

Optimización de la eficiencia energética y producción de biogás: EXELYS™ proceso de hidrólisis térmica en continuo

Nicholas Gurieff*, Søren Højsgaard**, Bente Nielsen***, ****Juan Carlos Rodrigo

* Veolia Water Technologies – Krüger A/S, Gladsaxevej 363, Soeborg 2860 Denmark. ncg@kruger.dk

** Veolia Water Technologies – Krüger A/S, Gladsaxevej 363, Soeborg 2860 Denmark. sjh@kruger.dk

*** Veolia Water Technologies – Krüger A/S, Gladsaxevej 363, Soeborg 2860 Denmark. ben@kruger.dk

**** Veolia Water Technologies – Ibérica. C/ Electrodo 52, P.I. Santa Ana. 28522 Madrid. Juanc.rodrigo@veolia.com

RESUMEN. Los biosólidos son la fuente de energía potencial más grande de una planta de tratamiento de aguas residuales, y por lo tanto deben ser utilizados con la mayor eficacia y eficiencia posibles. La digestión anaerobia es considerada en la actualidad como el mejor sistema de producción de biogás, con la hidrólisis térmica de fangos como el pretratamiento más eficaz reconocido. Sin embargo, los sistemas tradicionales de hidrólisis térmica en discontinuo requieren altas inversiones, tanto en términos de energía como de capital. Para superar estas deficiencias se ha desarrollado un sistema de hidrólisis térmica en continuo, EXELYS™, manteniendo un alto nivel de eficacia. EXELYS™ ha sido sometido a pruebas piloto tanto en Dinamarca como en Francia y actualmente este proceso cuenta con referencias en la biorrefinería de Billund, Dinamarca, y en Marquette-Lez-Lille (Francia). En este artículo se muestran los resultados obtenidos en ambas instalaciones. Los resultados indican que EXELYS™ es tan eficaz como la hidrólisis térmica en discontinuo con respecto a las condiciones operacionales, hidrólisis, mejora potencial de biogás producido y esterilización. Los resultados también muestran que EXELYS™ es mucho más eficiente energéticamente que los procesos discontinuos, también conocidos como procesos en *batch*. En general, los resultados indican que EXELYS™ tiene el potencial para convertirse en la piedra angular de toda instalación de tratamiento de aguas residuales con producción energética.

PALABRAS CLAVE. Hidrólisis térmica continua; digestión mejorada; eficiencia energética; exportación de energía sostenible; producción de biogás.

INTRODUCCIÓN

Al considerar las opciones disponibles para reducir el coste energético y la huella de carbono en una planta de tratamiento de aguas residuales (EDAR), los ingenieros y operadores típicamente evalúan diferentes métodos para reducir el consumo de energía así como para recuperar energía a partir de los residuos existentes. Si bien las mejoras en las tecnologías de aireación, bombeo y control de procesos son métodos eficaces para reducir el consumo de energía, la única forma en que una planta de tratamiento de aguas residuales puede producir cantidades significativas de energía renovable es utilizar la energía disponible en los biosólidos extraídos. La digestión anaerobia de los biosólidos ha sido el proceso de referencia para este propósito durante varias décadas, debido a que es un proceso relativamente simple y estable que produce gas metano (CH₄), transformando una parte significativa de la energía de los biosólidos en calor y electricidad (Jolis, 2008).

Digestión mejorada

La digestión anaeróbica sigue cuatro etapas de proceso: la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, siendo la hidrólisis el paso limitante en la reacción (Gavala et al, 2003; Pérez-Elvira et al, 2006). Mejorando el rendimiento de la etapa de hidrólisis, los sustratos sólidos son más accesibles a las bacterias anaerobias lo que acelera la digestión, aumenta el volumen de biogás producido y disminuye la cantidad de lodo a ser eliminado (Fdz-Polanco et al, 2008). Una degradación anaeróbica más rápida también puede ahorrar volumen del digestor (Phothilangka et al, 2008). La vía principal para lograr esta digestión de biogás mejorada es aplicar un proceso de pretratamiento a los fangos antes de la digestión (Fdz-Polanco et al, 2008; Pérez-Elvira et al, 2006). Se han estudiado como posibles pretratamientos para acelerar la hidrólisis de fangos tanto procesos térmicos como químicos, biológicos y mecánicos, así como combinaciones de todos ellos. (Climent et al, 2007; Kim et al, 2003; Weemaes y Verstraete, 1998). La digestión mejorada de biosólidos a través del pretratamiento es hoy día el mejor sistema para la recuperación de energía a partir de los biosólidos. Las propiedades físicas de los biosólidos sin tratar también ponen un límite práctico de aproximadamente el 5% de sólidos totales en operaciones de digestión anaerobia porque la mezcla, transferencia de calor y bombeo se vuelven ineficientes y caros con un mayor contenido de sólidos totales (Jolis, 2008). Por lo tanto un proceso de pretratamiento que permite la digestión anaeróbica con mayor contenido de sólidos totales tendría el potencial de evitar las costosas mejoras necesarias en instalaciones de digestión anaerobia que se enfrentan a problemas de capacidad, y por lo tanto, de cumplimiento (Jolis, 2008).

Hidrólisis térmica de fangos

En las últimas décadas, la hidrólisis térmica ha sido reconocida como una de las soluciones de pretratamiento más fiable y eficaz para mejorar la digestión (Pérez-Elvira et al, 2006; Phothilangka et al, 2008). En el proceso de hidrólisis térmica se aplican altas temperaturas y presiones durante un determinado período de tiempo. La hidrólisis térmica se logra generalmente cuando se aplican temperaturas de entre 140-200 °C y presiones de 6 a 25,03 bar durante al menos 30 minutos (Chauzy et al, 2005; Climent et al, 2007; Dwyer et al, 2008; Pérez-Elvira et al, 2006; Phothilangka et al, 2008). Estas condiciones de funcionamiento implican un consumo importante de energía (generalmente vapor), que debe ser sopesado constantemente con la producción mejorada de biogás debida al pretratamiento de hidrólisis térmica.

