de 6 meses post-HT + el mes de Mayo de 2024. En dicho gráfico no solo se representarán la energía cogenerada total y la producción de fango hidrolizado, sino que se calculará la cantidad de energía de la que es responsable el fango producido en la planta. Esto se realiza con el fin de aislar nuestro estudio de la influencia que tienen los cosustratos en este apartado. Para ello, se ha calculado la relación Kwh/m³ de CH₄ para poder calcular los kilovatios hora del fango a partir de la cantidad de metano que producen. Dicha relación es de 3,51 KWh/m³ CH₄ de media.

Como se observa en la Figura 41, tras la implantación de la HT se ha producido una gran mejoría en el rendimiento de la cogeneración. Además, al graficar la energía cogenerada teórica sin cosustratos se certifica que esta mejoría es producida por la HT, ya que empieza a aparecer a partir del mes de la implantación de la misma. También escala a medida que la producción de fangos hidrolizados aumenta, con lo que su implicación en este aspecto es clara.

La cogeneración media total de energía durante los 6 meses estudiados pre-HT es de 811.6 MWh y 1150.7 MWh, lo cual supone un aumento del 41.8 %. El balance energético correspondiente determinará si dicho aumento es suficiente como para justificar la HT desde el punto de vista energético.

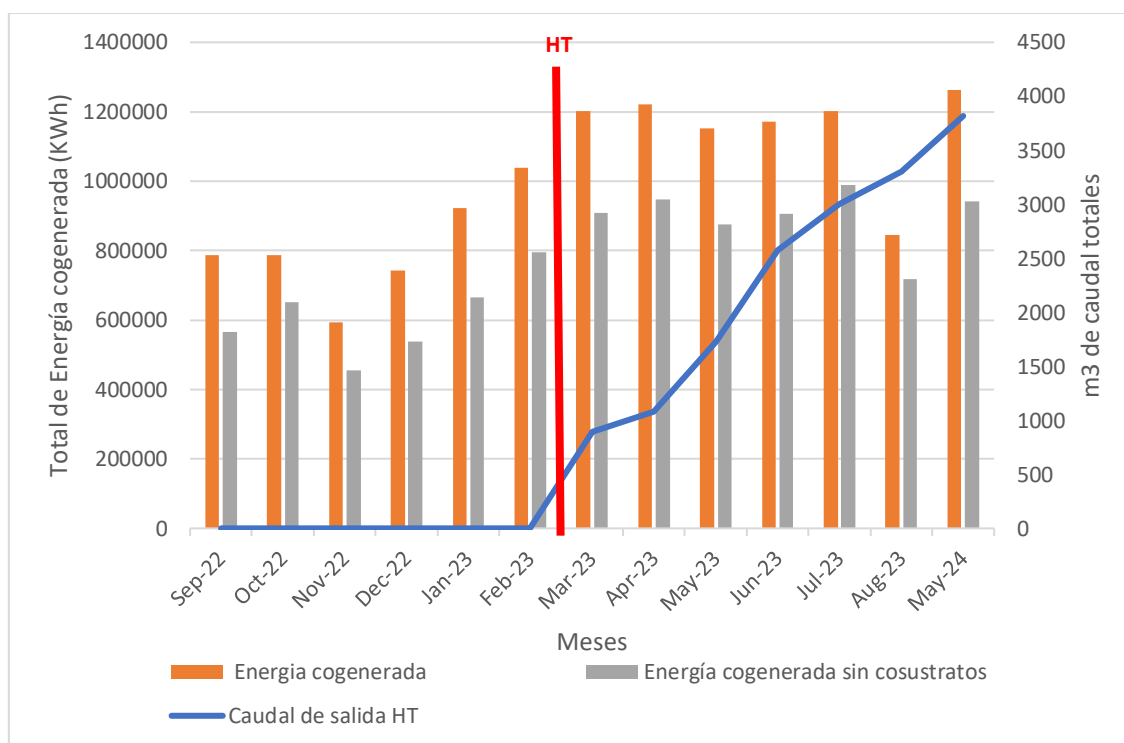


Figura 41. Producción de energía con respecto a la producción de caudal hidrolizado

Estas comparativas gráficas nos han permitido observar las principales implicaciones que ha tenido la HT sobre el rendimiento general de la cogeneración y codigestión de fangos de la línea de expansión de Pinedo 2. Por ello se han valorado los aspectos de mayor relevancia, aquellos que resultan más interesantes para el Jefe de Planta analizar con el fin de determinar realmente cual es la eficiencia y rentabilidad de la nueva instalación de la línea de fangos de su depuradora.

Así, se ha elaborado la Tabla 15 a modo de sumario, recopilando los resultados de los análisis realizados en este apartado e incluyendo otros de un menor orden de relevancia. Esto permite tener una visión más global del verdadero rendimiento de la HT y su implicación en el funcionamiento del resto de equipos en la que se involucran sus productos (como son los digestores, la post-deshidratación mecánica o los motores de cogeneración).

Si analizamos el resto de parámetros de la Tabla 15 observamos diferentes situaciones según donde centremos nuestro análisis de valoración. En primer lugar, observamos una gran mejoría del rendimiento del digestor en términos generales. Tanto la carga orgánica como la eliminación de sólidos aumentan notablemente, lo cual provoca una mayor producción de biogás que afecta impactando positivamente sobre la productividad de los digestores. En cambio, el tiempo de residencia del digestor no varía, lo cual difiere con las prestaciones del diseño de HT instalado. Esto provoca un impacto negativo en el balance global, ya que no hay ahorro energético en la operación de los digestores, aunque no es muy apreciable.

Por otro lado, la HT ha afectado negativamente al proceso de deshidratación desde el punto económico. El consumo total de polielectrolito catiónico ha aumentado considerablemente y el volumen de biosólido no ha disminuido, lo cual no representa el ahorro esperado en su posterior gestión.

	Parámetros	Sin HT	Con HT	Diferencia
Electricidad	Biogás (m3/día)	13276	18914	+ 28.9%
	Electricidad (MWh/mes)	811 MWh	1041 MWh	+ 21,7 %
	Autoconsumo			
Deshidratación	Vol. Biosólido (kg/mes)	3976 kg/mes	4022 Kg/mes	+1,1%
	Consumo poli (kg/día)	7618 kg/mes	8567 Kg/mes	+ 12,4%
Digestión	Rdto. TMS tratada %	25 %	38 %	+ 13%
	Rdto MV (m3 gas/Kg MV aliment)	0,47	0,60	+22%
	Tiempo residencia	24 días	25 días	
	Carga orgánica (Kg MV/m3/día)	1.08	1.23	+12.4%
	Eliminación MV(%)	36%	48%	+ 12%
	Productividad (m3 gas/m3 digestor/día)	0.51	0.72	+29.8%
HT	Vapor externo (m3/kg fango)	-	1100	
	Capacidad (ton MS/mes)	-	327.86	
	Consumo de vapor (Kg vapor/Kg MS)		1.81	

Tabla 15. Resumen del análisis de datos de funcionamiento

20. Balance energético y económico de la hidrólisis térmica

El balance energético/económico de cualquier instalación significa la prueba irrefutable de su viabilidad y rentabilidad. En este caso específico, se ha demostrado que la hidrólisis térmica contribuye a una clara mejora del rendimiento de la cogeneración, produciéndose un aumento del 21,7% de la energía cogenerada a causa de la implantación de la HT, comparado con la situación base. No obstante, la HT entraña una serie de costes asociados a su funcionamiento:

1. Costes adicionales de bombeo: La implantación de la HT como pretratamiento de fangos activados ha provocado la aparición de dos bombeos adicionales respecto a la línea de fangos convencional de la situación base: bombeo de flotado a HT y bombeo de retorno del fango hidrolizado.

