

TRATAMIENTO DE RESIDUOS TÓXICOS Y PELIGROSOS MEDIANTE TECNOLOGÍA EVAPORATIVA DE BAJO CONSUMO (ENA)

José Miguel Arnal Arnal

Beatriz García-Fayos

María Sancho Fernández

Fernando Mirallave

Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)

Universitat Politècnica de València

Abstract

Treatment of liquid waste is one of the most important environmental problems in the industry. Current treatment techniques are based on technologies that reduce liquid waste volume, allowing its re-use, recovery or recycling. Evaporation is one of the most appropriate techniques for liquid waste treatment because it obtains a solid waste easier to manage than the previous one and a reusable liquid stream. However, the main drawback of conventional processes that use evaporation is the economic cost associated with the energy consumed. The evaporation under environmental conditions is a low energy consumption alternative that allows the evaporation of the liquid on adsorbents surfaces exposed to the environment, using as driving force the relative-humidity gradient and the air speed. The process of evaporation under environmental conditions (ENA) designed, allows the controlled recrystallization of the dissolved solids on the adsorbent surface, minimizing the aerosols formation and allowing their application to toxic and hazardous wastes. This work describes a system based on ENA technology that can be applied in the treatment of toxic and hazardous wastes with minimum energy consumption. In addition, we present some results of application of this technology in the treatment of waste containing phosphorus, which confirm the technical feasibility of the process.

Keywords: *Natural evaporation; waste treatment; recrystallization; hazardous wastes; evaporation.*

Resumen

El tratamiento de residuos líquidos constituye uno de los problemas medioambientales más importantes en el ámbito empresarial. Las técnicas de tratamiento actuales aplican tecnologías destinadas a la reducción de volumen de los residuos, con el fin de facilitar su reutilización, valorización o reciclado. La evaporación es una de las técnicas más adecuadas ya que permite obtener un residuo sólido más fácil de gestionar que el residuo original de partida y una corriente de líquido reutilizable. Sin embargo, el principal inconveniente de los procesos convencionales de evaporación es el coste económico asociado a la energía consumida. La evaporación ambiental constituye una alternativa de bajo consumo energético que permite realizar la evaporación del líquido sobre superficies adsorbentes expuestas al ambiente, utilizando como fuerza impulsora el gradiente de humedad relativo en el sistema y la velocidad del aire. El proceso de Evaporación Natural Asistida (ENA) diseñado, permite la recristalización controlada de los sólidos disueltos sobre la superficie

adsorbente, minimizando la formación de aerosoles y permitiendo su aplicación a los residuos tóxicos y peligrosos. En este trabajo se describe un sistema basado en la tecnología ENA que puede ser aplicado para el tratamiento de residuos tóxicos y peligrosos con un mínimo consumo de energía. Además, se presentan algunos resultados de aplicación en el tratamiento de residuos que contienen fósforo, que confirman la viabilidad técnica del proceso.

Palabras clave: *Evaporación Natural; tratamiento de residuos; residuos peligrosos; recristalización; evaporación.*

1. Introducción

El tratamiento de residuos líquidos constituye uno de los problemas medioambientales más importantes en el ámbito industrial. Las técnicas de tratamiento actuales aplican tecnologías destinadas a la reducción de volumen de los residuos, con el fin de facilitar su reutilización, valorización o reciclado. La selección de la técnica de tratamiento más adecuada depende principalmente de las características específicas del efluente líquido a tratar.

Este trabajo pretende abordar el tratamiento de los residuos producidos en la industria que por sus características pueden considerarse como residuos peligrosos (RP). Los tratamientos generalmente aplicados para la eliminación o concentración de contaminantes peligrosos de residuos líquidos son la precipitación química, los procesos de membranas y la evaporación. Cuando el propósito del tratamiento es la concentración de los sólidos a través de la reducción del volumen de disolvente, los dos tipos de procesos que pueden aplicarse son las técnicas de evaporación y las técnicas de membrana (Macedonio, 2011).