Durante este proceso, tanto las células vivas como las muertas sufren procesos de lisis y desintegración, permitiendo la liberación de materia intracelular que es entonces más accesible a los microorganismos anaerobios presentes (Climent et al, 2007). Al mismo tiempo, algunos sólidos en suspensión se solubilizan y compuestos orgánicos de cadena larga se descomponen a través de reacciones de hidrólisis (Chauzy et al, 2005).

El lodo térmicamente hidrolizado produce un producto que cumple con los requisitos de Clase A con una viscosidad muy baja (similar a la de licor mixto a una concentración de 8-10% de sólidos totales (Jolis, 2008)), y una alta concentración de DQO soluble. Estas condiciones dan lugar tras la hidrólisis térmica de los fangos a una producción de biogás significativamente mayor y a su vez menor cantidad de lodos, permitiendo ahorrar en un factor de 3 a 5 la energía necesaria para la mezcla y bombeo (Fdz-Polanco et al, 2008; Jolis, 2008). Otro resultado clave de la hidrólisis térmica es que la deshidratabilidad de la torta de lodos final mejora sensiblemente (Fdz-Polanco et al, 2008; Panter, 2009; Phothilangka et al, 2008).

Los sistemas actualmente disponibles operan en un modo discontinuo lo que conduce a la utilización ineficiente de la energía y al sobredimensionamiento del equipamiento principal (Fdz-Polanco et al, 2008). Aunque los sistemas de tratamiento en *batch* son probados y eficaces, la inversión y los costes de operación implicados han restringido su aplicación sólo a grandes instalaciones de tratamiento de aguas residuales. La hidrólisis térmica continua, potencialmente podría proporcionar ventajas al proceso para así superar las limitaciones presentes en la hidrólisis térmica por lotes. El desarrollo de un proceso de hidrólisis térmica continua más eficiente y rentable podría revolucionar la digestión mejorada de biosólidos y hacerlo más atractivo para una gama más amplia de instalaciones de tratamiento y contribuir al aumento de la producción de energía sostenible. Mientras existen algunas patentes y literatura que describen los procesos que se acercan a las condiciones de operación continua, hay en realidad poca información disponible sobre su efectividad (Fdz -Polanco et al, 2008).

Durante los últimos 3 años, Krüger A/S de Dinamarca, en colaboración con Veolia Water Solutions and Technologies en Francia, han diseñado y probado un proceso de hidrólisis térmica continua - EXELYS™. El proceso EXELYS™ ha sido probado a escala piloto y la primera referencia se encuentra actualmente en funcionamiento en Dinamarca. Este artículo presenta el sistema EXELYS™, los resultados de la prueba piloto así como de sus primeras referencias, además de aportar una comparación del proceso EXELYS™ con la digestión tradicional y la hidrólisis térmica en *batch*. El artículo también muestra el plan de desarrollo futuro del proceso.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La solución EXELYS™ (pendiente de patente) es un verdadero sistema de hidrólisis térmica continua que opera en el rango de temperatura de 140-165 °C y a presiones entre 8,96-11,25 bar (a). El proceso requiere energía, pero la mayoría proviene de la recuperación y la utilización del calor sobrante. Debido a la mayor remoción de materia orgánica en el sistema de digestión después de EXELYS™ y a las propiedades físicas únicas de los fangos hidrolizados, la deshidratabilidad del lodo final se mejora hasta en un 10% en comparación con los fangos crudos deshidratados.

El proceso EXELYS™ está bien aislado para minimizar las pérdidas de calor y por lo tanto puede funcionar con eficacia a la intemperie sin necesidad de introducirlo en un edificio, ahorrando costes de construcción civil.

El sistema de hidrólisis térmica continua EXELYS™ (como se ilustra en la Figura 1) es una manera energéticamente eficiente y rentable de maximizar la producción de biogás, además de minimizar los costes de eliminación de fangos. Debido a la naturaleza continua del proceso, se maximiza la eficacia operativa mientras se reducen al mínimo los costes operativos y de capital. Debido al diseño único del sistema EXELYS™, se simplifica el mantenimiento, minimizando el tiempo de inactividad y los costes asociados a dicha inactividad.