2. Costes operativos de la HT: Esta sección agrupa todos los costes derivados de la propia operación y elementos asociados a la HT. Específicamente: 1) Coste de operación de las centrífugas, 2) Coste de operación de la HT (bombeos y agitación) y 3) Coste de operación de la caldera (especialmente relevante en los meses de quema de biogás).

Todo este conjunto de costes se ha recopilado para los 12 meses del estudio comparativo previamente expuesto y se han complementado con los costes producidos en los 10 meses siguientes, hasta Mayo de 2024. En este último periodo el funcionamiento de la HT ha encontrado un régimen de operación estable con lo que su inclusión nos permitirá tener una visión actualizada del balance energético.

Inicialmente, dicho balance se plantearía desde la siguiente ecuación:

$$\Delta E = -(E_{DH} + E_{HT} + E_{caldera}) - E_{AD} + E_{cogenerada}$$

Donde E_{DH} es el coste energético operativo derivado de las centrifugas de pre-deshidratación que permite la entrada del fango a 12-14 MS% a la entrada de la HT. La E_{HT} hace referencia a la energía necesaria para que la HT funcione correctamente, derivando en los costes expuestos anteriormente. $E_{caldera}$ representa el coste energético que supone el trabajo de la caldera. E_{AD} es la energía utilizada en la digestión para adecuar los fangos alimentados al ambiente térmico mesófilo (35 C°), correspondiendo con costes de calentamiento y pérdidas de calor tras pared. No obstante, no se ha notificado ningún impacto de la HT en este sentido con lo que no se ha tomado en cuenta en el presente balance energético. Este se planteará más extensamente en el próximo apartado, más centrado en el balance de calor del digestor y las posibilidades que abre. Finalmente, el input positivo del balance es la variable $E_{cogenerada}$ es decir, la cantidad de energía cogenerada en un determinado periodo de funcionamiento. Todas las variables comparten la misma unidad de medición: kilovatio-hora (KWh).

Tanto el consumo energético de la hidrólisis, centrifugas de pre-deshidratación y caldera vienen computados conjuntamente en Pinedo 2, en una sola lectura (CCM6). Adicionalmente, a este coste se le suma el de bombeo de fangos a hidrolizar y de retorno (CCM6B). Hay que tener en cuenta que este coste es nulo durante los meses de la pre-HT ya que la instalación no se había realizado aún.

Otro aspecto a tener en cuenta en la cogeneración de energía es la implicación que tienen los cosustratos en la misma. A diferencia del estudio comparativo realizado sobre los datos de funcionamiento 6 meses antes y 6 meses después de la HT, no se tienen datos ni de caudal ni kilogramos de DQO de los cosustratos alimentados en el periodo de Septiembre 2023 – Mayo 2024. Por ello, se asumirá el balance sin resaltar la influencia de los cosustratos en la producción de energía, asumiendo que la alimentación de los mismos es relativamente constante a lo largo de los meses.

Como se puede observar en la Tabla 16, la hidrólisis térmica consigue mantener un incremento continuo de energía neta cogenerada aún con los costes que supone la operatividad de la instalación. Realmente la operatividad de la hidrólisis térmica no ha supuesto un coste energético relevante, aproximadamente del 2-3 % en los meses que mayor consumo ha habido. Por ello, el balance energético ha sido favorable, con un incremento del 21.38 % de energía frente a la situación base. No obstante, el objetivo actual por parte del explotador es conseguir que dicho incremento aumente ya que actualmente la HT tiene un rendimiento realmente bajo.

Ya comentamos en apartados anteriores que los 2 principales problemas de rendimiento de la HT en el plano energético: 1) Producción de la HT que no cumple con la esperada por diseño ($6.4 < 8,57$) y 2) Quema de biogás adicional para cumplir con la demanda de vapor. El primer problema es difícil de abordar ya que no se puede plantear un cálculo teórico de una situación que aún no

se ha dado de en la planta. No obstante, si que se sabe que aproximadamente para el rendimiento actual de la HT, se están quemando entre 6000-7000 m³/mes en la caldera para la producción de vapor de alta. Si se cumpliera con la autosuficiencia esta cantidad se llevaría a los motores para su cogeneración. No obstante, esto no representaría un incremento tan relevante como para determinar que este aspecto es crítico en el rendimiento de la hidrólisis y la cogeneración de Pinedo 2 en general.

Mes	$E_{\text{cogenerada}}$ KWh	$E_{\text{HT}} + E_{\text{caldera}}$ KWh	ΔE KWh
sep-22	786900	13.140	773760
oct-22	786500	13.140	773360
nov-22	592700	13.140	579560
dic-22	742700	13.140	729560
ene-23	922800	13.140	909660
feb-23	1037900	13.140	1024760
mar-23	1203200	13.351	1202157
abr-23	1220100	14.498	1205602
may-23	1151100	20.623	1130477
jun-23	1171000	24.361	1146639
jul-23	1201700	27.734	1173966
ago-23	844500	29.555	814945
sep-23	900000	26.219	873781
oct-23	921200	28.536	892664
nov-23	996300	26.192	970108
dic-23	899400	27.080	872320
ene-24	900400	18.930	881470
feb-24	823400	27.839	795561
mar-24	1071900	53.307	1018593
abr-24	1034000	12.603	1021397
may-24	1263400	30.281	1233119

Tabla 16. Balance energético de la HT de Pinedo II

Según lo comentado en el balance energético, la HT está produciendo un incremento de energía bastante relevante, y por tanto un aporte económico a valorar en este aspecto. No obstante, es necesario plantear un balance económico en el que se pongan en común los gastos asociados de la instalación, que no son para nada despreciables.

En la Tabla 17 podemos observar el balance económico derivado de la comparativa entre la depuradora sin HT y post.HT. En este sentido, se han valorado los costes asociados a la operatividad de la planta y se calcularán los ahorros obtenidos mediante la diferencia que exista entre el valor de la energía cogenerada adicional que supone la HT y los costes adicionales derivados. Con todo ello, se calculará el retorno de la inversión que ha supuesto la instalación, en específico 2.8 millones de euros. Este retorno determina el plazo en el que el gasto de inversión se consigue amortizar y sirve para analizar el rendimiento que la hidrólisis térmica tiene desde el punto de vista financiero.

