

(04-030) - SELECTION OF THE MOST SUITABLE BIODRYING REACTOR DESIGN FOR BIOSOLID DRYING FROM URBAN SOLID WASTE TREATMENT PLANTS

Muzaber, Víctor Gamal ¹; Gallardo Izquierdo, Antonio ¹; Colomer Mendoza, Francisco J. ¹

¹ Universitat Jaume I

Biodrying is a biological process that harnesses the metabolic heat of aerobic microorganisms to eliminate moisture. To control the parameters influencing biodrying on a general level, reactors are commonly employed. This study aims to identify a design that optimally utilizes biologically generated energy. To achieve this, an extensive literature review and analysis of various experiments conducted in biodrying reactors with their respective designs were undertaken. Subsequently, a comparison of the advantages and disadvantages of each design was conducted. Design criteria for evaluating different reactors considered the environmental influence, production scale and configuration (batch or continuous), arrangement (vertical or horizontal), type (static or rotary), and aeration system. To choose the best design, a multicriteria decision-making method involving experts in aerobic biological processes was applied. The goal was to select the most suitable design for biodrying rejects from urban solid waste mechanical-biological treatment plants. The final conclusion was that the optimal design involves a static vertical arrangement with forced convection aeration and mechanical turning

Keywords: metabolic heat; rejects; biodrying reactor; multicriteria selection

SELECCIÓN DEL DISEÑO MAS ADECUADO DE REACTORES PARA BIOSECADO DE RECHAZOS PROCEDENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

El biosecado es un proceso biológico que utiliza el calor metabólico de los microorganismos aeróbicos para eliminar la humedad. Para poder controlar los parámetros que influyen en el biosecado a nivel general se suelen utilizar reactores. En este trabajo se busca un diseño que permita el mejor aprovechamiento de la energía generada biológicamente. Para esto se realizó una extensa búsqueda bibliográfica y un análisis de diferentes experimentaciones llevadas a cabo en reactores de biosecado con sus respectivos diseños, para luego comparar las ventajas y desventajas que presenta cada uno. Como criterio de diseño para evaluar los distintos reactores se tuvo en cuenta la influencia del entorno, la escala y configuración de la producción (por lote o continua), su disposición (vertical u horizontal), el tipo (estático o rotatorio) y el sistema de aireación. Para elegir el mejor diseño se aplicó un método de decisión multicriterio donde participaron expertos en procesos biológicos aeróbicos y así poder seleccionar el diseño más apropiado para el biosecado de rechazos procedentes de plantas de tratamiento mecánico biológico de residuos sólidos urbanos. Como resultado final se concluyó que el mejor diseño responde a la disposición vertical estática por aireación mediante convección forzada y por volteo mecánico.

Palabras clave: calor metabólico; rechazos; reactor de biosecado; selección multicriterio

Correspondencia: Víctor Gamal Muzaber (gamal@uji.es)

Agradecimientos: Al Proyecto TED2021-131142B-I00 de investigación financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR y titulado "Aplicación del biosecado en la elaboración de combustible sólido



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

recuperado procedente de plantas de compostaje de residuos sólidos urbanos" y al Proyecto UJI-B2022-25 de investigación financiado por la Universitat Jaume I y titulado "Aplicación del biosecado en la fabricación de combustible sólido recuperado procedente de plantas de compostaje de residuos sólidos urbanos".

1. Introducción

El biosecado consiste en eliminar total o parcialmente la humedad por el incremento de temperatura provocado por la fermentación aerobia de materiales biodegradables. Esta fermentación se produce debido a la acción de microorganismos, cuyo proceso biológico de desarrollo es exotérmico (Colomer-Mendoza et al., 2013; Yuan et al., 2018). En la búsqueda de un método eficiente y sostenible para llevar a cabo el biosecado de residuos, se considera necesario enfocar la investigación sobre el diseño del reactor dado que es el espacio físico donde se deben establecer las condiciones adecuadas para que se lleve a cabo la reacción biológica aeróbica. Por lo tanto, se tiene que plantear un diseño que permita un determinado grado de control sobre las diferentes variables, de forma tal que se favorezca la actividad de los microorganismos con el fin de eliminar de forma eficiente el agua contenida en los residuos. Esta disminución de la humedad tiene como ventajas la disminución de peso (Psaltis y Komilis, 2019), lo cual abarata el transporte, o el uso del residuo como combustible alternativo.

