

# Innovación electroquímica para el tratamiento del agua residual cervecera

**TECNOLOGÍA PROMETEDORA** | El proyecto Life-ANSWER (soluciones avanzadas de nutrientes con recuperación electroquímica) tiene como objetivo proporcionar una tecnología innovadora que integre la electrocoagulación y la electroquímica microbiana para el tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria. El sistema ANSWER permite reutilizar el agua tratada, produciendo biogás enriquecido ( $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ ) y fertilizante a partir del agua residual.

**LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA** requiere un gran volumen de agua comparado con el resto de industrias (son consumidores del 1,8 % de toda el agua en Europa), lo que inevitablemente conduce a la generación de aguas residuales que deben ser sometidas a un tratamiento antes de regresar al medio ambiente. La industria cervecera genera alrededor de 4 litros de agua residual por litro de cerveza producida; sin embargo, el consumo de agua se divide en 2/3 utilizados en el proceso y 1/3 en las operaciones

de limpieza [1]. La eliminación y recuperación de nutrientes en las aguas residuales, principalmente nitrógeno, fósforo y materia orgánica, es uno de los objetivos prioritarios marcados por la Unión Europea a través de la Directiva 2000/60 / UE, que establece las reglas básicas para proteger el estado de los cuerpos de agua e incrementar la calidad de los ríos, lagos y aguas subterráneas de la Unión Europea. Uno de los problemas que surgen debido a las descargas incontroladas de agua residual rica en nutrientes es la

eutrofización, proceso que provoca la disminución del oxígeno presente en los cuerpos de agua y que causa un grave deterioro ambiental debido a la pérdida de la biodiversidad del medio. Actualmente, los sistemas de tratamiento convencionales utilizados para la eliminación de estos compuestos en las estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR) se basan principalmente en la dosificación de reactivos químicos con función coagulante durante el tratamiento primario, poco respetuosos con el medio ambiente, y en el uso de sistemas biológicos como tratamiento secundario que implican un alto coste de energía, así como una alta huella de carbono, que limita su viabilidad ambiental. En el caso del agua residual cervecera, se emplean tradicionalmente soluciones aerobias para las cuales la energía, el coste de operaciones y la extracción del lodo son las acciones de mayor coste. Por ejemplo, las soluciones aerobias necesitan entre 1,5 - 2,5 kWh de electricidad para eliminar 1 kg de oxígeno biológico (DBO), que es aquel susceptible de ser consumido en la

**Autores:** Patricia Fernández-Labrador, Juan Francisco Ciriza, Mahou San Miguel, Madrid; Dr. Yeray Asensio, Dr. Víctor Monsalvo, Aqualia, Madrid; María Llorente, Belén Barroeta, Dr. Juan M. Ortiz, Dr. Abraham Esteve-Núñez, Universidad de Alcalá, Madrid; Juan Tolón, Recuperaciones Tolón, Alicante, todos de España



Fig. 1 Flujograma del proceso ANSWER

degradación de materia orgánica. Sin embargo, en la industria existen flujos de agua de proceso de alta resistencia, que contienen hasta 3 kWh de energía por kilogramo de DBO, lo que hace que las soluciones anaerobias sean particularmente atractivas para las cervecerías [2].

El proyecto Life-ANSWER se lanzó en septiembre de 2016 y cuenta con el apoyo de la UE dentro del marco LIFE (LIFE 15 ENV/ES/000591) y con un presupuesto total de 973403 EUR, de los cuales el 60% ha sido cofinanciado. El consorcio está coordinado por Mahou San Miguel, una empresa cervecera en cuyas instalaciones opera la planta de demostración; Aqualia, empresa del sector en la gestión del agua; el Grupo de Bioelectrogénesis de la Universidad de Alcalá y Recuperaciones Tolón como gestor de residuos metálicos.