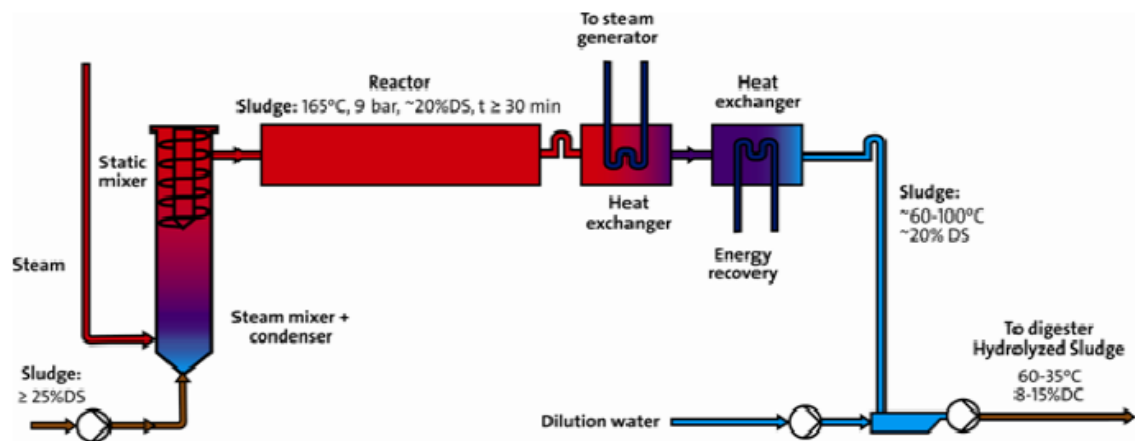


Figura 1: El sistema de hidrólisis térmica continua EXELYS™

El proceso de hidrólisis térmica del fango se lleva a cabo en el sistema EXELYS™ tal y como se ilustra en la Figura 1. Los fangos deshidratados procedentes de un silo de almacenamiento se introducen en la bomba de alimentación a EXELYS™. Esta bomba de cavidad progresiva alimenta fangos de forma continua al proceso EXELYS™. Como se ilustra en la Tabla 1, la capacidad única de EXELYS™ para hidrolizar fangos con un alto contenido en sólidos presenta una ventaja significativa sobre la hidrólisis en discontinuo tradicional. EXELYS™ puede procesar fangos con una composición de mayor contenido de sólidos en comparación con la hidrólisis térmica tradicional en *batch*, por lo que hay menos agua que calentar. Por lo tanto, en EXELYS™ se puede lograr el mismo efecto de hidrólisis con al menos un 30% menos de vapor requerido.

Tabla 1: Consumo de vapor comparativo entre la hidrólisis térmica tradicional en discontinuo y la hidrólisis térmica continua EXELYS™

		Contenido MS % peso	Temp. Entrada °C	Temp. Salida °C	Vapor² Requerido	Comparativa
Hidrólisis térmica tradicional ¹	Por lotes	16	10	165	1,865	-
Hidrólisis continua EXELYS™	Térmica	22	10	165	1,310	-30%

¹ Basado en una hidrólisis de 1000 kg de sólidos totales

² vapor saturado a 14 bar

A medida que los fangos de alto contenido en sólidos entran en el sistema, el vapor es introducido en el fango continuamente a través de una boquilla de inyección. Como esta mezcla se mueve hacia arriba en la sección del condensador de vapor, el vapor se condensa en los fangos transfiriendo energía en forma de calor a los fangos y aumentando la temperatura necesaria para que se produzca la hidrólisis. A continuación, el lodo calentado pasa a través de un mezclador estático auto-limpiable que asegura una distribución homogénea del calor a través del lodo y también captura cualquier vapor que no haya condensado anteriormente. Esto asegura que toda la energía disponible del vapor inyectado es utilizada eficazmente en EXELYS™, maximizando la eficiencia energética del proceso.

En este punto, el lodo se encuentra a la temperatura y presión de hidrólisis requerida y desemboca en la sección del reactor. El reactor es la sección de tubo más grande ilustrada en la Figura 2. En esta sección el lodo fluye a una velocidad muy baja, lo que lleva a condiciones de flujo de pistón. Esto asegura que los lodos no pueden cortocircuitar el reactor y que el lodo se expone a las condiciones de hidrólisis durante la cantidad de tiempo requerida.

Una vez que el lodo se ha retenido durante el tiempo requerido, se emplea un sistema de intercambio de calor para enfriar el lodo y recuperar la energía para otros usos. Estos se pueden ver montados por encima de la sección del reactor en la Figura 2. El tubo concéntrico utilizado en el sistema de intercambio de calor es muy eficiente y también tiene la ventaja de ser fácil de mantener y limpiar. En este sistema se puede precalentar el agua de la caldera destinada al generador de vapor junto a otras aguas de proceso que se pueden utilizar para calentar otros procesos, edificios, o incluso ser exportado a una red de calefacción urbana. El intercambiador de calor controla la temperatura de los lodos hidrolizados de modo que el producto final de EXELYS™ se puede utilizar como fuente de calor para el siguiente proceso de digestión.

Después del sistema de intercambio de calor, existe la posibilidad de inyectar aguas residuales tratadas y pasteurizadas en el lodo. Esto se puede emplear para diluir y enfriar el lodo si se requiere en el siguiente proceso de digestión, o también se puede utilizar como un sistema de seguridad, que se activa si la temperatura del lodo después del intercambiador de calor es superior a una temperatura predeterminada. Esto asegurará que la siguiente bomba de mantenimiento de presión y los digestores están protegidos contra cambios bruscos de temperatura y asegura la estabilidad del proceso y la longevidad del equipo.

La parte final del sistema de hidrólisis térmica EXELYS™ es la bomba mantenedora de presión. Esta bomba opera de tal manera que puede controlar la presión en el sistema EXELYS™. Esto garantiza un control de la presión fiable y eficaz, algo vital para el proceso de hidrólisis. La bomba de mantenimiento de la presión, en la mayoría de los casos, también puede ser utilizada para bombear los lodos hidrolizados por EXELYS™ hacia el siguiente proceso de digestión.



Figura 2: El sistema de demostración de hidrólisis térmica continua EXELYS™ instalado en Hillerød, Dinamarca. El sistema no ha sido aislado, y por lo tanto se pueden apreciar claramente las características de diseño.

EXELYS™ puede ser utilizado en diferentes configuraciones de proceso. Normalmente, se instala antes de la digestión con todos los fangos o solamente con la fracción de fangos secundaria siendo hidrolizados antes de la digestión (EXELYS™- LD). En ambos casos, la capacidad de cualquier digestor existente puede ser incrementada de manera significativa, o reducida de igual modo la inversión en nuevos digestores. Esto podría proporcionar a un operador la posibilidad de importar biosólidos a la planta, lo que aumentaría la producción de biogás y la generación de ingresos tanto por la importación de fangos como por la exportación de la energía producida.

