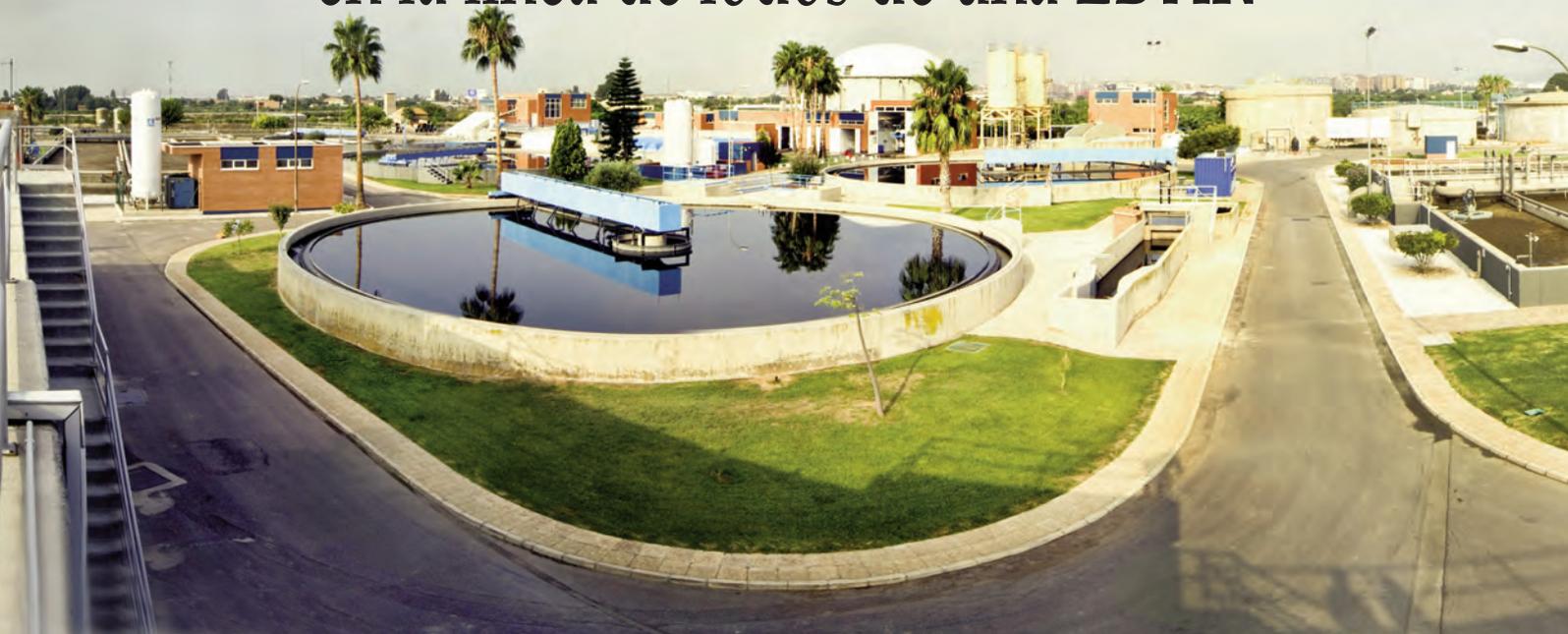


Ozono y digestión anaerobia en doble etapa en la línea de lodos de una EDAR



Conseguido el principal objetivo de una EDAR, basado en obtener la calidad de vertido, el balance energético, junto con el tratamiento y disposición final del lodo de depuradora, son actualmente los principales aspectos a mejorar desde un punto de vista de la explotación de una EDAR, ya que, a medio plazo se espera que éstas, sean instalaciones autosuficientes energéticamente. Respecto al tratamiento de lodos de depuradora, la digestión anaerobia permite la estabilización y reducción de éstos, a la vez que produce energía a partir del biogás que se genera. En los últimos años se están investigando distintos procesos con el objeto de mejorar la ratio de producción de biogás respecto a la carga de sólidos volátiles, clasificándose éstos en tres grandes grupos: pretratamientos a la digestión anaerobia, modificaciones del propio proceso de la digestión anaerobia y postratamientos del lodo digerido. Este artículo pretende describir el conjunto del Proyecto SLUDGE4ENERGY y definir las tareas a realizar durante los tres años de ejecución, así como presentar los primeros resultados obtenidos de los ensayos realizados a escala de laboratorio del efecto del ozono y del proceso de digestión anaerobia en doble etapa de temperatura (DA2T) sobre el tratamiento de lodos convencional.