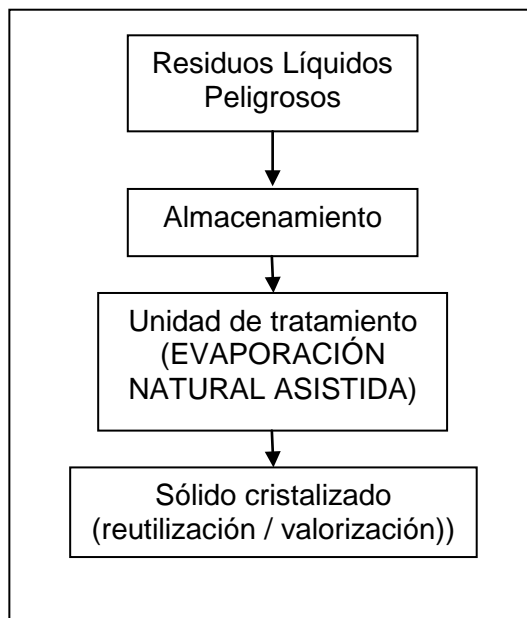
Las técnicas de membrana presentan un gran rendimiento en la separación de disoluciones acuosas, aunque están limitadas por la concentración de sales inorgánicas que impliquen elevadas presiones osmóticas. Las ventajas principales de este tipo de operaciones son su reducido consumo energético, ya que no suponen cambio de fase del disolvente, y la sencillez y flexibilidad de las instalaciones. Por el contrario, el ensuciamiento progresivo de las membranas puede ser un factor limitante de la aplicación.

Las técnicas evaporativas, de mayor consumo energético que los procesos de membrana, pueden trabajar prácticamente hasta el límite de solubilidad de los compuestos en disolución. Por lo tanto, cuando se quiere alcanzar una fase prácticamente sólida, son las operaciones más efectivas. La eliminación del disolvente se realiza por un cambio de fase directo con aporte de calor hasta conseguir alcanzar la temperatura de ebullición de la disolución. Algunas de las desventajas de las técnicas de evaporación son la formación de incrustaciones y espumas, la corrosión de los equipos y las limitaciones espaciales. En cualquier caso, el principal inconveniente de los procesos convencionales de evaporación es el coste económico asociado a la energía consumida.

Frente a la evaporación convencional con aporte de calor, la evaporación ambiental (sin aporte de calor) constituye una alternativa de bajo consumo energético. Sin embargo, la evaporación en condiciones ambientales presenta el inconveniente de requerir grandes extensiones de terreno, ya que la productividad del proceso es bastante pequeña (alrededor de 4 L/(m²día)). Este inconveniente se puede suplir mediante el empleo de superficies adsorbentes expuestas al ambiente, utilizando como fuerza impulsora el gradiente de humedad relativo en el sistema y la velocidad del aire (Gilron, 2003 & Yanniotis, 2007). Este proceso de Evaporación Natural Asistida (ENA) permite la recristalización controlada de los sólidos disueltos sobre la superficie adsorbente, minimizando la formación de aerosoles, tal y como ha sido comprobado en estudios experimentales con salmueras procedentes de desalación (León-Hidalgo et al, 2007). Por ello, la Evaporación Natural Asistida se considera una técnica adecuada para el tratamiento de los residuos líquidos peligrosos generados en

la industria con el fin de concentrar el residuo hasta el estado sólido (cristalización) permitiendo así su reutilización y/o valorización. En la Figura 1 se presenta un esquema general del tratamiento de este tipo de residuos mediante ENA.

Figura 1: Tratamiento mediante ENA de residuos líquidos peligrosos generados en la industria

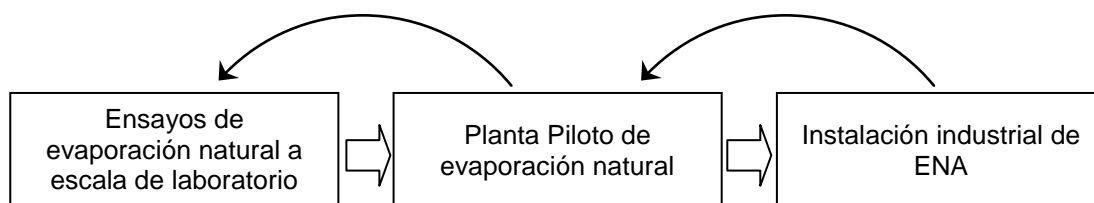


En este trabajo se describe un sistema basado en la tecnología ENA que puede ser aplicado para el tratamiento de residuos tóxicos y peligrosos con un mínimo consumo de energía. Además, se presentan algunos resultados de aplicación en el tratamiento de residuos que contienen fósforo, que confirman la viabilidad técnica del proceso.