Sin embargo, si la capacidad del digestor no es un problema, EXELYS™ puede ser incorporado en una innovadora y patentada configuración de proceso, diseñada para optimizar la generación de electricidad y su cogeneración. La configuración del proceso se llama EXELYS™- DLD y consiste en la incorporación de EXELYS™ entre dos digestores, como se muestra en la Figura 3. Después de la digestión primaria, el volumen de los fangos se reduce y se mejora su deshidratabilidad. Esto permite una unidad de EXELYS™ más pequeña en comparación con EXELYS™- DLD y una demanda de energía inferior. El lodo hidrolizado es entonces procesado por segunda vez, recuperando así el potencial de producción de biogás restante. El biogás puede utilizarse para la producción de electricidad, y el calor residual se recupera para operar el proceso EXELYS™. Con esta configuración del sistema, la capacidad de los digestores no se mejora en comparación con la digestión convencional, pero la recuperación de energía a partir de los lodos se optimiza.

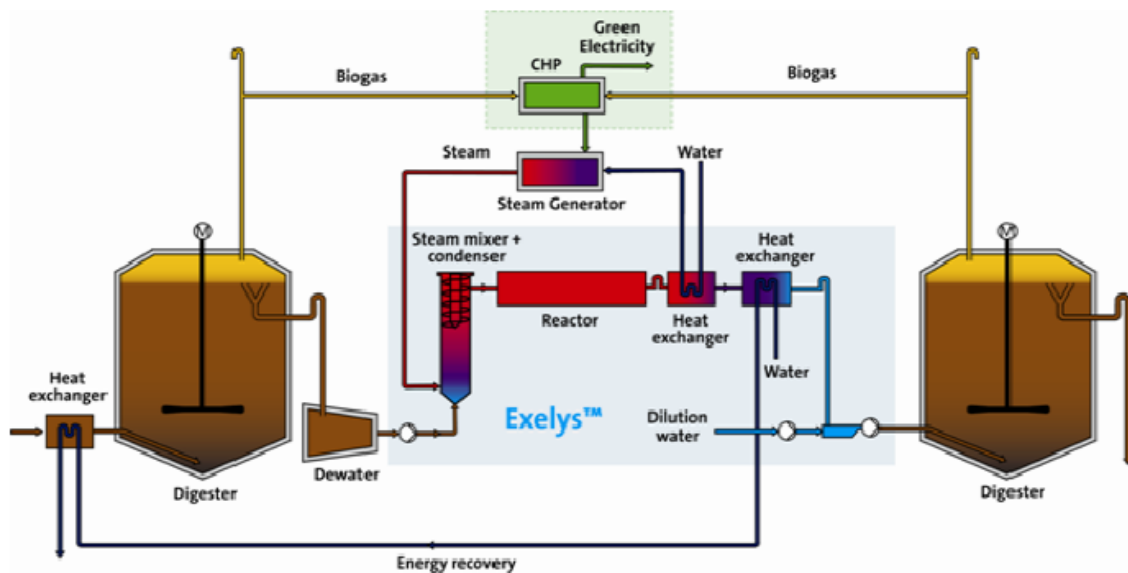


Figura 3: Un ejemplo de la configuración del proceso EXELYS™-DLD

PRIMEROS RESULTADOS Y DEBATE

Resultados de la prueba piloto

Durante un período de 9 meses en 2008-2009, se llevaron a cabo en Dinamarca pruebas piloto a escala real de EXELYS™. El sistema se instaló en el exterior y tenía una capacidad de 3.601,50 kg MS/d. El objetivo de la prueba piloto era demostrar que el concepto de diseño EXELYS™ era válido y el efecto de la hidrólisis resultante fuese comparable a la de los sistemas tradicionales de hidrólisis térmica en discontinuo.

Con el fin de considerar EXELYS™ un sistema de hidrólisis térmica viable, debe ser capaz de operar consistentemente a la temperatura, la presión y el tiempo de retención requerido. El tiempo de retención fue asegurado por el reactor de flujo de pistón controlando el caudal de lodos que llega sistema. Por tanto, el objetivo era funcionar a 165 °C y mantener una presión de 8,96 bar (a) en el reactor EXELYS™. En las figuras 4 y 5, se presentan las temperaturas y presiones de operación para la planta piloto EXELYS™. Los resultados provienen de un periodo de 12 horas dentro de una misma prueba que se prolongó durante un período total de 3 días. Las temperaturas y presiones más bajas al inicio indican la puesta en marcha del sistema EXELYS™.

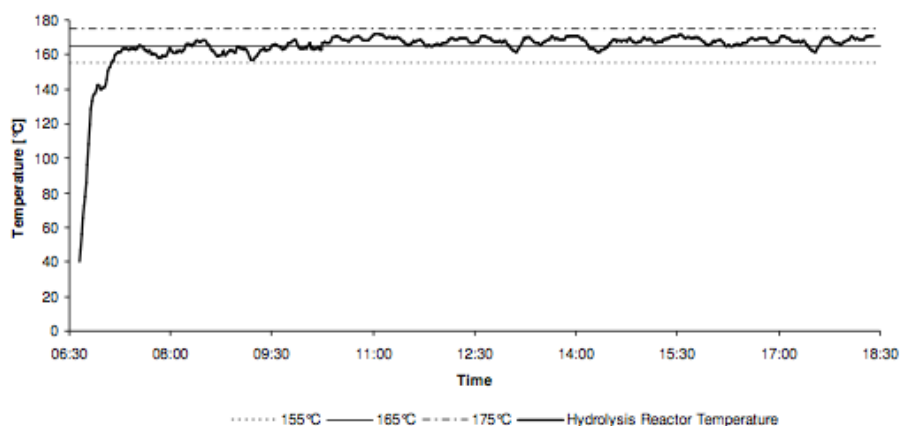


Figura 4: Temperatura de operación de la planta piloto EXELYS™ durante un período de 12h.