Albert CANUT MONTALVÀ
Mireia FITER CIRERA
Begoña RUIZ FUERTES
Gracia SILVESTRE TORMO

Técnicos I+D

Departamento de Calidad y Medio Ambiente

AINIA CENTRO TECNOLÓGICO

Carlos FERRER TORREGROSA

Director I+D

José Guillermo BERLANGA

Técnico I+D

David CASTELL

Jefe Explotación

Vicente CABRERA

Adjunto a Jefe Explotación

Mairena GARCÍA

Jefe de Zona Explotaciones

FACSA

Nuevo sistema para mejorar la eficiencia energética de la EDAR de Castelló



Introducción

En la actualidad, el balance energético junto con el tratamiento de lodos y su disposición final son los aspectos principales de mejora en una EDAR, ya que, a medio plazo, se espera que éstas sean autosuficientes energéticamente. La digestión anaerobia (DA) de lodos permite la estabilización y reducción de éste, a la vez que produce energía a partir del biogás que se genera. Prácticas habituales producen entre 0,5-0,75 m³/kg SV_{in} (sólidos volátiles alimentados) (Appels *et al.*, 2008) con un contenido de metano alrededor del 60-70% que representa entre un 30-40% del consumo energético de una EDAR. En estos momentos se investigan distintos métodos para mejorar dichos ratios: pretratamientos de la DA basados en la lisis celular del lodo secundario (purga biológico); modificaciones del propio proceso de DA y, posttratamientos y recirculación del lodo digerido.

En relación a la lisis celular, la ozonización es un proceso prometedor para mejorar la eficiencia de

la DA convencional (mesofílica). En estudios previos, la DA de lodo biológico ozonizado obtuvo mejores resultados que el lodo sin tratar en cuanto a producción específica de metano y cinética de reacción (Fiter *et al.*, 2010; Canut *et al.*, 2011; y Ferrer *et al.*, 2011).

El cambio de configuración del digestor anaerobio es otra estrategia que permite optimizar la DA mediante el aumento del tiempo de retención celular (TRC) o mediante la separación de las etapas (fases microbiológicas) del proceso, optimizando sus parámetros operacionales. El La DA2T se lleva a cabo en dos digestores operando en serie, en condiciones de operación distintas. El primer digestor se opera a Tiempos de Residencia Hidráulico (TRH) bajos de entre 1-2 días, para conseguir una separación de las etapas del proceso de DA. En este primer digestor tiene lugar la etapa hidrolítica y acidogénica (digestor hidrolítico-acidogénico) y en el segundo digestor tiene lugar la metanogénesis (digestor metanogénico). La separación de las etapas posee la ventaja de operar ambos digesto-

res en las condiciones de operación más adecuadas para la actividad de las distintas poblaciones microbianas involucradas en el proceso (Geo *et al.*, 2011). La producción de biogás en el primer digestor normalmente es menos del 6% del total y suele contener menos del 40% en metano (Schafer *et al.*, 2002).

Los sistemas DA2T, también presentan diversas configuraciones en función de la temperatura de operación de cada uno de los digestores. El sistema en el cual el digestor hidrolítico-acidogénico es termófilo y el digestor metanogénico es mesófilo, corresponde con la configuración más utilizada en estudios a escala de laboratorio, pero en sistemas a escala piloto y real la configuración más extendida es la mesófila + mesófila (Geo *et al.*, 2011; Watts *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2007; y EPA, 2006).

La DA2T, presenta una serie de ventajas respecto a la digestión convencional mesófila en una sola etapa. Entre las principales ventajas se encuentran:

- mayor eliminación de sólidos volátiles de los lodos,

- mayor producción de biogás,
- reducción de olores,
- mejora de la calidad higiénica de los lodos (si existe una etapa termófila, y
- control y reducción de espumas (EPA, 2006).