2. Objetivos

En este trabajo se muestra y describe el sistema de Evaporación Natural Asistida diseñado para el tratamiento de residuos tóxicos y peligrosos, y su evolución a lo largo del desarrollo de la instalación en sus distintas etapas de diseño (Figura 2). En primer lugar, se describe el montaje inicial utilizado en los ensayos a escala de laboratorio. A continuación, se presenta el diseño de la planta piloto para poner a punto el sistema previo a su escalado industrial; y finalmente se presenta, de forma esquemática, la instalación industrial de ENA diseñada a partir de los resultados anteriores.

Figura 2: Desarrollo de la instalación industrial de ENA



Las fases de laboratorio y planta piloto han sido técnicamente contrastadas con residuos líquidos que contienen fósforo rojo y fósforo blanco. La instalación industrial se está utilizando actualmente en el tratamiento de residuos líquidos procedentes del curado de jamones.

3. Desarrollo y diseño de la instalación industrial de ENA

3.1 Caracterización de los residuos líquidos con fósforo

Los residuos líquidos objeto de tratamiento se caracterizaron determinando los siguientes parámetros:

- pH, medido con un pH-metro de la casa comercial CRISON INSTRUMENTS.
- Conductividad, medida con un conductímetro de la casa comercial CRISON INSTRUMENTS.
- Materia sedimentable, de acuerdo con el procedimientos establecido en la norma UNE 77-032-82.
- Sólidos totales, de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma UNE 77-030-82.

En la Tabla 1 se muestran los rangos de variación de los parámetros determinados en las muestras tomadas de los residuos líquidos con fósforo.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de los residuos líquidos de fósforo

Parámetro	Rango de variación (media)
pH	6,5 – 9,7 (7,5)
Conductividad (mS/cm)	15 – 59 (26,7)
Materia sedimentable (mL/L)	0 – 350 (50,3)
Sólidos totales (g/L)	26,5 – 300 (59,0)

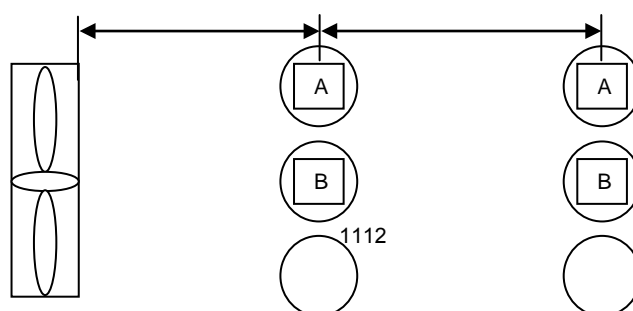
Los residuos caracterizados contienen fósforo rojo y fósforo blanco, dos compuestos inflamables y tóxico que confieren a dichos residuos la característica de peligrosidad.

3.2 La evaporación natural a escala de laboratorio

En la Figura 3 se muestra un esquema del montaje utilizado a escala de laboratorio para los ensayos de evaporación natural sin aporte de calor. El montaje consiste en varios matraces Erlenmeyer dentro de los cuales se colocan distintos materiales adsorbentes (A y B), que se comparan con los resultados de un matraz sin adsorbentes (blanco). Los diferentes matraces se colocan dentro de un túnel con ventilación forzada con un rango de velocidad del aire entre 0,5 y 2 m/s. Además, los matraces se sitúan en diferentes posiciones respecto a la entrada de aire, para estudiar el efecto de la velocidad del aire sobre el rendimiento de la evaporación. Concretamente, se situaron tres matraces en dos posiciones: a 66 cm y a 132 cm de distancia de la entrada de aire. En la Figura 3 se muestra un esquema del montaje empleado.

Cada cierto tiempo se tomaron medidas de humedad relativa, velocidad del aire y temperatura, y se midió la diferencia de masa respecto a la medida anterior. La experiencia se prolongó hasta la evaporación total del líquido del recipiente.