El proyecto ANSWER propone una solución avanzada para el tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria, que se caracteriza por tener altas concentraciones de nutrientes (especialmente nitrógeno y fósforo) y una alta carga orgánica (ver tabla 1). El proceso integra tres unidades principales, un sistema de electrocoagulación (en el que la reutilización de desechos metálicos se incorpora como fuente de coagulante), seguido de una tecnología anaerobia innovadora en la que existe un dispositivo electroquímico microbiano que permite una depuración efectiva y maximiza la obtención de energía (biogás enriquecido). El proyecto también propone un objetivo ambicioso, la obtención de un excedente de energía de aproximadamente 2,5 kWh/m<sup>3</sup>. Además, las aguas residuales tratadas se reutilizarán a través de la implementación de la ultrafiltración y la desinfección UV para producir un efluente que cumpla con los requisitos legales establecidos en el Real Decreto 1620/2007, que puede reutilizarse en las instalaciones de acuerdo con uno de los usos contemplados en la legislación como es la categoría servicios, la cual incluye acciones como baldeo y riego de zonas verdes. Esta reutilización del agua facilita el cumplimiento de la hoja de ruta europea establecida en la Estrategia Europa 2020, que se basa en el consumo eficiente de recursos, siendo este uno de los desafíos ambientales más importantes a los que se enfrenta la industria de alimentos y bebidas para el 2020.

La planta de demostración ha operado desde principios de 2018 en las instalaciones de Mahou San Miguel para abordar

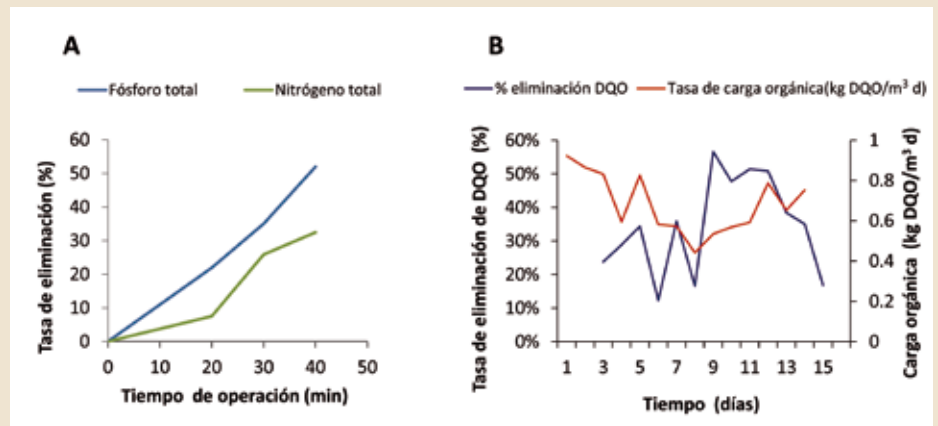


Fig. 2 A) Eliminación de fósforo y nitrógeno total fijando una densidad de corriente de 2,5mA/cm<sup>2</sup> y a diferentes tiempos de retención en la EC; B) Tasa de eliminación de DQO a distinta carga orgánica en el RBLF