Para evaluar empíricamente el diseño propuesto para un reactor de biosecado se requiere el desarrollo de un prototipo que permita realizar el seguimiento del avance del proceso y una evaluación del comportamiento de las variables manipuladas para lograr su optimización a, a través de una serie de ensayos donde se generen diferentes condiciones dentro del reactor, se podrá conocer el efecto de las diferentes variables que determinan la eficiencia del biosecado.

En este trabajo se estudiarán los experimentos científicos de biosecado llevadas a cabo por diferentes investigadores, quienes propusieron un diseño específico del reactor para posteriormente ejecutarlo e iniciar su puesta en marcha. El objetivo de cada una de estas investigaciones fue analizar los resultados obtenidos mediante los respectivos experimentos llevados a cabo en condiciones diferentes, y de esta manera saber si el efecto de las variables estudiadas produjo un cambio significativo en la eficiencia del proceso para eliminar la humedad de los residuos. Se debe tener en cuenta que el tipo de instrumentos de medición con los que cuente el reactor dependerá de las variables en las cuales se pretenda analizar en la investigación. Los diseños analizados corresponden a reactores de escala laboratorio y de planta piloto, dado que el objetivo principal es investigativo.

A partir de las investigaciones consideradas en este trabajo se establecen tres criterios para clasificar el diseño de los diferentes reactores de biosecado: según la disposición vertical u horizontal, su tipo, ya sea estático o rotatorio, y por último el sistema de aireación principal y secundaria utilizado.

Para elegir el mejor diseño del reactor de biosecado, se propone el método de decisión multicriterio AHP (por sus siglas en inglés, *Analytic Hierarchy Process*), ampliamente utilizado en el ámbito de la ingeniería. Un ejemplo de su aplicación es el trabajo de Rao et al. (2021), donde dicho método se utilizó para seleccionar diferentes diseños de reactores para la producción de energía nuclear. Considerando que el método AHP contempla la participación de expertos para ponderar los criterios establecidos, este trabajo aplicado al biosecado contó con seis especialistas en procesos aeróbicos aplicados a residuos. De esta manera se busca que la selección del diseño sea más respaldada y precisa.

2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es determinar el diseño más adecuado para un reactor de biosecado de rechazos procedentes de plantas de tratamiento mecánico-biológico (PTMB) de residuos sólidos urbanos a partir de un análisis comparativo entre los diferentes diseños existentes para establecer las ventajas y desventajas que presenta cada uno. Para esto es

necesario evaluar diferentes investigaciones y estudios, y así establecer un criterio técnico integral y con fundamentos que permita desarrollar un diseño propio para un reactor de biosecado.

3. Metodología

Para establecer los criterios que se requieren para evaluar el diseño de un reactor de biosecado se consideran los siguientes puntos:

- Influencia del entorno sobre el reactor.
- Configuración de la producción por lotes (batch) o continua del reactor.
- Escala de los experimentos de biosecado.
- Clasificación de los reactores de biosecado.
- Análisis de los reactores diseñados en diferentes investigaciones.
- Elección del reactor a utilizar en la fase experimental.