Los costes añadidos por el OPEX de la planta son:

- Personal: La media mensual de gastos de personal (coste empresa) considerando un % de dedicación del 20% para un eléctrico y un mecánico y de un 50 % para un operador de turno sería de unos 2.500 €/mes
- Mantenimiento: Mantenimiento de equipamientos de la HT y asociados (bombas mono, caldera e hidrólisis térmica) ha sido de unos 7.125 €/mes de media.
- Reactivos: Aquí se incluyen reactivos de la caldera, polielectrolito de pre-deshidratación de HT y agua de caldera. Coste variable según el mes
- Tanto el coste de analítica en laboratorio como el de gestión de residuo no han resultado ser un coste apreciable.

Analizando detenidamente la Tabla 17, observamos un balance económico que conlleva un ahorro total de 3000 €/mes. Si tomamos el coste de inversión como valor referencia la instalación se amortiza en un plazo de 77.8 años. Obviamente, esta situación es completamente inviable tal y como se plantea en este balance ya que la inversión no podría ser amortizada realísticamente. El principal condicionante de este bajo ahorro producido es el coste de mantenimiento. Han ocurrido numerosas paradas, averías, cambio de elementos... etc., y esto se ha visto representado en un coste asociado muy alto. Prácticamente la mitad del beneficio obtenido en la producción de energía se ha utilizado para compensar el coste de mantenimiento que requiere actualmente la hidrólisis térmica. Esto demuestra la baja robustez de la HT, que no cumple los requisitos para sus condiciones de funcionamiento.

Además, es destacable el consumo de reactivos que requiere la hidrólisis. En especial, el consumo de polielectrolito en general. Hay un consumo medio de poli en pre-deshidratación de 1750 m3/mes. A diferencia del gasto por mantenimiento, este coste por reactivo va a ser fijo en torno a estos valores. Es más, a futuro es probable que incremente relevantemente si se quiere trabajar a 8,57 m3/hora de fango hidrolizado, ya que el aporte extra de masa seca comportaría un consumo de polielectrolito mayor.

Por lo comentado en torno al coste de mantenimiento, este balance otorga poca información del ahorro futuro que va a suponer la hidrólisis. Por ello, en la Tabla 18 se ha planteado un balance similar suponiendo un funcionamiento más robusto de la planta. Es decir, se han reducido los costes de mantenimiento asociados a la HT hacia unos valores más coherentes en una instalación de sus características. A su vez, se ha tomado de única referencia el último mes del estudio Mayo de 2024, y se ha asumido una completa autosuficiencia energética de la HT (el biogás no se quema, se aprovecha en motor). Los cálculos indican un retorno mucho más asumible, de 8,2 años, con lo que parece que la HT va por el rumbo deseado.

Por ello, el objetivo de la HT actual de Pinedo 2 es la de reducir los costes de mantenimiento mediante un estudio minucioso de los puntos críticos de su instalación y control de los mismos. Además, el objetivo de rendimiento de la HT es la de trabajar al caudal de diseño de la instalación, de 8,57 m3/día ya que esto aumentaría notablemente la producción de biogás, energía cogenerada y mejoraría aún más el balance económico expuesto

	Sin HT vs HT (mensual)
Personal	2500 €
Mantenimiento	7125 €
Reactivos	3312 €
Otros (agua de dilución, análisis.)	Despreciable

Residuos	-
Energía	15938 €
Ahorro (€/mes)	3000 €

Tabla 17. Balance económico de la HT de Pinedo II. En color rojo los gastos ocasionados y en color verde el ahorro obtenido

$$\text{Coste de inversión} = 2.800.000 \text{ €}$$

$$\text{Retorno} = \text{Coste} \frac{\text{inversión} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right)}{\text{Ahorro}} = 77,8 \text{ años}$$

	Sin HT vs HT (a futuro)
Personal	2500 €
Mantenimiento	1000 €
Reactivos	4144 €
Otros (agua de dilución, análisis.)	Despreciable
Residuos	-
Energía	36254 €
Ahorro (€/mes)	28610 €

Tabla 18. Previsión del balance económico futuro de la HT de Pinedo II.

$$\text{Coste de inversión} = 2.800.000 \text{ €}$$

$$\text{Retorno} = \frac{\text{Coste inversión} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right)}{\text{Ahorro}} = 8,2 \text{ años}$$

21. Balance de calor

Como hemos visto en el apartado anterior, el balance económico ha resultado ser muy desfavorable con respecto a las expectativas concebidas con esta instalación. Por ello, resulta vital explorar todas las alternativas que podamos a la hora de reducir el gasto asociado a la operatividad de la HT.

En este sentido, un aspecto interesante a evaluar es la implicación que tiene la hidrólisis térmica en la transferencia de temperatura a la mezcla de fangos y la repercusión que tiene en el calentamiento de los digestores. La HT transforma una determinada fracción del fango flotado producido en fango hidrolizado, alterando su temperatura. Según los controles realizados por el personal de la depuradora, el fango hidrolizado tiene una temperatura de salida de 90 C°. Con ello, se puede realizar una operación de cálculo para conocer la temperatura del fango mezcla tomando de referencia la caracterización de los caudales, temperaturas de los fangos que se alimentan a los digestores y parámetros del sistema de calentamiento de fangos:

$$T^a \text{ Mezcla} = \frac{6 \frac{m^3}{h} * 24 h * 90 C^{\circ} + 216 \frac{m^3}{dia} * 16,7 C^{\circ} + 70,27 \frac{m^3}{dia} * 16,7 C^{\circ}}{6 \frac{m^3}{h} * 24 + 216 \frac{m^3}{dia} + 70,27 \frac{m^3}{dia}} = 31,2 C^{\circ}$$

Según este cálculo la transferencia de temperatura no es la suficiente como para alcanzar la temperatura de digestión requerida (Mesófila: 35 C°). Es por ello, que se tendrá que calentar el fango lo suficiente para otorgarle lo 4,8 C° que le restan. Esta cantidad de calor se puede calcular siguiendo la siguiente operación:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de calor a aportar} &= Q * \Delta T * PCI_{ag} = 726 \frac{m^3}{dia} * (35 - 31,2 C^{\circ}) * 1000/24 \\ &= 114234,7048 \frac{Kcal}{hora} \end{aligned}$$

No obstante, a esta cantidad se le deberá sumar las pérdidas de calor totales de los digestores.

$$\begin{aligned} \text{Necesidades de calor totales} &= 114234,7048 \frac{Kcal}{hora} + 673779 \frac{Kcal}{hora} \\ &= 788013,7048 \frac{Kcal}{hora} \end{aligned}$$