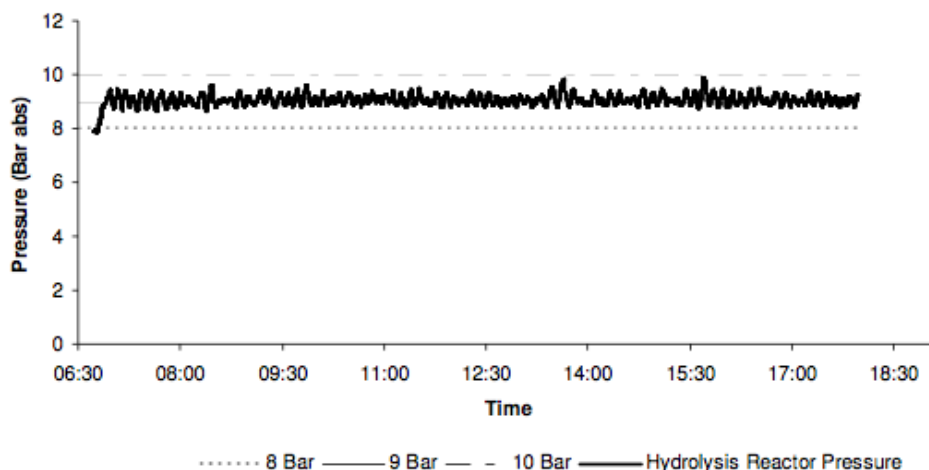


Figura 5. Presión de operación de la planta piloto EXELYS™ durante un período de 12h.

Estos resultados confirman que EXELYS™ puede alcanzar las condiciones requeridas para el proceso de hidrólisis (temperatura, presión y tiempo de retención), mientras está en operación continua. Esto se consiguió en un sistema piloto a escala real, y en consecuencia, no hay problemas de escalado a partir del piloto. Mientras que estos resultados confirman que EXELYS™ puede trabajar a las condiciones requeridas por el proceso de hidrólisis, la gran ventaja de EXELYS™ es su capacidad para alcanzar estos resultados con muchas menores necesidades de energía del vapor. En la figura 6, se muestran tanto el caudal de lodos como el de vapor para el mismo período de prueba. Los resultados indican que el caudal de vapor requerido es aproximadamente un 30% del caudal total de torta de lodos. En base al hecho de que la torta de lodos tiene un contenido en sólidos de poco más del 24% en peso, esto encaja bien con el consumo esperado de vapor. Este resultado confirma que EXELYS™ es capaz de proporcionar la hidrólisis térmica de lodos de forma efectiva y energéticamente eficiente.

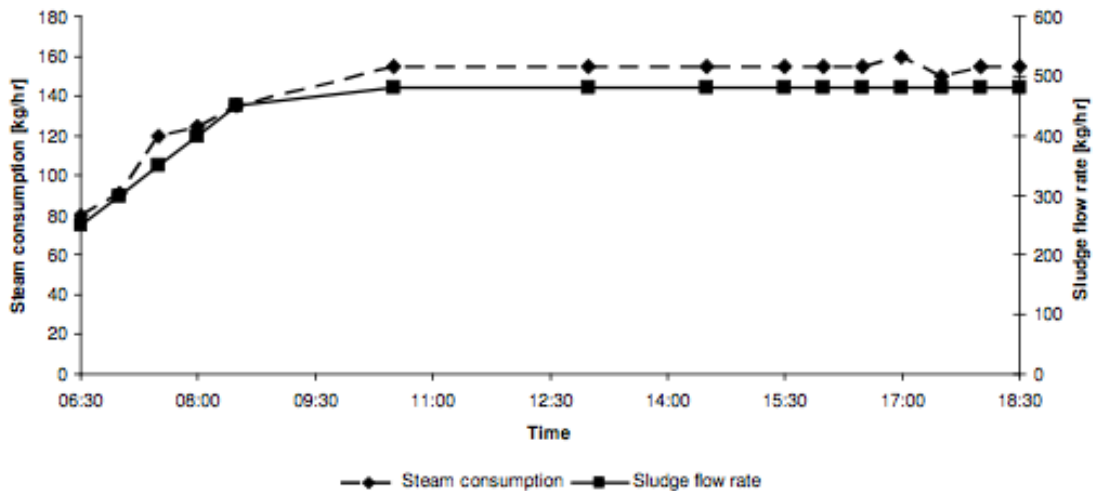


Figura 6. Consumo requerido de vapor por EXELYS™ en relación con el caudal de torta de lodos. La torta de lodos tiene un contenido total de sólidos del 24% en peso y una temperatura de 10 °C.

Aunque se ha probado que EXELYS™ puede operar bajo las mismas condiciones de hidrólisis que los sistemas de hidrólisis térmica en *batch*, aún es necesario comparar la calidad del lodo hidrolizado con aquel de los sistemas en discontinuo. Aunque EXELYS™ puede proporcionar las mismas condiciones de temperatura, presión y tiempo de retención, debido a su diseño no incluye una etapa *flash*. En el proceso de hidrólisis térmica en discontinuo, el reactor de hidrólisis es *flasheado* al final del tiempo de retención requerido (por tanto la presión se reduce repentinamente). Esto causa la generación de vapor, que se recupera para el calentamiento del siguiente lote. Se ha pensado que la etapa *flash* contribuye a la efectividad de la reacción de hidrólisis, y en consecuencia, como EXELYS™ no incluye tal etapa, podría esperarse que fuese menos efectivo.