3.1 Influencia del entorno sobre el reactor

En un reactor biológico destinado al biosecado de residuos, en primer lugar, es importante tener en cuenta el grado de control que se puede ejercer sobre las variables del proceso. Esto es complicado de lograr en sistemas abiertos al existir una mayor influencia del entorno debido a la exposición a variaciones climáticas como tales como la radiación solar a diferentes horas del día (Robles-Martínez, 2012), o para el caso de lluvias que pueden aumentar el contenido de humedad de los residuos. A su vez, en estos sistemas el calor metabólico generado se pierde fácilmente, y en el caso de una temperatura ambiente significativamente menor a la desarrollada por el reactor puede afectar la actividad microbiana hasta detener la reacción. Otra variable externa a tener en cuenta es la humedad relativa del aire ya que de ésta depende la capacidad del aire para absorber y arrastrar el agua evaporada de la masa húmeda de residuos (Pilnáček et al., 2021). Si bien en estos sistemas es difícil obtener una medición de la concentración de gases generados, (Contreras-Cisneros et al., 2021) utilizaron puntos de muestreo que consistían en tubos de PVC de 20 mm ubicados horizontalmente a diferentes alturas de la pila de residuos.

Con el fin de atenuar el impacto de las desventajas antes citadas, se utilizan los sistemas cerrados para el desarrollo del biosecado que consiste en la cobertura de los residuos y el revestimiento de toda su superficie con material aislante. De esta manera se busca cumplir el objetivo principal del biosecado, mantener una temperatura elevada el mayor tiempo posible con el fin de favorecer la eliminación de la humedad (Ma et al., 2016). En el balance de energía del proceso se identifican las pérdidas del calor metabólico generado que pueden darse mediante diferentes mecanismos de transferencia (Huiliñir & Villegas, 2015).

Para reducir las pérdidas de calor por convección debido a las condiciones del aire inyectado desde el exterior, suelen aplicarse estrategias tales como cambiar un flujo continuo por un flujo intermitente, de manera tal que el volumen total de aire utilizado sea menor (Yuan et al., 2018). Otros métodos, como los que aplicaron (Mohammed et al., 2017), buscan evitar las pérdidas de calor por convección mediante el uso de energía externa para elevar la temperatura del aire antes de inyectarlo al reactor y de esta manera también se logra que su humedad relativa disminuya, aumentando la capacidad de absorber el agua evaporada de la masa de residuos.

En función del análisis realizado en cuanto al efecto del entorno en este trabajo se evaluarán investigaciones que hayan realizado experimentos de biosecado en sistemas cerrados.

3.2 Configuración de producción por lotes (*batch*) o continua del reactor

Al evaluar el diseño del reactor biológico aerobio para biosecado, un aspecto elemental es decidir la configuración del proceso, ya sea mediante una producción por lote (batch) o de forma continua. Durante el análisis de la bibliografía sobre la producción en continuo para procesos biológicos aerobios aplicados a residuos, se encontró una preponderancia de investigaciones enfocadas en el compostaje. Este campo está bien desarrollado con numerosas publicaciones científicas que han estudiado la producción continua). Por ejemplo, Zarkadas et al. (2018) investigaron la producción continua en un reactor rotatorio, Manthos et al. (2022) utilizaron un reactor comercial, y (Rochaeni et al., 2021) se centraron en determinar el rendimiento del compostaje termofílico continuo (CTC). En todos estos casos, la alimentación de residuos a los reactores se realizó de forma continua.

En contraste, para el biosecado, solo se encontró una publicación científica que evalúa este proceso como parte de un sistema integrado con la gasificación en fábricas de pulpa y papel (Hamidian et al., 2017). A partir de esta observación, se han identificado posibles razones para la escasa disponibilidad de estudios e investigaciones sobre el biosecado de RSU y rechazos para una configuración de producción continua.

- Dificultad en trasegar este tipo de material por conductos y válvulas, mediante el uso de bombas de desplazamiento positivo.
- Limitación de recursos y equipamiento ya que se requiere mayor inversión en maquinaria, tuberías, válvulas, accesorios e instrumentación de medición.
- Cuando el reactor es destinado a fines científicos, con el tipo batch se puede entender mejor el proceso biológico desarrollado y obtener datos más específicos.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se decide enfocar el análisis de experimentos realizados con reactores de configuración tipo batch. Esto se debe a que es necesario contar con una cantidad sustancial de información de fuentes bibliográficas diversas que permita establecer criterios de diseño.