Para realizar dicha labor de calentamiento los recursos aprovechables por orden de prioridad son principalmente: 1) Sistema de recuperación de camisas y humos de los motores y 2) Quema adicional de biogás en caldera. En el circuito de refrigeración comprende el circuito de camisas y la recuperación de calor de los humos de los motores. Cada uno de ellos aporta 10 C° al intercambiador. No obstante, tras la implantación de la HT todos los humos generados en cogeneración son llevados a la caldera para abastecer la demanda de vapor de alta de la hidrólisis, con lo que el calentamiento del digestor corre a cargo del circuito de camisas. Igualmente, este aporte de calor no llegaría a consumir las necesidades de calor. Teniendo en cuenta las pérdidas producidas en caldera y circuitos del intercambiador las necesidades de calor de la caldera serían:

$$\begin{aligned} \text{Necesidades de calor totales} &= 788013,7048 \frac{Kcal}{hora} + (0,05 + 0,05) * 788013,7048 \frac{Kcal}{hora} \\ &= 866815,0753 \frac{Kcal}{hora} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de calor aportada por circuito de camisas} &= Q * \Delta T * PCI_{ag} \\ &= 50 \frac{m^3}{h} * (88 - 78 C^{\circ}) * 1000 = 750000 \frac{Kcal}{hora} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Necesidades de calor caldera} &= 866815,0753 \frac{Kcal}{hora} - 750000 \frac{Kcal}{hora} \\ &= 116815,0753 \frac{Kcal}{hora} \end{aligned}$$

Entonces, en esta situación se debe de producir la quema de una cierta cantidad de biogás en la caldera. Se procede al siguiente cálculo:

$$\text{Potencia bruta de la caldera} = \frac{116815,0753 \frac{Kcal}{hora}}{0,8} = 146018,8441 \frac{Kcal}{hora}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de biogás a caldera} &= \frac{\text{Potencia}}{PCI_{\text{Biogas}}} = \frac{146018,8441}{5000} = 29,20 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \\ &= 21727,60 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \end{aligned}$$

El objetivo de este balance es identificar esta quema de biogás adicional que se produce para complementar las necesidades de calor de los digestores. No obstante, con la hidrólisis térmica se nos abre la posibilidad de poder reducir las necesidades de calor de los digestores, ya que la corriente hidrolizada de 90 C° puede transferir ese calor. Para ello, se necesita calcular la corriente de fango hidrolizado que permite que esto ocurra. Es decir, la cantidad de hidrolizado que limite la necesidad de calentamiento de los digestores a la cantidad de calor que es aportada por el circuito de camisas, evitando la quema de biogás.

Para ello, las necesidades de calentamiento del digestor deben ser abastecidas con el calor producido por el circuito de camisas. Por tanto, planteando esta condición podemos ejecutar el siguiente esquema de cálculo, que nos permitirá conocer a que caudal de hidrolizado se cumple este escenario:

$$\text{Necesidades de calor en digestión} = \frac{750000}{1 + 0.05 + 0.05} = 681818,1818 \frac{\text{Kcal}}{\text{hora}}$$

$$\text{Calor necesario} = \text{Necesidades de calor} - \text{Perdidas de calor}$$

$$= 681818,1818 \frac{\text{Kcal}}{\text{hora}} - 673779 \frac{\text{Kcal}}{\text{hora}} = 8039,181818 \frac{\text{Kcal}}{\text{hora}}$$

$$\text{Calor necesario} = Q * \Delta T * PCI$$

$$T^\circ \text{ mezcla} = \frac{8039,181818 \frac{\text{kcal}}{\text{hora}}}{726 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} + 35 = 34.7 \text{ C}^\circ$$

$$T^\circ \text{ mezcla} = \frac{Q_{\text{hidrol}} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 24 \text{ h} * 90 \text{ C}^\circ + 216 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 16,7 \text{ C}^\circ + 70,27 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 16,7 \text{ C}^\circ}{Q_{\text{hidrol}} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 24 + 216 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} + 70,27 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}$$

$$Q_{\text{hidrolizado}} = 6.89 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Según los cálculos realizados, este sería el caudal de fango hidrolizado que permitiría la transferencia de calor suficiente como para que el circuito de camisas fuera suficiente para transferir el calor restante de las necesidades de calor que presente a la entrada del digestor en el periodo de Invierno. Este valor de hidrolizado no dista mucho de la producción actual, con lo que conseguir este objetivo es muy probable a conseguir en el futuro próximo

22. Simulación de la HT en Pinedo II

Como hemos podido observar a lo largo de la realización del estudio la HT es una tecnología que tiene muchas implicaciones asociadas a su funcionamiento. Por ello, resulta interesante tener un modelo simulado que permita integrar la HT, ya que nos permitiría evaluar este aspecto de su operatividad. Para ello, contaremos con el apoyo del programa de simulación DESASS

DESASS es un programa creado para el diseño y simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas. DESASS trabaja en un entorno intuitivo y permite evaluar esquemas completos de tratamiento de aguas residuales, tanto en la línea de agua como en la de fangos, pudiéndose representar desde sistemas tan sencillos como sistemas de fangos activados para la

eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo hasta plantas completas que incluyan digestores anaerobios, reactores de membrana, etc. Por ello, obtener modelos simulados de una depuradora permite obtener una visión completa del conjunto de procesos que tienen lugar que cumpla la función de una herramienta de control eficiente.

DESASS tiene implementado el modelo de eliminación biológica de nutrientes nº 1 (Biological Nutrient Renoval Model, No.1, BNRM1; Seco et al., 2004). La filosofía con la que se ha desarrollado este modelo consiste en la utilización de un único modelo para representar los procesos físicos, químicos y biológicos más importantes que tienen lugar en las estaciones depuradoras. Por lo tanto, el modelo BNRM1 ampliado puede utilizarse para diseñar y simular todas las operaciones básicas de una EDAR, permitiendo tener en cuenta los efectos combinados de los diferentes procesos de tratamiento. De esta forma el funcionamiento global de la EDAR puede ser optimizado

Con respecto a nuestro caso de estudio, DESASS trabaja con una serie de elementos y equipos presentes en una depuradora convencional en el que no se ha contemplado la HT ni ninguna técnica de pretratamiento conocida. Por ello, para simular la hidrólisis térmica se deberá buscar alguna alternativa que permita obtener los resultados conseguidos por la HT de Pinedo II de una forma aproximada. El modelo biológico con el que trabaja DESASS incluye las reacciones y ecuaciones cinéticas que representan las diferentes fases de la digestión anaerobia. Por ello, centraremos nuestro foco de atención en la cinética de la fase limitante o hidrolítica de la digestión modificando los diferentes parámetros cinéticos de la su ecuación cinética hasta conseguir los resultados deseados.