Figura 3: Esquema del montaje de laboratorio para los ensayos de evaporación natural
66 cm 132 cm



VENTILADOR

Posición 1

Posición 2

En la Tabla 2 se muestran las principales características de los materiales adsorbentes empleados, así como sus dimensiones.

Tabla 2. Características de los materiales adsorbentes

Adsorbedor	Material	Dimensiones
A1	Mecha cilíndrica 80% algodón reprocesado 20% fibras sintéticas	4 mm diámetro
A2	Mecha rectangular 80% viscosa 20% poliéster	26 mm perímetro
A3	Mecha rectangular 65% celulosa 35% algodón	26 mm perímetro
A4	Mecha cilíndrica 100% poliamida	1,5 mm diámetro

A partir de los resultados de estos ensayos se seleccionó el material más adecuado para los adsorbedores, la velocidad óptima de circulación del aire, y la posición más conveniente de los adsorbedores dentro del sistema. Los resultados de estos ensayos se publicaron en trabajos anteriores (Arnal, 2005).

En el caso de la aplicación de estos ensayos a los residuos líquidos que contienen fósforo, los resultados confirman que el material adsorbente 3 es el más adecuado, puesto que la tasa de evaporación producida es significativamente superior a la conseguida con el resto de materiales ensayados.

A partir de los resultados obtenidos en estos ensayos, se procedió al diseño de la planta piloto que se describe a continuación.

3.3 La planta piloto de evaporación natural

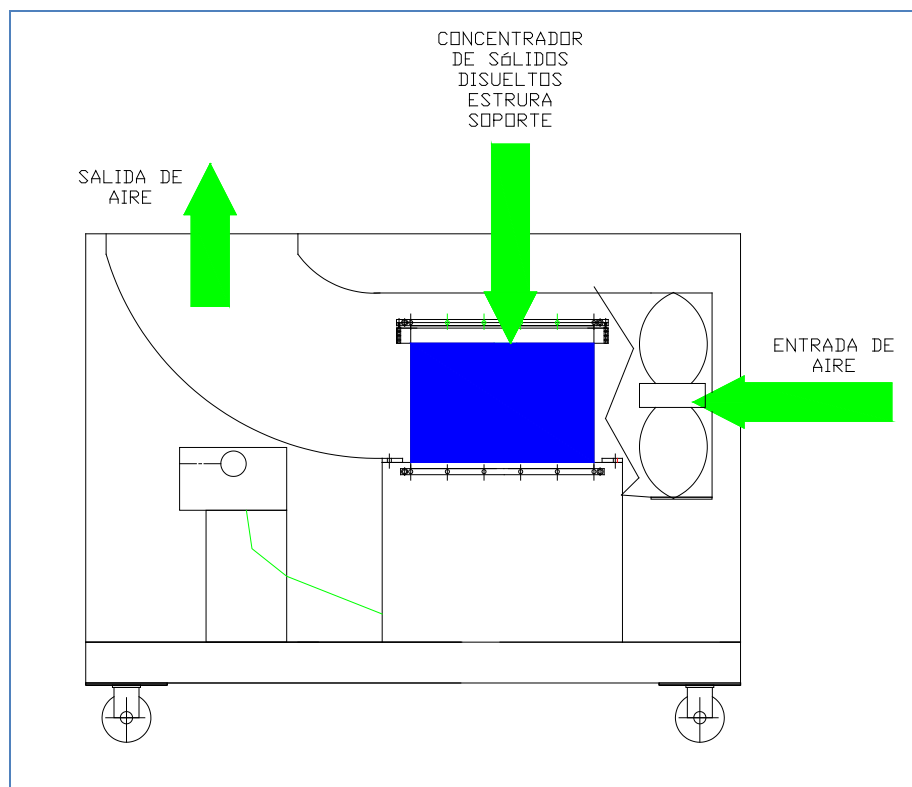
En la Figura 4 se muestra un esquema de la planta piloto de evaporación natural diseñada a partir de los resultados obtenidos a escala de laboratorio. Dicha planta piloto consta de los siguientes elementos principales:

- Estructura bastidor donde se montan los elementos del sistema.
- Turbina centrífuga encargada de impulsar el aire a velocidad controlada sobre los adsorbedores.
- Depósito de tratamiento donde se introduce la disolución que empaña los adsorbedores (cubeta de inmersión). A la misma distancia de la turbina, se dispone otra cubeta con las mismas dimensiones, llena de la disolución a tratar pero sin material adsorbente, con la que se compara el rendimiento de la evaporación.
- Depósito intermedio que dispone del control de nivel del depósito de tratamiento.