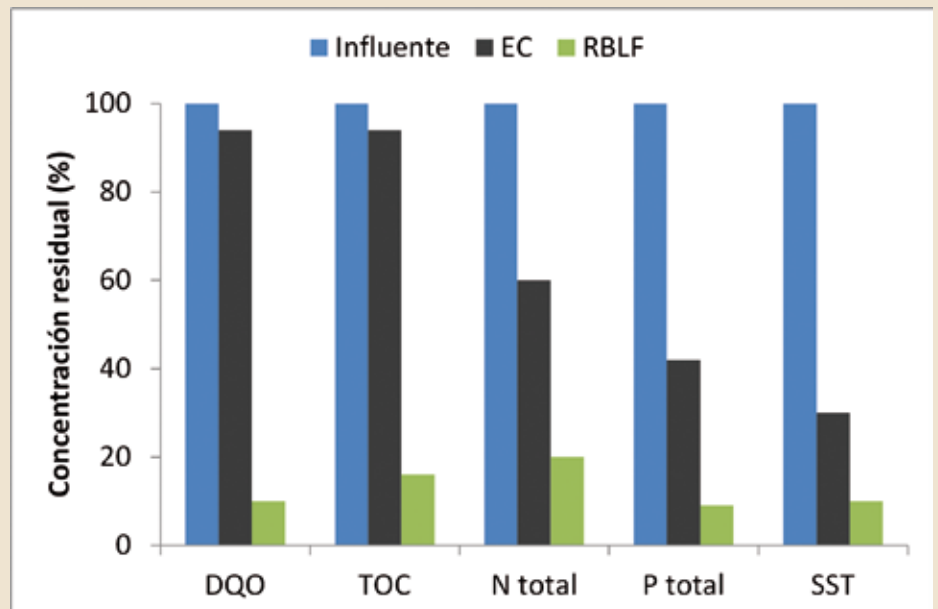


Fig. 3 Concentración residual (%) de DQO, TOC, N total, P total y sólidos en el agua residual inicial y después de ambos sistemas

el estudio y la optimización, tanto técnica como económica, de la integración de las tecnologías propuestas en el sistema ANSWER para un tratamiento sostenible de las aguas residuales industriales. Hasta ahora, los logros más destacados son la reducción del consumo de reactivos tradicionalmente utilizados para eliminar nutrientes; la producción de un efluente de alta calidad para su reutilización; la producción de un biogás enriquecido para ser valorizado energéticamente en la fábrica de cerveza y la obtención de un lodo con un alto contenido de nitrógeno y fósforo que se puede utilizar de forma segura como fertilizante en la agricultura.

### Tecnología

El centro de producción de Mahou San Miguel, ubicado en Alovera (Guadalajara), es

el sitio de demostración, en el que se ha instalado la planta de tratamiento. Para hacer frente al proceso de escalado de la unidad de demostración, fue necesario realizar pruebas preliminares para optimizar las condiciones de operación del proceso con el fin de maximizar la capacidad de tratamiento de la tecnología. La unidad de demostración fue diseñada y construida de acuerdo con el diagrama de flujo mostrado en la fig. 1. Las tres etapas fundamentales del proceso, como se puede ver en la figura, son la unidad de electrocoagulación (EC), el reactor bioelectrogenico de lecho fluidizado (RBLF) y el sistema terciario:

- Etapa 1: tratamiento por electrocoagulación con pellets de aluminio reciclado, para la eliminación de contaminantes y producción de fertilizante;



Ocho de los nueve autores (de izda. a dcha.): Belén Barroeta, Patricia Fernández-Labrador, María Llorente, Dr. Yeray Asensio, Dr. Víctor Monsalvo, Juan Tolón, Dr. Juan M. Ortiz, Dr. Abraham Esteve-Núñez

- Etapa 2: tratamiento del efluente en el RBLF para la transformación de la materia orgánica en biogás enriquecido (alta concentración de metano e hidrógeno);
- Etapa 3: tratamiento terciario basado en una unidad de membranas de ultrafiltración y foto desinfección para cumplir con los requisitos de reutilización y/o descarga cero.

La unidad de electrocoagulación, con una capacidad de tratamiento de 10 m<sup>3</sup>/h, está compuesta por varios módulos de electrodos en línea. El electrodo negativo (cátodo) está diseñado en acero inoxidable, y el electrodo positivo (ánodo de sacrificio) está hecho con pellets de aluminio como materia prima compactada, procedente del reciclaje de materiales inicialmente vistos como residuos (contenedores, latas, etc.). Tres etapas sucesivas ocurren en este proceso. Aplicando corriente en el sistema, el coagulante se forma por oxidación electrolytica del ánodo de sacrificio hecho de aluminio liberándose al agua residual, causando una desestabilización de las partículas contaminantes (fósforo y nitrógeno de la fracción insoluble y sólidos en suspensión). Finalmente se forman agregados que, debido a su peso, precipitan o son arrastrados hacia la superficie por las burbujas de hidrógeno liberadas en el cátodo. Estos agregados formarán parte del fango que se extrae con un proceso de secado y se utiliza como fertilizante en la agricultura gracias a su composición rica en fósforo y nitrógeno. El efluente resultante de la unidad de electrocoagulación continúa su tratamiento en un reactor de lecho fluidizado anaerobio.