Además, partiendo de la base que en términos energéticos 1 kg de H₂ es equivalente a 2,4 kg de CH₄ y que el lodo digerido contiene aún una fracción significativa de SV, con la DA2T (que produce H₂ en la etapa termófila) y la ozonización y recirculación del lodo digerido, se espera obtener mejores rendimientos en la reducción de lodo y la producción de energía a partir del metano generado, mayoritariamente, en la segunda fase (metanogénesis) y del hidrógeno generado en la primera (hidrólisis).

En este artículo se presentan los primeros resultados obtenidos a escala de laboratorio en torno al efecto de la ozonización como pre-tratamiento, así como la puesta en marcha del piloto DA2T. Parte de estos resultados han sido presentados en el VI Congreso Internacional sobre Oxidación Avanzada de la Internacional Water Association (IWA) (Fiter *et al.*, 2012).

Materiales y métodos

La unidad de ozonización incluye: reactor de 10 l de capacidad equipado con un generador de ozono *Air-Tree* de 10 gO₃/h de capacidad a partir de oxígeno, un concentrador de oxígeno modelo *TOPAZ plus* de AIRSEP y dos analizadores de ozono gas en línea GM-PRO (Anseros®) (figura 1).

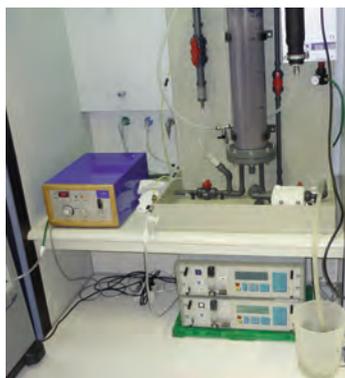


Figura 1. Imagen de la subunidad de ozonización.

Las unidades de DA convencional mesófila (a 33 °C) constan de varios reactores CSTR alimentados en régimen semicontinuo de 36 l de capacidad cada uno (30 l de volumen útil), con monitorización de caudal de biogás en continuo mediante *Ritter Milligascounters*® y determinación composición de biogás (CH₄, CO₂, H₂, H₂S y O₂) mediante sensor de infrarrojos y electroquímico (analizador de gas *Awite*). La unidad DA2T consta de dos reactores de mezcla completa de 5 y 10 l de capacidad, encamisados y con control de temperatura independiente y paso de flujo bidireccional entre ambos digestores. Tal unidad está equipada para obtener los mismos datos de caudal y composición de biogás que los digestores convencionales (figura 2).



Figura 2. Arriba la planta piloto de digestión anaerobia convencional en semicontinuo y a la izquierda la planta piloto DA2T.

Los parámetros físico-químicos de control analizados en las muestras de lodos secundarios, mixtos y ozonizados son: DQO soluble, ST, SV, SST y SSV. Además, en los digeridos se determinan los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) así como pH, Nitrógeno Amoniacal y relación de alcalinidades.

Resultados y discusión

A lo largo del proyecto se calcularán los balances de masa y energía de las distintas configuraciones (tabla 1) resultantes de la combinación del uso de ozono como pre-tratamiento o post-tratamiento con la DA2T frente a la DA convencional. Los resultados que se presentan corresponden a los cinco primeros meses de trabajo experimental a escala de laboratorio, correspon-

dientes a la configuración 1, pre-ozonización + DA (situación de lisis) comparada con la DA sin pre-ozonización (situación de no-lisis, punto de control DA). Durante el tiempo de experimentación (semana 1 hasta la 8) la ratio del lodo mixto fue 68/32 (primario/secundario) y 60/40 a partir de la semana 9. La temperatura de digestión mesófila fue de 33 °C. En estos momentos se está trabajando en la aclimatación del digestor termófilo para la puesta a punto del proceso DA2T y

		Pre-O ₃	
		NO	SÍ
Post-O ₃	NO	Punto control DA	Configuración 1
	SÍ	Configuración 2	Configuración 3
		Pre-O ₃	
		NO	SÍ
Post-O ₃	NO	Punto control DA2T	Configuración 4
	SÍ	Configuración 5	Configuración 6

Tabla 1. Configuraciones para ensayos a escala de laboratorio combinando ozono + DA convencional y ozono +DA2T.

en paralelo, se ha puesto en marcha la experimentación relativa a la configuración 2 (post-ozonización del digerido y recirculación en DA convencional).