Para probar esta hipótesis, se probó lodo de la planta piloto EXELYS™ en ambos sistemas, EXELYS™ y un sistema de hidrólisis térmica denominado BioThelys™, comparándose el impacto posteriormente. Los resultados de esta comparación se presentan en la Tabla 2. El indicador clave de la eficiencia de la hidrólisis térmica es la solubilización de la y de los SSV. Cuanto mayor es el efecto de solubilización, mayor habrá sido el efecto de hidrólisis en el sistema y mayor es el potencial de producción de biogás del producto hidrolizado. Los resultados indican que con idénticas condiciones de operación, EXELYS™ tuvo un efecto de hidrólisis mayor en el lodo que el sistema en *batch* denominado BioThelys™. Esto también indica que en el caso de hidrólisis térmica de lodos de aguas residuales secundarias, la reacción flash en los sistemas de hidrólisis térmica por lotes no tiene ningún efecto físico en los lodos, sino que solamente es útil como un modo de recuperar energía.

Tabla 2. Comparación del rendimiento del sistema de hidrólisis térmica continua EXELYS™ con el sistema de hidrólisis térmica en discontinuo BioThelys™.

	EXELYS™ 164 °C 8 bar	BioThelys™ 165 °C 8 bar
MS a la entrada (g/kg)	242	155
SSV a la entrada (g/kg)	155	101
MS a la salida (g/kg)	98	79
SSV a la salida (g/kg)	62	52
DQO a la salida (g/kg- SV entrada)	1458	1380
DQO soluble a la salida (g/kg-SV entrada)	410	400
Solubilización de DQO (%)	28	29
Solubilización de SSV (%)	31	28

Otro parámetro importante de EXELYS™ es su capacidad para esterilizar o pasteurizar los lodos. En un proceso de hidrólisis térmica por lotes, se puede asegurar la exposición a altas presiones y temperaturas durante un determinado período de tiempo. Sin embargo, en un proceso continuo, siempre existe la posibilidad de que haya organismos que puedan cortocircuitar el proceso, y por tanto permanecer después de la hidrólisis térmica. Se probaron muestras de la planta piloto EXELYS™ antes y después de la hidrólisis térmica para coliformes fecales, *Enterococos* y huevos de helmintos. En cada caso, después de la hidrólisis térmica en EXELYS™, los organismos remanentes estaban por debajo de los límites de detección, y por tanto se consiguió un registro 6 de tasa de destrucción (como se muestra en la Tabla 3). Con los huevos de helminto, no se detectaron huevos activos después de EXELYS™. Aunque se necesitan más muestras para confirmar estos resultados, las pruebas iniciales muestran que EXELYS™ es tan capaz de producir lodo de Clase A como las hidrólisis térmica en discontinuo.

Tabla 3. Análisis de destrucción de patógenos en la planta piloto EXELYS™

	Unidad	Crudo	Hidrolizado	Registro de destrucción
Coliformes termotolerantes	Unidades/100 g	2.400.000	<2	6
<i>Enterococos</i>	Unidades/g	28.000	<1	6
Huevos de helminto	Unidades/g	0,5	0	-

En vistas a confirmar la potencial producción de biogás del producto hidrolizado en EXELYS™, se realizaron pruebas del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) en dos lodos diferentes procesados en la planta piloto EXELYS™ - lodo biológico crudo y lodo biológico digerido (digestato). Como se esperaba en base a los resultados de solubilización de la DQO, los resultados del test PBM del lodo biológico indicaron hasta un 20% de mejora en la producción de biogás en comparación con un lodo no hidrolizado (Tabla 4). Esto encaja bien con el aumento del 28% de la DQO soluble producida en EXELYS™. La razón para una menor mejora en la producción de biogás es probablemente la producción de DQO soluble refractaria en el proceso de hidrólisis EXELYS™. Este es un fenómeno bien conocido en todas las reacciones de hidrólisis térmica debido principalmente a la reacción de carbohidratos y proteínas a altas temperaturas, para formar compuestos melanoidinos (Dwyer et al, 2008).

Tabla 4. Resultados de las pruebas PBM para lodos biológicos crudos y lodos digestados

Sustrato	Biogás producido <i>Nml biogas/g SV a la entrada</i>	Contenido en metano (% en volumen)	Aumento relativo en la producción de biogás
Lodo biológico	357	72%	
Lodo biológico hidrolizado 1	431	70%	18%
Lodo biológico hidrolizado 2	440	70%	20%
Lodo Digestato	149	67%	
Digestato hiroalizado 1	317	66%	107%
Digestato hidrolizado 2	324	66%	112%

La planta de tratamiento de agua donde se instaló el piloto EXELYS™ tenía en operación un digestor termofílico con un tiempo de retención de 10 días. Por tanto, el lodo digestato tenía un potencial de metano razonable en la prueba PBM. Sin embargo, las pruebas PBM del lodo digestato después de ser hidrolizado térmicamente en EXELYS™ mostraron que el potencial de metano de este lodo se podría incrementar en más de un 100%. Esta prueba se llevó a cabo cuando se estaba desarrollando la configuración del proceso EXELYS™-DLD. Estos resultados confirmaron que EXELYS™-DLD tenía un gran potencial para la mejora de digestión.