La siguiente ecuación representa la ecuación cinética de la hidrólisis según el modelo biológico integrado en nuestra herramienta de simulación:

$$Ec. Hidrólisis = K_h * I_{O_2} * I_{NO_3} * \frac{X_S/X_{ACID}}{K_X + X_S/X_{ACID}} * I_{PH} * X_{ACID}$$

X_S : Materia orgánica difícilmente biodegradable

X_{ACID} : Bacterias acidogénicas

K_h : Tasa máxima específica de hidrólisis

I_{NO_3} : Constante de semisaturación de nitrato

I_{O_2} : Constante de inhibición por oxígeno

I_{PH} : Constante de inhibición por pH

K_X : Constante de hidrólisis del sustrato lentamente biodegradable

Nuestro objetivo será encontrar una combinación de valores para las constantes cinéticas de esta ecuación que permita aumentar la cinética de la reacción y por tanto, acelerando la fase hidrolítica. Observando dicha formulación, buscaremos aumentar el valor de K_h y disminuir el de K_X , hasta conseguir unos resultados en la producción de biogás que simulen la puesta en marcha de la HT de Pinedo II.

Los valores a escoger tendrán que conseguir un aumento en la producción de biogás de aproximadamente un 20-35 %, tal y como se ha observado en el estudio previo de datos de funcionamiento. Esta modificación en la cinética queda expuesta en la Tabla 18, en la que se observan los nuevos valores escogidos para los parámetros modificados.

En la Figura 42 se expone el esquema general de la depuradora de Pinedo II, tanto la línea de aguas como de fangos. Como se puede observar, no se puede diferenciar una digestión diferenciada entre fango flotado y espesado, por lo que la simulación de la hidrólisis se realizará con el esquema expuesto, es decir, asumiendo que la mezcla de fangos entra a esta supuesta digestión anaerobia con hidrólisis mejorada. No obstante, se ha expuesto en el estudio bibliográfico previo que el fango primario no se ve tan impactado por una fase de pretratamiento como el secundario, debido a su inherente biodegradabilidad.

Los resultados obtenidos tras modificar los parámetros cinéticos anotados se pueden ver en la Tabla 18 correspondiente. En dicha tabla se ha evaluado la implicación derivada de dicha modificación, cuantificando los índices de rendimiento de la hidrólisis térmica. Se ha evaluado la producción de biogás, el porcentaje de metano, la reducción de sólidos totales y volátiles y el volumen del digestato final producido. Como se puede observar, el mayor beneficio obtenido de esta modificación ha sido la producción de biogás, que ha incrementado un 12,05 %. Otro de los aspectos interesantes de esta simulación era observar la implicación del escurrido recirculado a cabecera. No obstante, la simulación no representa ningún cambio apreciable en la concentración de nutrientes con lo que su repercusión es nula.

No se ha observado ningún otro beneficio tras la modificación de la cinética de hidrólisis que este relacionado con las ventajas que otorga el funcionamiento de una HT.

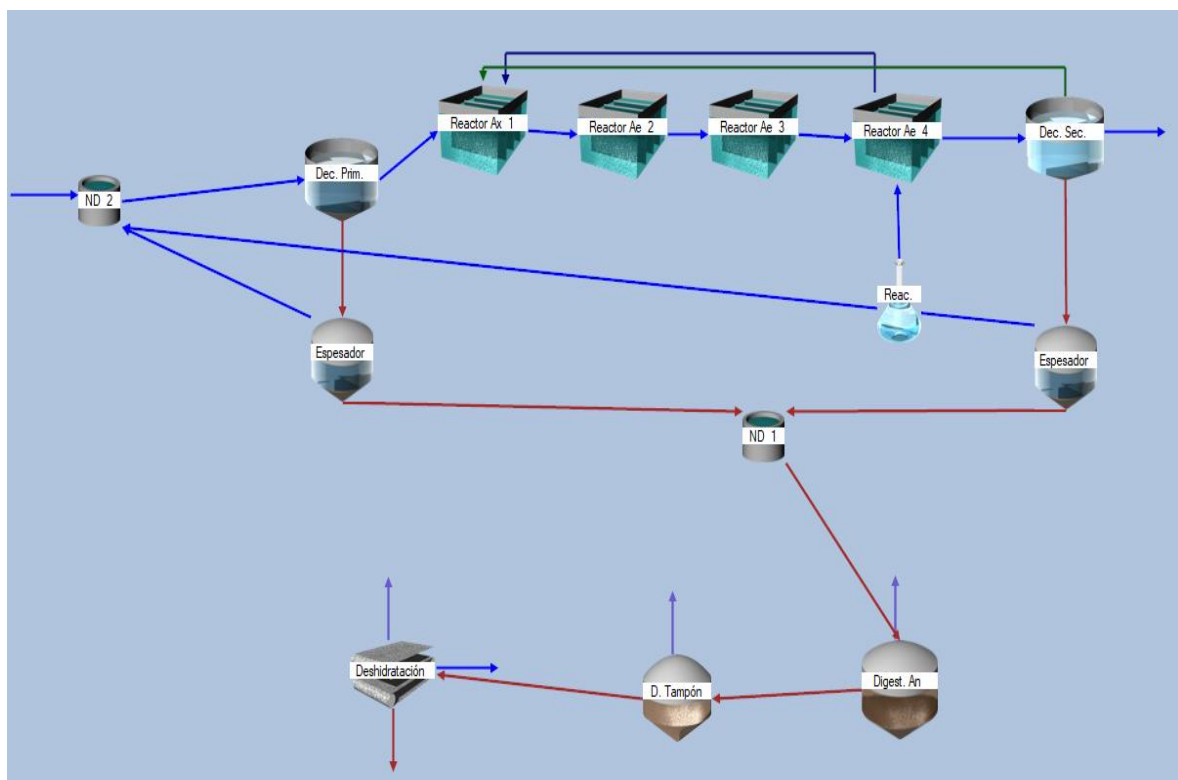


Figura 42. Esquema de la EDAR Pinedo II en DESASS

Simulación	K_h	K_x
Caso base	43	150
Con HT	200	10

Tabla 17. Resultados de la simulación con DESASS

Simulación	Prod.Biogás (m3/día)	STR (%)	SVR (%)	Vol.Digestato (ton/día)	NH4+ (mg/L)
Caso base	11771	20,28	40,74	31280	1154
Con HT	13190	22,31%	42,14	30914	1193

Tabla 18. Resultados de la simulación con DESASS

23. Línea de futura investigación

Tras la realización del presente estudio hay ciertas reflexiones que se pueden sacar con respecto a su realización. El análisis realizado con respecto a los datos de funcionamiento de la planta ha resultado afectado negativamente por el rango temporal de funcionamiento de la HT que se ha utilizado. Esos 6 primeros meses de funcionamiento de la HT, no resultan muy representativos de la situación actual de la planta, ya que aún se contaba con una clara falta de experiencia operativa (como suele ocurrir con la puesta en marcha de este tipo de instalaciones). Por ello, el estudio hubiera sido mas completo y fehaciente si se hubieran contado con datos de funcionamiento hasta la actualidad de la HT de Pinedo II.

Se debe comentar que el análisis del funcionamiento y rendimiento de la HT demanda una gran cantidad de datos de numerosas variables de control. Por ello, se ha echado en falta datos sobre algunas variables que afectan al rendimiento de la digestión anaerobia, como la DQO de los fangos producidos. Este dato hubiera sido clave para demostrar que realmente la HT mejora la biodegradabilidad del fango.