Con objeto de evaluar el rendimiento de las distintas configuraciones, se han definido los siguientes parámetros de control:

- Factor de solubilización (lodo secundario -2ario-) = $(DQOs_{2ario})_{\text{lisis}} / (DQOs_{2ario})_{\text{no lisis}}$
- Factor de solubilización (lodo mixto -M-) = $(DQOs_M)_{\text{lisis}} / (DQOs_M)_{\text{no lisis}}$
- Factor de biodegradabilidad = $(\text{ml biogás} / \text{g SV}_{\text{input}})_{\text{lisis}} / (\text{ml biogás} / \text{g SV}_{\text{input}})_{\text{no lisis}}$
- Factor de reducción de lodo = $(ST_{\text{digerido}} / ST_{\text{input}})_{\text{lisis}} / (ST_{\text{digerido}} / ST_{\text{input}})_{\text{no lisis}}$
- Factor de estabilización = $(SV_{\text{digerido}} / SV_{\text{input}})_{\text{lisis}} / (SV_{\text{digerido}} / SV_{\text{input}})_{\text{no lisis}}$
- Rendimiento higiénico = (reducción de coliformes fecales y totales)_{configuración}
- Rendimiento energético = (energía extra generada / energía requerida)_{configuración}

El factor de solubilización se relaciona tanto con el lodo secundario (2ario) como con el lodo mixto (M), los otros tres factores (biodegradabilidad, reducción del lodo y estabilización) están relacionados con el lodo mixto (alimentación -input-), y el digerido del digestor anaerobio convencional o de doble etapa según la configuración evaluada. Los dos últimos parámetros, rendimientos higiénico y energético, se evaluarán más adelante con el objeto final de comparar las distintas configuraciones. Los factores de biodegradabilidad, reducción de lodo y estabilización permiten comparar el rendimiento del proceso de digestión anaerobia sin efecto del ozono (situación de no-lisis) con el proceso de digestión

anaerobia con efecto del ozono (situación de lisis). Si el valor del factor es 1, no existe diferencia entre ambas situaciones, si el valor del factor es < 1 la situación de no-lisis es mejor, y si el valor del factor > 1 la situación de lisis es mejor. En las figuras 3 y 4 se presentan la evolución de los factores

de solubilización relacionados con la dosis de ozono y la evolución de los factores de biodegradabilidad, reducción del lodo y estabilización de la configuración 1.

El grado de solubilización de los lodos secundarios espesados conseguido por la ozonización es muy elevado (hasta 20 veces más). Con dosis de ozono aplicado entre 0,025 y 0,08 g O₃/gSST_{iniciales} (primeras 7 semanas) y ratio de mixto (68/32), los resultados obtenidos en rendimientos de la digestión anaerobia sin pre-O₃ (punto de control DA) y con pre-O₃ (configuración 1) no presentan diferencias significativas. No obstante, con dosis en torno a 0,1 gO₃/g. SST_{iniciales} y ratio de mixto (60/40) se obtiene un incremento alrededor del 10% de volumen de biogás (semanas 7-12). Las dos últimas semanas, con dosis superiores a 0,1 gO₃/g SST_{iniciales} se obtienen resultados peores con la pre-O₃.

La DA2T se llevará a cabo en dos digestores anaerobios continuos de tanque agitado, operando en serie y en condiciones de operación distintas. En el primero tendrá lugar las etapas iniciales del proceso de la DA, es decir, la hidrólisis y acidogénesis, en condiciones termófilas de temperatura (55 °C) (digestor hidrolítico-acidogénico). En el segundo tendrá lugar, principalmente, la metanogénesis, y se operará en condiciones mesófilas (35 °C) (digestor metanogénico). Del primer digestor se obtendrá un efluente con elevadas concentraciones de AGV con el que se alimentará el segundo digestor donde se generará la mayor parte del biogás. El digestor hidrolítico-acidogénico se operará a un TRH de dos días, para conseguir separar las etapas de la DA. El digestor metanogénico se ope-

