

**CONAMA 2022**

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

# Desarrollo de la tecnología de Spouted Bed en contactores cónicos para la digestión anaerobia de residuos de biomasa residual



## DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE SPOUTED BED EN CONTACTORES CÓNICOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE BIOMASA RESIDUAL

**Autor Principal:** María José San José (Universidad del País Vasco)

**Otros autores:** Sonia Alvarez (Universidad del País Vasco); Raquel, López (Universidad del País Vasco)

### ÍNDICE

|                          |   |
|--------------------------|---|
| 1. Título                | 1 |
| 2. Palabras Clave        | 3 |
| 3. Resumen               | 3 |
| 4. Introducción          | 3 |
| 5. Metodología           | 4 |
| 5.1. Materiales          | 5 |
| 5.2. Digestión anaerobia | 6 |
| 6. Resultados            | 6 |
| 6.1. Fluidodinámica      | 6 |
| 6.2. Digestión anaerobia | 7 |
| 7. Conclusiones          | 8 |
| 8. Agradecimientos       | 8 |
| 9. Nomenclatura          | 8 |
| 10. Bibliografía         | 9 |

### PALABRAS CLAVE

Digestión anaerobia, biogás, biomasa residual, spouted beds

### RESUMEN

Con objeto de realizar la digestión anaerobia de biomasa residual en un reactor spouted bed cónico, se han delimitado las condiciones del régimen de spouted bed que optimizan el proceso de digestión. Para la producción de biogás, se ha utilizado un digestor spouted bed cónico para la digestión anaerobia de lechos de lodo de depuradora en temperaturas mesofílicas (35-45 °C).

### INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales generan gran cantidad de biomasa residual, susceptible de valorización. El proceso de fabricación del papel genera gran cantidad de residuos, entre los

## DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE SPOUTED BED EN CONTACTORES CÓNICOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE BIOMASA RESIDUAL

que se encuentra el lodo generado en la depuradora de aguas residuales. Una alternativa de aprovechamiento de estos residuos es la digestión anaerobia para la obtención de biogás.

La gran cantidad de residuos orgánicos generados junto con el alto coste de la energía, justifican la necesidad de valorizar energéticamente dichos residuos mediante la obtención de biogás como alternativa sostenible al tratamiento de residuos. El biogás es un gas renovable, con alto contenido en metano, producido a partir de la digestión anaerobia de materia orgánica. La producción de biogás es una de las tecnologías incluidas dentro del ámbito de la Directiva (UE) 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, así como en el Pacto Verde Europeo (Comisión Europea, 2019) por su contribución a la descarbonización, al desarrollo de la economía circular, a la integración de sistemas energéticos, a la transición energética y a la reducción de la dependencia.

La tecnología de contacto fluido-sólido de Spouted Bed en reactores cónicos es apropiada para el tratamiento de sólidos adherentes, debido al vigoroso movimiento cíclico de las partículas y la baja segregación (San José et al., 1994). Esta tecnología se ha aplicado de forma satisfactoria para el tratamiento térmico de biomasa residual (San José et al., 2013a, 2013b, 2014a, 2014b, 2018, 2019, 2021).

En este trabajo se han determinado las condiciones de operación de lechos de biomasa residual e inóculo en un reactor spouted bed cónico, delimitando las condiciones del régimen de spouted bed que optimizan el proceso y la valorización de biomasa residual por digestión anaerobia en un rango de temperatura mesofílico (35-45 °C).

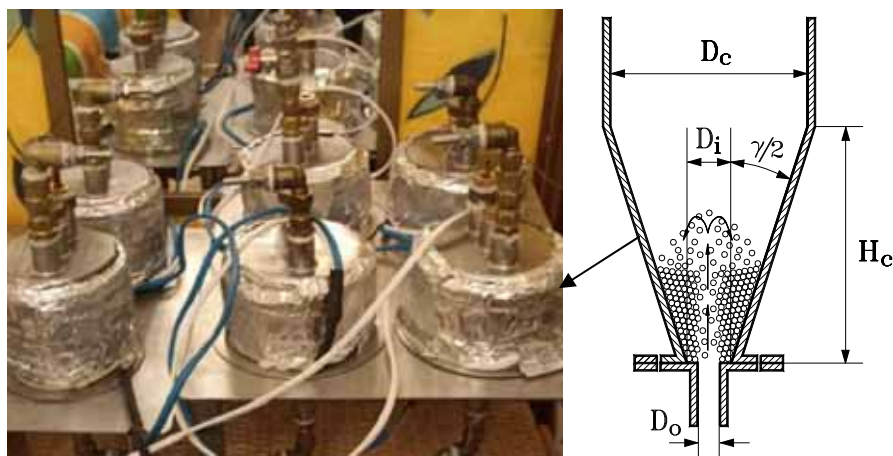
## METODOLOGÍA

La digestión anaerobia de lodo de depuradora de la industria papelera con inóculo de bacterias anaerobias se ha llevado a cabo en un reactor spouted bed cónico a escala de laboratorio, Figura 1, cuyos factores geométricos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Factores geométricos del digestor spouted bed cónico