- Depósito de almacenamiento, encargado de almacenar la disolución que alimenta el depósito de tratamiento.
- Salida de aire, conducto por donde sale el aire húmedo después de atravesar los adsorbedores en sentido longitudinal.
- Cuadro de control, encargado de regular el funcionamiento de la instalación, que está basado en el tiempo de exposición y el tiempo de inmersión de los adsorbedores.

La instalación descrita funciona durante 24 horas al día.

Figura 4: Esquema de la planta piloto de evaporación natural



El rendimiento del sistema se mide por la evaporación producida en la cubeta de inmersión de los adsorbedores en comparación con la evaporación producida en una cubeta de idénticas características pero sin adsorbedores. La tasa de evaporación se determina por el "volumen añadido" en el depósito de alimentación. Este volumen añadido corresponde al volumen de disolución que se debe añadir en cada cubeta para igualar el peso inicial previo a la evaporación, y representa el volumen de líquido evaporado en la cubeta correspondiente. Otros parámetros estudiados en estos ensayos han sido la influencia de la velocidad del aire y de la humedad relativa del aire.

Ensayos en esta planta piloto con los residuos líquidos de fósforo permitieron ajustar las variables de operación en los rangos mostrados en la Tabla 3. Por otra parte, se determinó que la superficie necesaria de adsorbedores para realizar el tratamiento de 3000 L/día es de 50m² aproximadamente, considerando una producción de la instalación alrededor de 3 L/(m²hora). Esta capacidad de evaporación supone un aumento muy significativo respecto al rendimiento de la evaporación ambiental sin el uso de adsorbedores.

Tabla 3. Rangos de variación de los parámetros del ensayo de ENA

Parámetro	Rango de variación
Humedad relativa (%)	28,9 – 77,8
Temperatura (°C)	15,7 – 18,8
Velocidad aire (m/s)	0,3 – 2,1

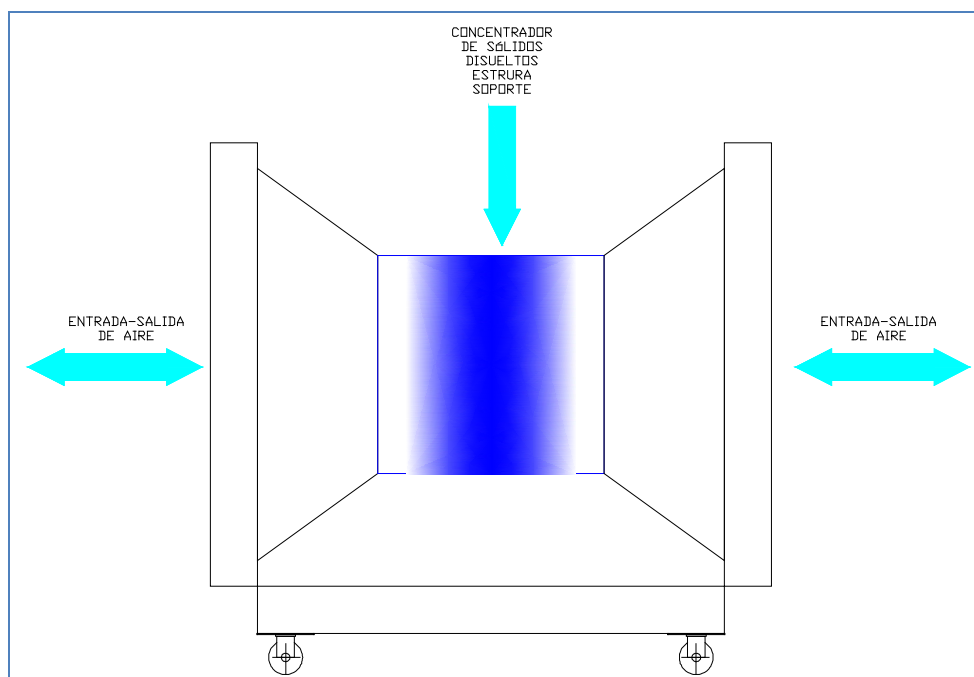
Los principales resultados obtenidos en los ensayos en planta piloto han sido publicados en otros trabajos (Arnal, 2005) y han permitido diseñar una instalación industrial de Evaporación Natural Asistida que se describe en el siguiente apartado.