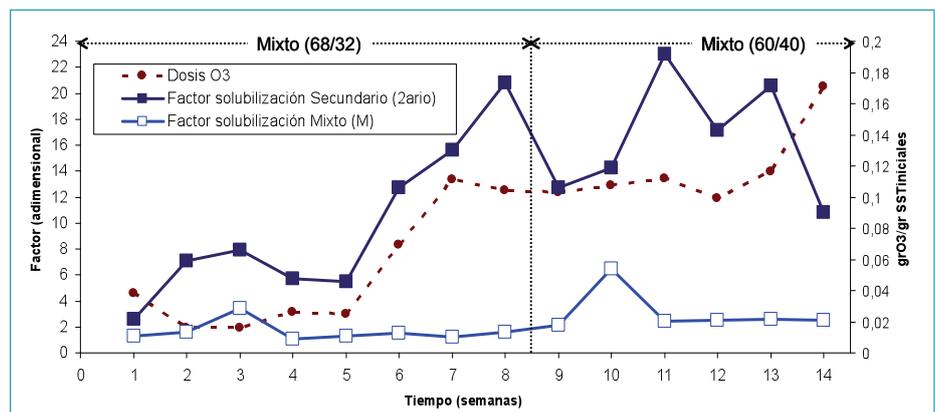


Figura 3. Evolución de la solubilización del lodo secundario y mixto de la configuración 1 relacionada con la dosis de ozono empleada.

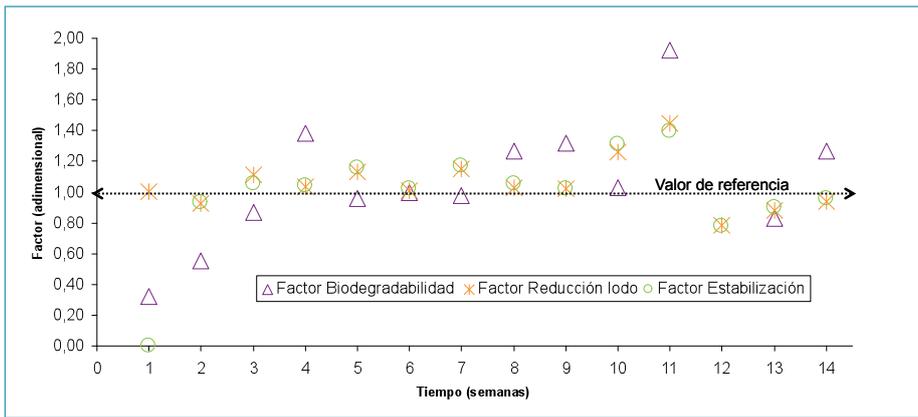


Figura 4. Evolución de los factores de biodegradabilidad, reducción del lodo y estabilización de la configuración 1.

rá a un TRH de 15 días. En este momento se está llevando a cabo la puesta en marcha del proceso en dos fases (figura 5).



Figura 5. Imagen montaje experimental para adaptación biomasa fase termófila.

El objetivo de la puesta en marcha es la generación de una biomasa anaerobia hidrolítica-acidogénica termófila. Para ello, se ha partido de un inóculo mesófilo procedente de un digestor industrial de lodos de EDAR. Para convertir la biomasa termófila en mesófila existen dos estrategias: incrementar la temperatura gradualmente o bien aumentar la temperatura desde 35 hasta 55 °C en un solo paso. En este caso se ha seleccionado la segunda, debido a que el tiempo necesario para estabilizar el proce-

so es más rápido y, además, se generan mayores cantidades de AGV en el digestor (Bouskova *et al.*, 2005). Por otro lado, se pretende obtener una biomasa anaerobia con elevada capacidad hidrolítica-acidogénica y con poca biomasa metanogénica. Para ello, se operará el primer digestor con un TRH de dos días, disminuyéndole gradualmente desde 8 días. La concentración de AGV, relación de alcalinidad, pH, SV y ST se miden dos veces por semana. Cuando se llegue al TRH de dos días, se operará en dichas condiciones, hasta alcanzar el estado estacionario (EE) que se considerará cuando se obtenga un perfil de AGV y eliminaciones de SV similares, al menos durante 3 TRH.

Conclusiones

Según los resultados experimentales a escala de laboratorio de los ensayos de la configuración 1, y considerando las condiciones específicas de ratios de lodo mixto (68/32 y 60/40), TRH de 15 días y temperatura de digestión de 33 °C se concluye:

- la pre-ozonización es efectiva en términos de solubilización de materia orgánica del lodo secundario,
- los factores de biodegradabilidad, reducción del lodo y estabilización son mejores (valores > 1) con el lodo ozonizado entre las semanas 7 y 12, cuando la dosis de ozono aplicada fue en torno a los 0,1 g O₃/g SST_{iniciales}, obteniéndose un incremento de producción de biogás de alrededor del 10%.