Una línea de futuro estudio que se abre resultaría en un trabajo similar al realizado, pero en un contexto completamente diferente: Una HT funcionando a su capacidad de diseño basada en una autosuficiencia energética completa. En este contexto, un estudio de estas características hubiera demostrado el potencial real que tiene la implementación de este pretratamiento, el cual previsiblemente parece muy positivo en unos años si se sigue una buena dinámica.

Otro aspecto que se hubiera podido mejorar es el apartado relativo a la simulación de la HT, cuyos resultados no han sido muy positivos. Este problema no ha podido ser abordado ya que el propio software de simulación está limitado y no cuenta con un elemento que simule el comportamiento de un pretratamiento. En un futuro sería valorable conseguir incluir elementos que simulen este tipo de procesos.

Si ponemos la vista en el futuro próximo es posible que las administraciones exijan la higienización del 100% del fango que se disponga sobre suelo agrario, y por tanto del 100% del fango producido en Pinedo. Esta situación en nuestro caso de estudio es realmente compleja, ya que se debería de higienizar los fangos producidos en Pinedo I.

Esto conllevaría llevar los fangos de Pinedo II y I a HT, ya que en la teoría sería el elemento que nos permitiría higienizar el fango que se alimenta a la instalación. Según el tipo de actuación a realizar y la configuración que se quiera seguir se pueden plantear diferentes alternativas.

No obstante, la HT de Pinedo II no está diseñada para poder funcionar correctamente en este escenario, ya que la cantidad a alimentar excede por completo la capacidad de la instalación. En este sentido, un escenario posible sería cambiar la configuración actual de la HT: de un pretratamiento a una HT intermedia. Esto puede llegar a ser posible debido al gran volumen de digestión disponible en Pinedo II.

A su vez, este escenario abre la posibilidad de hibridar esta configuración de HT intermedia con una post-digestión termófila. De esta forma se permite mejorar sustancialmente la eficiencia de la valorización energética de los residuos, así como obtener un producto final higienizado que cumpla con los requerimientos legislativos para su valorización agronómica. En este caso, se requeriría de un trabajo de investigación y desarrollo previo de una complejidad elevada, con el fin de optimizar el modo de operación a adoptar y la obtención de los objetivos marcados.

24. Conclusiones y reflexiones del estudio

El estudio realizado nos ha dejado ciertas conclusiones acerca del estado actual de la hidrólisis térmica en la depuradora de Pinedo II:

- La hidrólisis térmica es una tecnología de pretratamiento de fangos que otorga una serie de ventajas en la valorización energética de fangos de las depuradoras. En este estudio se ha evaluado el rendimiento de esta instalación valorando y cuantificando los beneficios recibidos.
- El análisis de datos de funcionamiento confirma el aumento en la producción de biogás esperada certificando los resultados obtenidos en los ensayos BMP's realizados, correspondiendo con un aumento del 28,9 % en la producción de biogás. A su vez esto ha conllevado una mayor eliminación de volátiles, del 48% y un aumento de la carga orgánica y de la productividad de los digestores. Por ello, se concluye que la hidrólisis térmica es una herramienta que mejora relevantemente el rendimiento de los digestores en varios aspectos.
- Por otra parte, según la empresa de esta tecnología comercial de hidrólisis térmica su implementación conllevaría grandes mejoras en post-deshidratación, disminuyendo el volumen de biosólido y el consumo de polielectrolito. Esto no ha ocurrido en Pinedo II: no se ha apreciado una reducción del volumen de biosólido y el consumo no solo no se ha reducido, sino que ha aumentado por el consumo añadido en las centrifugas de pre-deshidratación de la HT.
- El balance energético de la hidrólisis térmica ha resultado bastante favorable. Teniendo en cuenta el coste asociado de su funcionamiento (bombeos, centrífugas y agitación de reactores y mezclador) se ha producido un ahorro de energía del 21%
- No obstante, la hidrólisis térmica no ha producido el ahorro económico esperado en el periodo de estudios escogido. En dicho periodo la HT ha derivado en un ahorro de 3000 euros/mes. Esto es debido a que conlleva un coste de mantenimiento muy alto, de 7125 euros cada mes. No obstante, la evolución en el rendimiento de la HT en estos aspectos en los últimos meses es realmente positiva. Por ello, al plantear un balance económico en el que se tomen de referencia la producción de energía y gastos asociado, y un coste de

mantenimiento más razonable para una instalación con un buen funcionamiento, se obtiene un ahorro mensual de 28610 euros.

- Además, se ha realizado un balance de calor al digestor para evaluar cómo influye la HT sobre el calentamiento del mismo. Se ha concluido que aumentando ligeramente la producción de fangos hidrolizados se produciría una transferencia de temperatura al fango mezcla que permitiría alcanzar la temperatura óptima de digestión (35 C°) con el aporte único del agua caliente que proviene del circuito de camisas de los motores en funcionamiento. Esto conllevaría un ahorro energético superior, ya que el biogás podría ser utilizado completamente en codigestión.
- Se ha realizado un intento de simulación de la HT en un modelo simulado de Pinedo II, dentro de las limitaciones que presenta la herramienta de simulación utilizada para plantear este escenario. La modificación de parámetros cinéticos de la fase hidrolítica no resulta suficiente como para que la simulación sea representativa.
- Se ha anotado la necesidad próxima de modificar la configuración actual de HT como pretratamiento con el fin de conseguir los objetivos de higienización que se demanden.

24. Referencias

- Pallavi Gahlot, Gowtham Balasundaram, Vinay Kumar Tyagi, A.E. Atabani, Surinder Suthar, A.A. Kazmi, Libor Štěpanec, Dagmar Juchelková, Arvind Kumar, Principles and potential of thermal hydrolysis of sewage sludge to enhance anaerobic digestion, *Environmental Research*, Volume 214, Part 2, 2022.
- Pérez-Elvira, S. I., Fernández-Polanco, F., Fernández-Polanco, M., Rodríguez, P., & Rouge, P. (2008). Hydrothermal multivariable approach: Full-scale feasibility study. *Electronic Journal of Biotechnology*, 11(4), 7-8.
- Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D. J., Delgenes, J. P., Steyer, J. P., & Ferrer, I. (2010). Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. *Journal of hazardous materials*, 183(1-3), 1-15.
- Zhang, H., Lu, X., Song, L., & Zhang, L. (2018). Effects of loosely bound EPS release and floc reconstruction on sludge dewaterability. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, 1-10.
- Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y., & Li, Y. Y. (2017). Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 559-577.
- Fernández-Polanco, D., Aagesen, E., Fdz-Polanco, M., & Pérez-Elvira, S. I. (2021). Comparative analysis of the thermal hydrolysis integration within WWTPs as a pre-, inter-or post-treatment for anaerobic digestion of sludge. *Energy*, 223, 120041.
- Liao, X., Li, H., Zhang, Y., Liu, C., & Chen, Q. (2016). Accelerated high-solids anaerobic digestion of sewage sludge using low-temperature thermal pretreatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 106, 141-149.
- Muñoz Cruz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales.
- O. Nowak, P. Enderle, P. Varbanov, Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: lessons learned from Austrian applications, *J. Clean. Prod.* 88 (2015) 125–131
- Wilson, C. A., & Novak, J. T. (2009). Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment. *Water research*, 43(18), 4489-4498.
- Liu, X., Wang, W., Gao, X., Zhou, Y., & Shen, R. (2012). Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste. *Waste Management*, 32(2), 249-255.
- Higgins, M. J., Beightol, S., Mandahar, U., Suzuki, R., Xiao, S., Lu, H. W., ... & Murthy, S. N. (2017). Pretreatment of a primary and secondary sludge blend at different thermal hydrolysis temperatures: Impacts on anaerobic digestion, dewatering and filtrate characteristics. *Water research*, 122, 557-569.
- Barber, W. P. F., Lancaster, R., & Kleiven, H. (2012). Thermal hydrolysis: the missing ingredient for better biosolids. *WaterWorld*, West Chester, PA, 4.
- Alfaro, N., Cano, R., & Fdz-Polanco, F. (2014). Effect of thermal hydrolysis and ultrasounds pretreatments on foaming in anaerobic digesters. *Bioresource technology*, 170, 477-482.
- Tampio, E., Ervasti, S., Paavola, T., Heaven, S., Banks, C., & Rintala, J. (2014). Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste. *Waste management*, 34(2), 370-377.