Resultados iniciales de la operación de la planta de demostración a escala real

En base a la experiencia conseguida a través de la operación de la planta piloto EXELYS™, se decidió construir una planta de demostración a escala real en la planta de tratamiento de aguas residuales de Hillerød, Dinamarca. El sitio era ideal para probar y optimizar el proceso EXELYS™- DLD que mostró su potencial en la prueba piloto de EXELYS™.

La planta de demostración EXELYS™- DLD ha estado en operación desde Octubre de 2010, y en operación completamente automática desde Diciembre de 2010. La planta de tratamiento de aguas residuales tiene una capacidad de 60.000 personas y la unidad EXELYS™ procesa entre 3.601,53 kg MS/día y 6.001,03 kg MS/día. Las instalaciones de digestión (dos digestores de 1,5 millones de litros y 923.639,96 l), antes de la instalación de EXELYS™, trabajaban a baja carga y con un gran tiempo de retención (25 días). En consecuencia, su rendimiento era bastante bueno con un 33% de destrucción de sólidos. En la tabla 5 se muestra el rendimiento del sistema de digestión antes y después de la instalación del proceso EXELYS™- DLD. Estos resultados iniciales muestran que el EXELYS™- DLD es responsable de una importante mejora de un proceso de digestión ya eficiente. El rendimiento mejorado se mantuvo en el sistema a pesar de un incremento en la carga entre Febrero y Mayo de 2011. La carga extra al sistema se debió a un aumento inesperado de la entrada de lodos a la planta después del invierno. El lodo extra que llegaba era de peor calidad con un ratio mucho menor de SV/ST (sólidos volátiles/sólidos totales) que los lodos locales. Debido al aumento de carga, el lodo entrante en el primer digestor era engrosado para mantener un tiempo de retención de 12 días en este sistema. De forma similar, el contenido en sólidos del hidrolizado con EXELYS™ también se incrementó, de modo que el tiempo de retención en el segundo digestor se pudo mantener en 15 días. La capacidad del sistema DLD para mantener una operación estable y eficiente a pesar de cambios importantes en la carga y calidad de los lodos pone de manifiesto las ventajas proporcionadas por la configuración del proceso EXELYS™- DLD. Debido al aumento de carga, el ratio de producción de biogás entre el primer y el segundo digestor ha cambiado de 2:1 a 1,5:1, mientras que la producción total de biogás se ha incrementado. Esto sugiere que se pueden optimizar las condiciones operacionales en los digestores, especialmente el tiempo de retención en el primer sistema de digestión, sin impactar en la eficiencia global y la productividad del sistema EXELYS™- DLD.

El operador ha registrado un aumento en la venta de energía a la red de calefacción urbana local y también un ahorro anual esperado de 150.000 € en los costes de eliminación de lodos (reducción del 38%).

Tabla 5. Comparación del rendimiento de la digestión antes y después de la instalación de la planta de demostración EXELYS™ en Hillerød, Dinamarca. Los resultados están normalizados para 1.000 kg de sólidos totales procesados.

	Rendimiento de antes de EXELYS™	Rendimiento de EXELYS™- DLD Febrero 2011	Rendimiento de EXELYS™- DLD Febrero 2011
Condiciones de operación	Carga media 4.500 kg-SD/día Digestión termofílica 25 días	Carga media 4.500 kg MS/d Digestor 1 termofílico 12 días Digestor 2 termofílico 15 días 30% solubilización de DQO en EXELYS™	Carga media 6.000 kg MS/día Digestor 1 termofílico 12 días Digestor 2 termofílico 15 días 27% solubilización de DQO en EXELYS™
Destrucción de MS	33%	45%	47%
Producción de biogás	290 Nm ³	360 Nm ³	375 Nm ³
Lodos eliminados	2.680 kg	1.720 kg	1.660 kg
Contenido de MS de la torta de lodos final	25%	32%	32%

Trabajos futuros

El objetivo de los futuros trabajos con EXELYS™ se ha movido ahora hacia la optimización, tanto respecto al rendimiento como respecto al diseño. Con una importancia cada vez mayor en la energía y la exportación de energía, es importante que EXELYS™ sea capaz de reciclar y utilizar tanto calor residual como sea posible. Esto puede ser para producción de vapor, precalentamiento, calentamiento de los digestores, calefacción de edificios o para exportar desde el emplazamiento y puede suponer nuevas formas de recuperación tales como usar el agua de rechazo de la etapa de deshidratación antes de EXELYS™ para precalentar los lodos crudos que entran al primer digestor. También es importante optimizar los sistemas que rodean a EXELYS™, especialmente los sistemas de digestión e integrar los procesos de tratamiento del agua de rechazo. De este modo, EXELYS™ puede jugar un papel incluso mayor en llevar los tratamientos de aguas residuales modernos a un futuro de producción sostenible de energía.

CONCLUSIONES

EXELYS™ es un desarrollo innovador para la hidrólisis térmica de fangos. Es verdaderamente un proceso continuo que es a la vez energéticamente eficiente y efectivo. EXELYS™ tiene el potencial para combinar la eficiencia energética y la digestión efectiva mejorada; por tanto, ayudando a conducir a las plantas modernas de tratamiento de aguas residuales hacia el futuro de la exportación y/o generación de energía.