3.4 La instalación industrial de Evaporación Natural Asistida (ENA)

En la Figura 5 se muestra el esquema de la instalación industrial de Evaporación Natural Asistida diseñada. Esta instalación consta de los siguientes elementos principales:

- Estructura soporte, donde se montan los elementos principales del sistema de evaporación, y donde se produce la cristalización y correspondiente concentración de los sólidos disueltos existentes en el residuo a tratar.
- Conductos de entrada y salida del aire, con los correspondientes instrumentos de medida de los parámetros del mismo (humedad relativa y velocidad).

Figura 5: Esquema de la instalación industrial de Evaporación Natural Asistida (ENA)



Esta instalación es susceptible de ser aplicada para la concentración de cualquier tipo de residuo líquido producido a nivel industrial (previo acondicionamiento), incluidos los tóxicos y peligrosos que no pueden ser tratados mediante evaporación con aporte de calor.

En la actualidad, en esta instalación se están llevando a cabo los ensayos de concentración de los residuos líquidos procedentes del curado de jamones (conductividad entre 10 y 50 mS/cm), pero todavía no se dispone de resultados concluyentes.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el proceso de diseño de una instalación industrial de Evaporación Natural Asistida, a partir de los ensayos iniciales realizados a escala de laboratorio y los ensayos posteriores en planta piloto. Dicha instalación industrial está basada en la tecnología de evaporación natural sin aporte de calor, y emplea como fuerza impulsora el gradiente de humedad relativa del aire y la velocidad del mismo. Además, el aumento de la productividad del sistema se consigue a través del empleo de adsorbentes de un material adecuado, de acuerdo a las características del residuo a tratar. Esta instalación se puede aplicar para la concentración hasta el estado sólido de residuos líquidos de origen industrial, posibilitando la reutilización o valorización de los sólidos cristalizados. Por las características de la técnica empleada (sin aporte de calor, y por lo tanto sin ebullición), resulta especialmente indicada para el tratamiento de residuos líquidos tóxicos y peligrosos, como los radiactivos y aquéllos que puedan contener contaminantes explosivos. En el trabajo se han presentado algunos resultados obtenidos en la aplicación de la tecnología en el tratamiento de residuos líquidos que contienen fósforo, confirmándose la viabilidad técnica del proceso, y el aumento considerable de la capacidad de evaporación por el uso de materiales adsorbentes adecuados.

5. Referencias

- Arnal, J.M. et al. (2005). Concentration of brines from RO desalination plants by natural evaporation. *Desalination*, 182, 435-439.
- Gilron, J. et al. (2003). WAIV-Wind aided intensified evaporation for reduction of desalination brine. *Desalination*, 158, 205-214.
- Leon-Hidalgo, M.C. et al. (2007). Hybrid system of nanofiltration, reverse osmosis and evaporation to treat the brine of inland desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 27, 60-65.
- Macedonio, F. et al. (2011). Wind-Aided Intensified eVaporation (WAIV) and Membrane Crystallizer (MCR) integrated brackish water desalination process: Advantages and drawbacks. *Desalination*, 273, 127-135.
- Yanniotis, S. & Xerodemas, K. (2007). Air humidification for seawater desalination. *Desalination*, 158, 313-319.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la empresa ARTECHA S.A. su colaboración y disponibilidad en la realización del presente trabajo.

Correspondencia (Para más información contacte con):

José Miguel Arnal Arnal
Universitat Politècnica de Valencia, Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM) _ edificio 5L, Camino de Vera s/n, 46022 (Valencia)
Phone: + 34 96 387 70 00 Ext. 76385
Fax: + + 34 96 387 7639
E-mail: jarnala@iqn.upv.es