En estos momentos se están llevando a cabo los ensayos con la configuración 2 y 3; en paralelo se está trabajando en la puesta en marcha de la DA2T para poder empezar en breve los ensayos de las configuraciones 4, 5 y 6. A medio plazo, los resultados que se obtengan de los ensayos experimentales a escala de laboratorio permitirán:

- Una primera aproximación de la configuración más adecuada desde una triple perspectiva: balance de masas, energético y de calidad higiénica.
- Condiciones de operación de los distintos pasos de la/s configuración/es óptima/s.
- Los parámetros de diseño para la construcción de la planta piloto en la EDAR de Castelló de la Plana.

Referencias

- Appels, L.; Baeyens, J.; Degève, J. y Dewil R. 2008. *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge*. Progress in Energy and Combustion Science, 43, pp. 755-771.
- Bouskova, A.; Dohanyos, M.; Schmidt, J. E. y Angelidaki, I. 2005. *Strategies for changing temperature from mesophilic to thermophilic conditions in anaerobic CSTR reactor treating sewage sludge*. Water Research, 39, pp. 1.481-1.488.
- Canut, A.; Fiter, M.; Ruiz, B.; Ferrer, C. y Pascual, A. 2011. *Ozone disintegration on waste sludge: enhanced biogas production and energy balance in wastewater treatment plant*. Proceedings of IOA IUVA World Congreso & Exhibition, III.2.6-1...III.2.6-4, París (France).
- EPA United States Environmental Protection Agency. 2006. *Biosolids Technology Fact Sheet: Multi-Stage Anaerobic Digestion*. Disponible en: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2006_10_16_mt_multi-stage.pdf
- Ferrer, C.; Berlanga, J. G.; Castell, D.; García, M.; Fiter, M.; Ca-



- nut, A.; Ruiz, B.; Basiero, J. A.; Barnácer, I. y Martínez, J. L. 2011. *Pretratamiento con ozono de fangos en exceso a digestión anaerobia*. Retema, septiembre-octubre, pp. 8-13.
- Fiter, M.; Canut, A.; Ruiz, B.; Ferrer, C. y Pascual, A. 2010. *Enhancement of waste sludge disintegration by ozone combined with ultrasound pre-treatment*. Proceedings of IWA Conference on Sustainable Solutions for Small Water and Wastewater Treatment Systems (S2Small), Girona (España).
- Fiter, M.; Canut, A.; Ruiz, B.; Ferrer, C.; Berlanga, J. G.; Alonso, S. y Pascual, A. 2012. *Ozone and two temperature-phased anaerobic digestion to improve sludge treatment and energy production*. Proceedings of 6th IWA Specialist Conference: Oxidation Technologies for Water and Wastewater Treatment (AOP6), Goslar (Alemania).
- Geo, H. Q.; Jensen, P. D. y Battstone, D. J. 2011. *Temperature phased anaerobic digestion increases apparent hydrolysis rate for waste activated sludge*. Water Research, 45(4), pp. 1.597-1.606.
- Lu, J.; Gavala, H. N.; Skiadas, I. V.; Mladenovska, Z. y Ahring, B. K. 2007. *Improving anaerobic sewage sludge digestion by implementation of a hyperthermophilic hydrolysis step*. Journal of Environmental Management, 88, pp. 881-889.
- Schafer, P. L.; Farrell, J. B.; Newman, G. y Vandenberg, S. 2002. *Proceedings of the Water Environment Federation*. WEFTEC, Session 41 through Session 50, pp. 468-484(17)
- Watts, S.; Hamilton, G. y Keller, J. 2005. *Two-stage thermophilic-mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge from a biological nutrient removal plant*. Water Science and Technology, 53, p. 149.

Agradecimientos

El Proyecto SLUDGE4ENERGY, con número de expediente IPT-2011-1669-920000, tiene una duración de tres años (2011-2014) y ha sido co-financiado, a través del programa INNFACTO, por el Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la UE con 1.206.816,18 € de ayuda concedida (subvención + préstamo).