- Ngo, P. L., Udugama, I. A., Gernaey, K. V., Young, B. R., & Baroutian, S. (2021). Mechanisms, status, and challenges of thermal hydrolysis and advanced thermal hydrolysis processes in sewage sludge treatment. *Chemosphere*, 281, 130890.
- Pilli S, Yan S, Tyagi RD, Surampalli RY. Thermal pretreatment of sewage sludge to enhance anaerobic digestion: a review. *Crit Rev Environ Sci Technol* 2015;45:669e702
- Rus E, Mills N, Shana A, Perrault A, Fountain P, Thorpe RB, Ouki S, Nilsen PJ. The intermediate thermal hydrolysis process: results from pilot testing and techno-economic assessment. *Water Pract Technol* 2017;12(2):406e22.
- Ortega-Martinez E, Sapkaite I, Fdz-Polanco F, Donoso-Bravo A. From pretreatment toward inter-treatment. Getting some clues from sewage sludge biomethanation. *Bioresour Technol* 2016;212:227e35
- Gu, Z., Li, Y., Yang, Y., Xia, S., Hermanowicz, S. W., & Alvarez-Cohen, L. (2018). Inhibition of anammox by sludge thermal hydrolysis and metagenomic insights. *Bioresource technology*, 270, 46-54.
- Dwyer, J., Starrenburg, D., Tait, S., Barr, K., Batstone, D. J., & Lant, P. (2008). Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability. *Water research*, 42(18), 4699-4709.
- Menzel, T., Neubauer, P., & Junne, S. (2020). Role of microbial hydrolysis in anaerobic digestion. *Energies*, 13(21), 5555.
- Ellis, G. P. (1959). The maillard reaction. In *Advances in carbohydrate chemistry* (Vol. 14, pp. 63-134). Academic Press.
- Echavarría, A.P.; Pagán, J.; Ibarz, A. Melanoidins Formed by Maillard Reaction in Food and Their Biological Activity. *Food Eng. Rev.* 2012, 4, 203–223
- Zhang, D.; Feng, Y.; Huang, H.; Khunjar, W.; Wang, Z.W. Recalcitrant dissolved organic nitrogen formation in thermal hydrolysis pretreatment of municipal sludge. *Environ. Int.* 2020, 138, 105629
- Verma, R.; Kundu, L.M.; Pandey, L.M. Enhanced melanoidin removal by amine-modified *Phyllanthus emblica* leaf powder. *Bioresour. Technol.* 2021, 339, 125572
- Roslyakov, Y. F., Pochitskaya, I. M., Litvyak, V. V., & Kuryanovich, A. N. (2017). Modeling of the in vitro melanoid formation reaction on the interaction of protein hydrolysate of chicken egg and glucose. *Voprosy Pitaniia*, 86(3), 92-100.
- Rodríguez-Abalde, Á., Fernández, B., Silvestre, G., & Flotats, X. (2011). Effects of thermal pre-treatments on solid slaughterhouse waste methane potential. *Waste Management*, 31(7), 1488-1493.
- Yang, N., Yang, S., & Zheng, X. (2022). Inhibition of Maillard reaction during alkaline thermal hydrolysis of sludge. *Science of The Total Environment*, 814, 152497.
- Wang, Z. (2011). Reaction mechanisms of hydrothermal liquefaction of model compounds and biowaste feedstocks. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Nazari, L., Yuan, Z., Santoro, D., Sarathy, S., Ho, D., Batstone, D., Xu, C.C., Ray, M.B.: Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation. *Water Res.* 113, 111–123 (2017)

- Kor-Bicakci, G., Eskicioglu, C.: Recent developments on thermal municipal sludge pretreatment technologies for enhanced anaerobic digestion. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 110, 423– 443 (2019)
- Panter, K., THP Consultant Cambi, Fountain, P., Shana, A.: Sludge process specialists, Thames Water UK: the Effects of thermal hydrolysis, hydraulic retention time and ammonia concentration on digestion rates and dewatering across digestion sites in Thames Water UK. In: WEF/IWA Residuals and Biosolids Conference 2019 (2019)
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource technology*, 99(10), 4044-4064.
- Yan, Y., Chen, H., Xu, W., He, Q., & Zhou, Q. (2013). Enhancement of biochemical methane potential from excess sludge with low organic content by mild thermal pretreatment. *Biochemical engineering journal*, 70, 127-134.
- Thompson, T. M., Young, B. R., & Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from caribbean pelagic Sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere*, 275, 130035.
- Baek, G., Kim, J., Kim, J., & Lee, C. (2018). Role and potential of direct interspecies electron transfer in anaerobic digestion. *Energies*, 11(1), 107.
- Jeong, S. Y., Chang, S. W., Ngo, H. H., Guo, W., Nghiem, L. D., Banu, J. R., ... & Nguyen, D. D. (2019). Influence of thermal hydrolysis pretreatment on physicochemical properties and anaerobic biodegradability of waste activated sludge with different solids content. *Waste Management*, 85, 214-221.
- Wagner, A. O., Malin, C., Lins, P., & Illmer, P. (2011). Effects of various fatty acid amendments on a microbial digester community in batch culture. *Waste Management*, 31(3), 431-437.
- Mamimin, C., Prasertsan, P., Kongjan, P., & Sompong, O. (2017). Effects of volatile fatty acids in biohydrogen effluent on biohythane production from palm oil mill effluent under thermophilic condition. *Electronic Journal of Biotechnology*, 29, 78-85.
- Penaud, V., Delgenès, J. P., & Moletta, R. (2000). Influence of thermochemical pretreatment conditions on solubilization and anaerobic biodegradability of a microbial biomass. *Environmental technology*, 21(1), 87-96.
- Aboulfoth, A. M., El Gohary, E. H., & El Monayeri, O. D. (2015). Effect of thermal pretreatment on the solubilization of organic matters in a mixture of primary and waste activated sludge. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 9(1), 82-88.
- Phothilangka, P., Schoen, M. A., & Wett, B. (2008). Benefits and drawbacks of thermal pre-hydrolysis for operational performance of wastewater treatment plants. *Water science and technology*, 58(8), 1547-1553.
- Xu, C. C., & Lancaster, J. (2009). Treatment of secondary sludge for energy recovery. *Energy Recover. Nov. Sci. Publ. Inc., New.*
- Fernández-Polanco, D., Aagesen, E., Fdz-Polanco, M., & Pérez-Elvira, S. I. (2021). Comparative analysis of the thermal hydrolysis integration within WWTPs as a pre-, inter-or post-treatment for anaerobic digestion of sludge. *Energy*, 223, 120041.
- Gonzalez, A., Hendriks, A.T.W.M., van Lier, J.B., de Kreuk, M.: Pre-treatments to enhance the biodegradability of waste activated sludge: elucidating the rate limiting step. *Biotechnol. Adv.* 36, 1434–1469 (2018).

- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6(03), 205-212.
- Neyens, E., Baeyens, J.: A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *J. Hazard. Mater.* 98, 51–67 (2003)
- Wett, B., Takács, I., Batstone, D., Wilson, C., Murthy, S.: Anaerobic model for high-solids or high-temperature digestion—additional pathway of acetate oxidation. *Water Sci. Technol.* 69, 1634–1640 (2014)
- Wang, Q., Wei, W., Gong, Y., Yu, Q., Li, Q., Sun, J., & Yuan, Z. (2017). Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: State of the art. *Science of the Total Environment*, 587, 510-521.
- Donoso-Bravo, A., Pérez-Elvira, S., Aymerich, E., Fdz-Polanco, F.: Assessment of the influence of thermal pre-treatment time on the macromolecular composition and anaerobic biodegradability of sewage sludge. *Bioresour. Technol.* 102, 660–666 (2011)
- Dwyer, J., Starrenburg, D., Tait, S., Barr, K., Batstone, D.J., Lant, P.: Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability. *Water Res.* 42, 4699–4709 (2008).
- Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenès, J.P., Steyer, J.P., Ferrer, I.: Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. *J. Hazard. Mater.* 183, 1–15 (2010)
- Ngwenya, Z., Beightol, S., NgoneOo, T., Vega, J., Pathak, B., Al-Omari, A., Zhu, K., Wadhawan, T., Murthy, S.N., Higgins, M.J.: A stoichiometric approach to control digester chemistry and ammonia inhibition in anaerobic digestion with thermal hydrolysis pretreatment model development. In: *WEF Residuals & Biosolids 2015*. Water & Environment Federation, Washington D.C. (2015)
- Kor-Bicakci, G.; Eskicioglu, C. Recent developments on thermal municipal sludge pretreatment technologies for enhanced anaerobic digestion. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 110, 423–443
- Manara, P.; Zabaniotou, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16, 2566–2582
- Mitraka G-C, Kontogiannopoulos KN, Batsioulas M, Baniyas GF, Zouboulis AI, Kougias PG. A Comprehensive Review on Pretreatment Methods for Enhanced Biogas Production from Sewage Sludge. *Energies*. 2022; 15(18):6536. <https://doi.org/10.3390/en15186536>
- Barber, W.P.F.: Thermal hydrolysis for sewage treatment: a critical review. *Water Res.* 104, 53–71 (2016)
- Fdz-Polanco, F., Velazquez, R., Perez-Elvira, S.I., Casas, C., del Barrio, D., Cantero, F.J., Fdz-Polanco, M., Rodriguez, P., Panizo, L., Serrat, J., Rouge, P.: Continuous thermal hydrolysis and energy integration in sludge anaerobic digestion plants. *Water Sci. Technol.* 57, 1221–1226 (2008)
- Xu, Y.; Lu, Y.; Zheng, L.; Wang, Z.; Dai, X. Perspective on enhancing the anaerobic digestion of waste activated sludge. *J. Hazard Mater.* 2020, 389, 121847.
- Neyens, E., Baeyens, J., Dewil, R., De Heyder, B.: Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering. *J. Hazard. Mater.* 106, 83–92 (2004)

- Gu, Z., Li, Y., Yang, Y., Xia, S., Hermanowicz, S.W., AlvarezCohen, L.: Inhibition of anammox by sludge thermal hydrolysis and metagenomic insights. *Bioresour. Technol.* 270, 46–54 (2018)
- Ahuja, N.: Impact of operating conditions on thermal hydrolysis pre-treated digestion return liquor. *Proc. Water Environ. Fed.* 2015(10), 76–89 (2015)
- Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2224.
- Wilson, C.A., Tanneru, C.T., Banjade, S., Murthy, S.N., Novak, J.T.: Anaerobic digestion of raw and thermally hydrolyzed wastewater solids under various operational conditions. *Water Environ. Res.* 83, 815–825 (2011)
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and sustainable energy reviews*, 45, 540–555.
- Li, J., Tang, W. Z., & Gu, L. (2023). Energy efficiency assessment of China wastewater treatment plants by unit energy consumption per kg COD removed. *Environmental Technology*, 44(2), 278–292.
- Silvestre, G., Rodríguez-Abalde, A., Fernández, B., Flotats, X., & Bonmatí, A. (2011). Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste. *Bioresource technology*, 102(13), 6830–6836.
- Chiaivola, A.; D’Amato, E.; Boni, M.R. Effects of low-dosage ozone pre-treatment on the anaerobic digestion of secondary and mixed sludge. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2019, 26, 35957–35967.
- Aramyan, S.M. Advances in Fenton and Fenton Based Oxidation Processes for Industrial Effluent Contaminants Control-A Review. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Resour.* 2017, 2, 1–4.
- Zhang, M.H.; Dong, H.; Zhao, L.; Wang, D.X.; Meng, D. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Sci. Total Environ.* 2019, 670, 110–121.
- Delmas, H.; Le, N.T.; Barthe, L.; Julcour-Lebigue, C. Optimization of hydrostatic pressure at varied sonication conditions–power density, intensity, very low frequency–for isothermal ultrasonic sludge treatment. *Ultrason SonoChem.* 2015, 25, 51–59.
- Zhang, Y.; Zhang, P.; Guo, J.; Ma, W.; Fang, W.; Ma, B.; Xu, X. Sewage sludge solubilization by high-pressure homogenization. *Water Sci. Technol.* 2013, 67, 2399–2405
- Long, J.H.; Bullard, C.M. Waste Activated Sludge Pretreatment to Boost Volatile Solids Reduction and Digester Gas Production: Market and Technology Assessment; Water Environment Federation: Alexandria, WV, USA, 2014.