El concepto del sistema RBLF fue co-desarrollado y patentado como “Método para el tratamiento de aguas residuales en un biorreactor de lecho fluidizado” (Ref. EP 2927196 A1) por Aqualia y el Grupo Bioe de la Universidad de Alcalá (UAH) en el proyecto ITACA. El sistema está equipado con un dispositivo electroquímico microbiano, donde los procesos bioelectrogénicos promueven la transformación de la materia orgánica. Esta tecnología se basa en la interacción entre bacterias electroactivas y un material conductor granular fluidizado. Estas partículas fluidizadas son colonizadas por los microorganismos capaces de formar

una biopelícula de 10 µm de espesor según los resultados previos a escala de laboratorio [3]. La materia orgánica es oxidada por los microorganismos y los electrones resultantes se transfieren al ánodo (partículas de material de carbono), generando una circulación de electrones desde el ánodo al cátodo donde se produce hidrógeno. Por otro lado, debido a la oxidación de materia orgánica se obtiene metano como producto, que es recogido junto con el hidrógeno para obtener un biogás con un alto valor calorífico (8,4 kWh/m<sup>3</sup>) para ser utilizado en

las calderas existentes en la planta de elaboración de cerveza.

### Resultados

Desde el inicio del proyecto, los resultados han sido muy satisfactorios tanto en los ensayos preliminares a escala de laboratorio como en la escala piloto. La planta demostrativa piloto opera en modo continuo con distintos tiempos de retención en el caso del EC (fig. 2A) y con diferentes cargas orgánicas para el RBLF (fig. 2B). Se ha demostrado que la tecnología desarrollada en el proyecto ANSWER reduce el coste del tratamiento

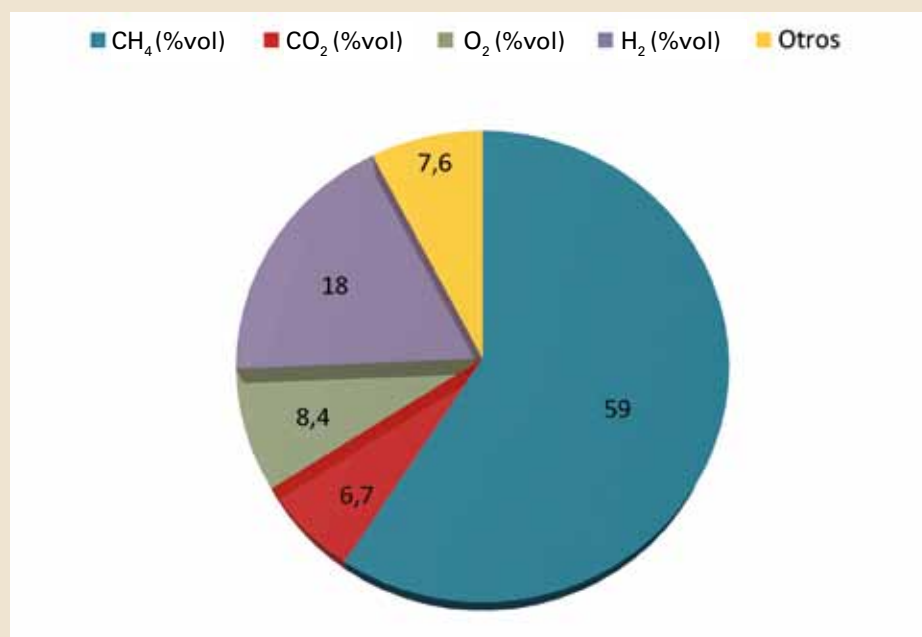


Fig. 4 Composición media del biogás enriquecido obtenida en el RBLF

en un 30 % en comparación con las tecnologías estándar utilizadas en la industria de alimentos y bebidas.