|  |                |                               |
|--|----------------|-------------------------------|
| Angulo del cono                              | $\gamma$ (°)   | 36                            |
| Diámetro de sección cilíndrica               | $D_c$ (m)      | 0.10                          |
| Diámetro de la base                          | $D_i$ (m)      | 0.03                          |
| Diámetro de entrada del fluido               | $D_o$ (m)      | 0.02                          |
| Diámetro de la superficie superior del lecho | $D_b$ (m)      | $D_i + 2 H_o \tan (\gamma/2)$ |
| Altura de la sección cónica                  | $H_c$ (m)      | 0.13                          |
| Altura de la sección cilíndrica              | $H_{cil}$ (m)  | 0.10                          |
| Espesor del aislamiento                      | $X_{ais}$ (mm) | 2                             |

## DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE SPOUTED BED EN CONTACTORES CÓNICOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE BIOMASA RESIDUAL



**Figura 1.** (a) Digestores spouted beds cónicos y (b) geometría del digestor spouted bed cónico en el régimen de spouted bed

### Materiales

La biomasa residual utilizada en la digestión ha consistido en lodo de depuradora de la Industria papelera, Figura 2, cuyas propiedades se recogen en la Tabla 2. El contenido de humedad de los sólidos se ha determinado mediante el higrómetro Mettler Toledo HB43-S Halogen. La biomasa residual se ha triturado hasta tamaños de partícula más pequeños en el molino Fritz Pulverisette y se han tamizado en una tamizadora (Filtra FTI-0300), antes de alimentarlos al digestor.



**Figura 2.** Lodo de depuradora

**Tabla 2.** Propiedades de la biomasa residual

| Propiedad                               | Lodo de depuradora |
|---|--------------------|
| Densidad, $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 1252               |
| Humedad % (b.h.)                        | 48-50              |
| Diámetro de partícula, $d_p$ (mm)       | 1-4                |
| PCI (MJ/kg)                             | 12.1               |

## DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE SPOUTED BED EN CONTACTORES CÓNICOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE BIOMASA RESIDUAL

### Digestión anaerobia

La digestión se llevó a cabo cargando cada reactor spouted bed cónico con diferentes porcentajes de sustrato tras la eliminación de lignina mediante un líquido iónico e inóculo previamente aclimatado de bacterias anaerobias metanogénicas, hasta el contenido de sólidos totales inicial deseado. El fluido se introduce por la base del reactor, lo que asegura un buen contacto entre el sustrato y el inóculo. El fluido abre un canal central denominado zona de spout por donde asciende el lecho describiendo una fuente en la parte superior y desciende por la zona anular del lecho, en un movimiento cíclico. Parte del lecho es aspirado por la bomba que lo recircula al lecho.

La digestión se llevó a cabo durante un periodo comprendido de entre 3 y 6 semanas en el rango de temperatura mesofílico (35-45 °C). El biogás generado se recogió en bolsas Tedlar, cuantificando la producción de biogás con el tiempo a partir de la medida del volumen de biogás generado mediante un dispositivo cilíndrico de desplazamiento positivo diseñado al efecto. La concentración del biogás producido se determinó mediante un analizador Geotech Biogas-5000. Los parámetros característicos pH, T, ácidos orgánicos volátiles (FOS), capacidad buffer (TAC) e índice FOS/TAC se monitorizaron diariamente mediante el valorador HACH Titralab AT1000.