Las pruebas del piloto a escala real EXELYS™ durante un período de 9 meses probaron que el concepto de hidrólisis térmica continua EXELYS™ es factible. Estos resultados indicaron que EXELYS™ era tan efectivo como el proceso de hidrólisis térmica en discontinuo, pero más eficiente. En resumen, los resultados clave de las pruebas piloto fueron:

- El diseño de proceso continuo de EXELYS™ no dificulta al proceso para alcanzar las condiciones requeridas de hidrólisis térmica aumentando de forma significativa la digestión mejorada de fangos. EXELYS™ trabaja a una temperatura de 165 °C, a una presión de 9 bar y con tiempos de retención de al menos 30 minutos.
- EXELYS™ produce un producto de hidrólisis térmica similar a los producidos con los procesos tradicionales de hidrólisis térmica en discontinuo.
- El potencial de biogás del producto de hidrólisis térmica de EXELYS™ es el esperado dado el efecto de solubilización que se alcanza.
- EXELYS™ tiene un impacto positivo muy importante en el potencial de biogás del fango digestato.
- EXELYS™ utiliza menos vapor que los procesos tradicionales de hidrólisis térmica para producir el mismo efecto. Ello se debe principalmente a su operación continua y a la capacidad de EXELYS™ para ser alimentado con lodo con un alto contenido de sólidos totales.
- La ausencia de etapa *flash* en la operación de EXELYS™ no tiene ningún impacto en la capacidad de EXELYS™ para solubilizar DQO.
- EXELYS™ da lugar a un producto de hidrólisis totalmente esterilizado.

La experiencia de las pruebas piloto a escala real de EXELYS™ ha conducido a la construcción y operación de una planta de demostración a escala real en Hillerød, Dinamarca. EXELYS™ se configuró en una configuración EXELYS™-DLD para aprovechar las ventajas de la capacidad del digestor del emplazamiento y para producir tanta energía para exportación como sea posible. Los resultados preliminares de esta planta de demostración indican que:

- La configuración del proceso EXELYS™-DLD proporciona un modo de incrementar significativamente la producción de biogás y la destrucción de lodos, incluso cuando se compara con un proceso de digestión convencional muy efectivo.
- El rendimiento mejorado de EXELYS™-DLD se ha mantenido a pesar de un aumento importante de la carga de lodos al sistema en combinación con una caída de la calidad del lodo crudo (es decir, menor ratio SV/ST).

- EXELYS™ es muy eficiente y capaz de operar en modo continuo automáticamente durante largos períodos de tiempo. El sistema de control permite al operador monitorizar y ajustar remotamente el sistema EXELYS™, reduciendo significativamente las horas de mano de obra de operación.

Los trabajos posteriores con EXELYS™ se focalizarán en la optimización del proceso, de modo que sea más eficiente. De este modo, EXELYS™ tiene el potencial de convertirse en la piedra angular de los procesos modernos de tratamiento de fangos, llevando a las plantas modernas de tratamiento de aguas residuales a convertirse en exportadoras y/o generadoras de energía sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Søren Andersen de Holbæk Forsyning y Peter Underlin de Hillerød Forsyning por su apoyo durante las fases de pilotaje y planta de demostración de este trabajo.

REFERENCIAS

- Chauzy, J.; Graja, S.; Gerardin, F.; Cretenot, D.; Patria, L.; Fernandes, P.. (2005). Minimización del exceso de producción de lodos en una EDAR mediante el acoplamiento de hidrólisis térmica y digestión anaeróbica rápida. *Water Science and Technology*, **52:10**, 255.
- Climent, M.; Ferrer, I.; del Mar Baeza, M.; Artola, A.; Vazquez, F.; Font, X.. (2007). Efectos de los pretratamientos térmicos y mecánicos de lodos secundarios en la producción de biogás bajo condiciones termofílicas. *Chemical Engineering Journal*, **133**, 335.
- Dwyer, J.; Starrenburg, D.; Tait, S.; Barr, K.; Batstone, D.; Lant, P.. (2008) Disminuir la temperatura de hidrólisis térmica de fangos activos reduce el color del producto, sin disminuir la degradabilidad. *Water Research*, **42**, 4699.
- Fdz-Polanco, F.; Velazquez, R.; Perez-Elvira, S.; Casas, C.; del Barrio, D.; Cantero, F.; Fdz-Polanco, M.; Rodriguez, P.; Panizo, L.; Serrat, J.; Rouge, P.. (2008) Integración de hidrólisis térmica continua y energía en plantas de digestión anaeróbica de fangos.. *Water Science and Technology*, **57:8**, 1221.
- Gavala, H.; Yenal, U.; Skiadas, I.; Westermann, P.; Ahring, B.. (2003) Digestión mesofílica y termofílica anaerobia de lodos primarios y secundarios. Efecto del pretratamiento a elevadas temperaturas. *Water Research*, **37**, 4561.
- Jolis, D.. (2008) Digestión anaerobia de lodos municipales con alto contenido en sólidos pretratados con hidrólisis térmica. *Water Environment Research*, **80:7**, 654.
- Kim, J.; Park, C.; Kim, T.; Lee, M.; Kim, S.; Lee, J.. (2003) Efectos de varios pretratamientos en la digestión anaerobia mejorada con lodos residuales activados. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **95**, 271.
- Panter, K.. (2009) Comparación de prensas centrífugas y de correa para lodos digeridos compresibles después de la hidrólisis térmica 14th European Biosolids and Organic Resources, Aqua Enviro Technology Transfer, Wakefield, UK.

Perez-Elvira, S.; Diez, P. and Fdz-Polanco, F.. (2006) Tecnologías de minimización de fangos. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **5**, 375.

Phothilangka, P.; Schoen, M.; Wett, B.. (2008) Ventajas e inconvenientes de la pre-hidrólisis térmica para el rendimiento operativo de las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Water Science and Technology*, **58:8**, 1547.

Weemaes, M.; Verstraete, W.. (1998) Evaluación de las técnicas actuales de desintegración de lodos húmedos. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **73**, 83.