Gracias al proceso de la EC con aluminio reciclado, la eficiencia en la eliminación de fósforo es aproximadamente el 58 %, de nitrógeno un 40 % y un 70 % de sólidos en suspensión precipitan (fig. 3), basado en las condiciones de operación óptimas de la EC, el consumo mínimo de energía se estableció aplicando una densidad de corriente (j) entre 1,7 - 2,5 mA / cm<sup>2</sup>. Además, el diseño de los ánodos permite reemplazar fácilmente el aluminio que se consume en la reacción, evitando los ensamblajes complicados. Los resultados alcanzados durante los nueve meses, en los cuales se ha operado la unidad de demostración construida en ANSWER, son francamente prometedores. Actualmente, este sistema innovador permite alcanzar un rendimiento de eliminación de materia orgánica de más del 90 %, para evitar la generación de lodos y aumentar en un 12 % el contenido de energía del biogás obtenido con los convencionales reactores anaerobios granulares. Los nutrientes restantes de la EC también se eliminan de manera efectiva en el reactor anaeróbico (aproximadamente un 80 %), lo que permite alcanzar la concentración requerida para su descarga y/o reutilización (fig. 3). Otra característica remarcable de la tecnología es que durante el funcionamiento del RBLF se ha verificado que la producción de energía supera el consumo de energía en un 21 %. Este sistema representa un avance técnico con un impacto positivo relevante en el proceso de tratamiento, en términos de consumo de energía, costes y una generación de lodos insignificante. El bajo consumo de energía de las unidades propuestas y la producción de hidrógeno y metano (fig. 4) representan

un avance significativo en el sector del agua, ofreciendo una solución viable que promueve la sostenibilidad y la economía circular en torno a la gestión del agua.

### ■ Conclusiones

Con la implementación de esta tecnología se logra una reducción en el uso de productos químicos en dos ámbitos. Por un lado, aquellos con función coagulante, utilizados en las EDAR durante su tratamiento primario, son reemplazados por aluminio reutilizado en la electrocoagulación. Por otro lado, los fertilizantes para la agricultura son reemplazados por el lodo con alto contenido de fósforo y nitrógeno que se obtiene al final del proceso. El novedoso RBLF anaerobio maximiza la transformación de la materia orgánica en un biogás enriquecido con un alto contenido en energía con una producción insignificante de biomasa. Durante el periodo de vigencia del proyecto se ha demostrado que RBLF posee una gran estabilidad al tratar cargas elevadas y mitiga el impacto negativo que causan los períodos sin alimentación continua o la presencia de compuestos tóxicos puntuales en el agua residual. Gracias a la recuperación de energía de las aguas residuales, se reduce la emisión de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, se reduce el consumo de energía en un 25 %.

El efluente obtenido del sistema terciario (ultrafiltración por membranas y desinfección UV) muestra una excelente calidad para ser reutilizada para el riego y otros fines de

## PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA RESIDUAL CERVECERA

Parámetro	valor
pH	6,97
Conductividad (mS/cm, 25° C)	2,73
DQO (mg/l)	3065
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	641
TOC (mg/l)	954
Color (mg/l)	4180
Nitrógeno total (mg/l)	69
Fósforo total (mg/l)	15,2

Tabla 1

acuerdo con el marco regulatorio de la UE y nacional. Con el proyecto Life-ANSWER se valida y optimiza una tecnología innovadora en condiciones reales para mejorar la calidad de los efluentes industriales y el medio ambiente. ■

### ■ Bibliografía

1. Fillaudeau, L. et al.: "Water, wastewater and waste management in brewing industries", Journal of Cleaner Production 14, 2006, pp. 463-471.
2. Aviles, C; Dean, W; Gobburi, B.: "Brewery water and Process Water Management: The golden, green opportunity found in anaerobic treatment solutions", Master Brewers Technical Quarterly, Volume 54, n.º 1, 2017, pp. 41-44.
3. Tejedor-Sanz, S; Ortiz, J.M.; Esteve-Núñez, A.: "Merging microbial electrochemical systems with electrocoagulation pretreatment for achieving a complete treatment of brewery wastewater", Chemical Engineering Journal 330, 2017, pp.1068-107.