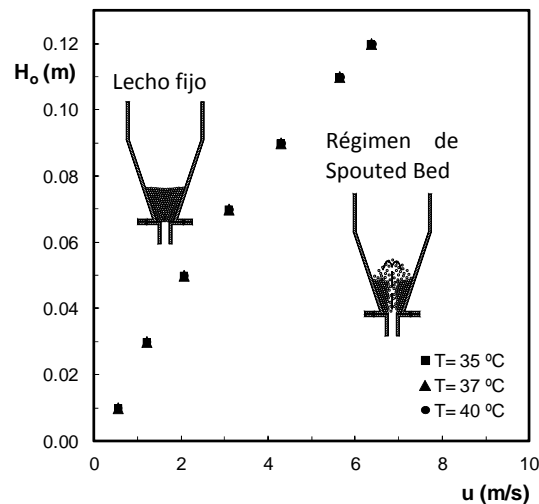
## RESULTADOS

### Fluidodinámica

Teniendo como objetivo la optimación del proceso de digestión anaerobia de biomasa residual, se han obtenido las condiciones de operación de lechos de lodo de depuradora de la Industria papelera con inóculo en el digestor spouted bed cónico, en el régimen de spouted bed, en un rango de temperatura mesofílico (35-45 °C). Asimismo se ha determinado experimentalmente la velocidad mínima del régimen de spouted bed, caracterizado por fluctuaciones de la pérdida de carga con una desviación estándar inferior a 10 Pa (San José y Alvarez, 2015).

En la Figura 3, se muestra el mapa de operación en el que se representa la altura de los lechos de lodo de depuradora con el inóculo frente a la velocidad del fluido, en un digestor spouted bed cónico a escala de laboratorio a diferentes temperaturas. En el mapa de operación se delimitan las condiciones del régimen de spouted bed. Se observa que al ir aumentando la velocidad del fluido el lecho pasa del lecho fijo al a la velocidad mínima de spouting. Como se observa las velocidades mínimas de spouting de los lechos de lodo de depuradora con inóculo son muy similares a las temperaturas estudiadas.

## DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE SPOUTED BED EN CONTACTORES CÓNICOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE BIOMASA RESIDUAL



**Figura 3.** Mapa de operación de lechos de biomasa residual en un reactor spouted bed cónico

### Digestión anaerobia

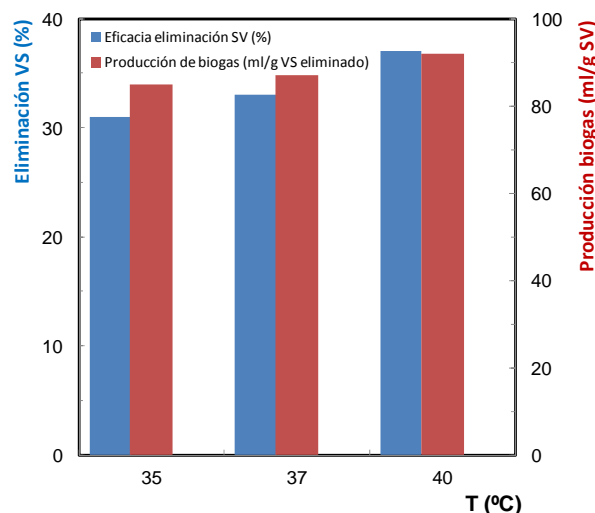
La digestión anaerobia de lodo de depuradora con inóculo se llevó a cabo en digestores spouted bed cónicos en el régimen de spouted bed en el rangos de temperatura mesofílico (35-45 °C) durante un tiempo comprendido entre 21 y 42 días monitorizando diariamente los parámetros característicos. Pevio a la digestión se deslignificó el sustrato mediante un líquido iónico y se aclimató el inóculo de bacterias anaerobias metanogénicas.

En la Figura 4 se muestran a modo de ejemplo la eficacia de eliminación de sólidos volátiles y la producción de biogás obtenidas en la digestión de lodo de depuradora a diferentes temperaturas (35, 37 y 40 °C) en un reactor spouted bed cónico. En la Tabla 3 se resumen los porcentajes de eliminación de sólidos volátiles y la producción de biogás obtenidos para cada una de las temperaturas. Se observa que la digestión anaerobia permite eliminar entre 31 y 46% de sólidos volátiles con una producción de biogás entre 85 y 94 ml/g SV. Cabe destacar que un aumento de temperatura mejora tanto la eliminación de sólidos volátiles como la producción de biogás.

**Tabla 3.** Eficacia de eliminación de sólidos volátiles y producción de biogás.

| Temperatura (°C) | Eficacia eliminación SV (%) | Biogás (ml/g VS eliminado) |
|------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 35               | 31                          | 85                         |
| 37               | 33                          | 87                         |
| 40               | 46                          | 94                         |

## DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE SPOUTED BED EN CONTACTORES CÓNICOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE BIOMASA RESIDUAL



**Figura 4.** Eliminación de sólidos volátiles y producción de biogás en la digestión de biomasa residual a 35, 37 y 40 °C.

## CONCLUSIONES

Se ha aplicado la tecnología de Spouted Bed en un digestor spouted bed cónico para la digestión anaerobia de residuos de biomasa residual, lodo de depuradora de la Industria papelera. Se han delimitado las condiciones de operación de lechos de lodo de depuradora, en un reactor spouted bed cónico en el régimen de spouted bed en un rango de temperatura mesofílico (35-45 °C). La velocidad mínima de spouting, determinada experimentalmente a partir de las fluctuaciones de presión, de lechos de lodo de depuradora con inóculo es muy parecida a las temperaturas de operación empleadas.

La digestión de lodo de depuradora en condiciones termofílicas permite una eliminación de sólidos volátiles superior al 31% con una producción de biogás superior a 85 ml/g SV, que mejora con la temperatura.

Se concluye que los reactores spouted beds cónicos presentan buenas perspectivas para la producción de biogás mediante digestión anaerobia de biomasa residual y que se podrían emplear para la degradación anaerobia industrial.

## Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2021-126331OB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por FEDER una manera de hacer Europa.

## NOMENCLATURA

$D_b, D_c, D_i, D_o$       diámetro superior del lecho estancado, del cono, de la base del reactor y de la entrada del gas, respectivamente (m)

$d_p$                       diámetro de partícula (m)



## DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE SPOUTED BED EN CONTACTORES CÓNICOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS DE BIOMASA RESIDUAL

|                     |   |
|---------------------|---|
| $H_c, H_{cil}, H_o$ | altura de la sección cónica, de la sección cilíndrica y del lecho estancado (m) |
| $X_{acero}$         | espesor de la pared del reactor (m)   |
| $u, u_{ms}$         | velocidad del gas y velocidad mínima de spouting, respectivamente (m/s)         |
| PCI                 | poder calorífico inferior   |
| Símbolos            |   |
| $\gamma$            | ángulo del reactor (deg)  |
| $\rho_s$            | densidad de partícula ( $\text{kg/m}^3$ )                                       |

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Comisión Europea. (2019). Pacto Verde Europeo. (COM(2019) 640 final).
- [2] Directiva (UE) 2018/2001, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Diario Oficial de la Unión Europea, L328, 82-209.
- [3] San José, M.J., Olazar, M., Peñas, F.J., Bilbao, J. (1994). Segregation in conical spouted beds with binary and ternary mixtures of equidensity spherical particles. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 33, 1838-1844. <https://doi.org/10.1021/ie00031a025>.
- [4] San José, M.J., Alvarez, S., Peñas, F.J., García, I. (2013a). Cycle Time in Draft Tube Conical Spouted Bed Dryer for Sludge from Paper Industry. *Chemical Engineering Science*, 100, 413-420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2013.02.058>.
- [5] San José, M.J., Alvarez, S., García, I. Peñas, F.J. (2013b). A novel conical combustor for thermal exploitation of vineyard pruning wastes. *Fuel*, 110, 178-184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.039>.
- [6] San José, M.J., Alvarez, S., Peñas, F.J., García, I. (2014a). Thermal exploitation of fruit tree pruning wastes in a novel conical spouted bed combustor. *Chemical Engineering Journal*, 238, 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.073>.
- [7] San José, M.J., Alvarez, S., García, I. Peñas, F.J. (2014b). Conical spouted bed combustor in clean valorization of sludge wastes from Paper industry for obtaining energy. *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 672-678. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2014.01.008>.
- [8] San José, M.J., Alvarez, S. (2015). Bed pressure drop in conical spouted beds with a draft tube in thermal treatment of wastes of different particle diameter, density and shape. *Chemical Engineering Technology*, 38(4), 709-714.
- [9] San José, M.J., Alvarez, S., López, R. (2018). Catalytic combustion of vineyard pruning wastes in a conical spouted bed combustor. *Catalysis Today*, 305, 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.11.020>.
- [10] San José, M.J., Alvarez, S., López, R. (2019). Drying of industrial sludge waste in a conical spouted bed dryer. Effect of air temperature and air velocity. *Drying Technology*, 37, 118-128. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1441155>.
- [11] San José, M.J., Alvarez, S., López, R. (2021). Drying kinetics of sawdust in conical spouted beds: Influence of geometric and operational factors. *Fuel Processing Technology*, 221, 106950.