3.3 Escala de los experimentos de biosecado

Es importante indicar que el hecho de clasificar un experimento a escala laboratorio o piloto no se determina únicamente en función del volumen del reactor, sino que también influye el uso que se le dará a los datos obtenidos. Es posible establecer que cuando un experimento se desarrolla a escala laboratorio, la finalidad del estudio es claramente científica dado que el principal objetivo es obtener información relevante que permita evaluar el comportamiento de la reacción biológica ante diferentes condiciones, mientras que cuando un experimento se escala a una planta piloto, el objetivo es obtener datos que sean representativos del proceso biológico que ocurriría a escala industrial.

Para establecer un rango que permita clasificar los reactores de biosecado, se evaluaron el volumen de los reactores de biosecado y el objetivo de la correspondiente investigación en el compilado realizado por (Tun & Juchelková, 2019), compuesto por 28 experimentos con reactores para RSU y combustible sólido recuperado (CSR). Esta misma evaluación se aplicó a las investigaciones del compilado realizado por (dos Reis et al., 2020) para biosecado de lodos de depuradoras. A partir del análisis realizado se fijan los siguientes rangos para determinar la escala de un reactor de biosecado:

- De 0 L a 800 L: escala laboratorio
- De 600 L a 9.000 L: planta piloto
- Mayor a 8000 L: escala industrial
- Entre 600 L y 800 L: recurrir a las columnas 1 y 2 de la tabla 1 para determinar si es escala laboratorio o planta piloto según el objetivo de la investigación.
- Entre 8.000 L y 9.000 L: recurrir a las columnas 2 y 3 de la tabla 1 para determinar si es planta piloto o escala industrial.

Tabla 1: Objetivos de las investigaciones según la escala del reactor

Objetivo de la investigación según su escala		
Laboratorio	Piloto	Industrial
Efecto de la variación del flujo de aire	Efecto de aumentar la altura del reactor.	Evaluar la calidad del producto de biosecado.
Analizar el perfil de temperatura	Analizar la pérdida de peso y volumen.	Monitorizar rendimientos del proceso biológico
Efecto de la inoculación	Evaluar la humedad eliminada	Comparar métodos de secado
Evaluar la acción enzimática	Comparar diferentes procesos según el consumo de energía	Evaluar la viabilidad del biosecado
Analizar las emisiones de gases	Evaluar el efecto del volteo mecánico	
Efecto de la humedad inicial		
Agregado de agente texturizante		

De la tabla 1 se concluye que para fijar la escala del experimento se debe tener en claro el objetivo de la investigación a desarrollar, principalmente en las zonas donde conviven los diferentes rangos establecidos en este punto del trabajo. El objetivo en diferentes investigaciones analizadas fue evaluar si los cambios de una variable determinada producían un efecto significativo sobre la eliminación de humedad. Algunas de estas se enfocaron en analizar la influencia de diferentes caudales de aire y el mecanismo de inyección de éste ((Colomer-Mendoza et al., 2013; Ab Jalil et al., 2016; Yuan et al., 2018), mientras que otros evaluaron el efecto de la humedad inicial del residuo utilizado (Kristanto & Zikrina, 2017); s, 2015). Así mismo, existen publicaciones que examinaron en qué medida el contenido de sólidos volátiles biodegradables impacta en la eficacia del proceso (Hao & Jahng, 2019); (Guerra-Gorostegi et al., 2021). Para evaluar el nivel de influencia de la frecuencia del volteo mecánico sobre el biosecado se observa que diferentes autores recurren a reactores de mayor escala, como es el caso de Cai et al. (2015) que desarrollaron su experimento a escala piloto de 1600 L para analizar las pérdidas de calor en el reactor de biosecado y la evaporación de agua lograda. El volteo mecánico a escala laboratorio suele realizarse de forma manual, mientras que en plantas piloto se requieren motores eléctricos para generar el movimiento de la masa de residuos que además representa un consumo de energía (Somsai et al., 2015; Patcharavongsiri et al., 2019; Orozco-Álvarez et al., 2022).

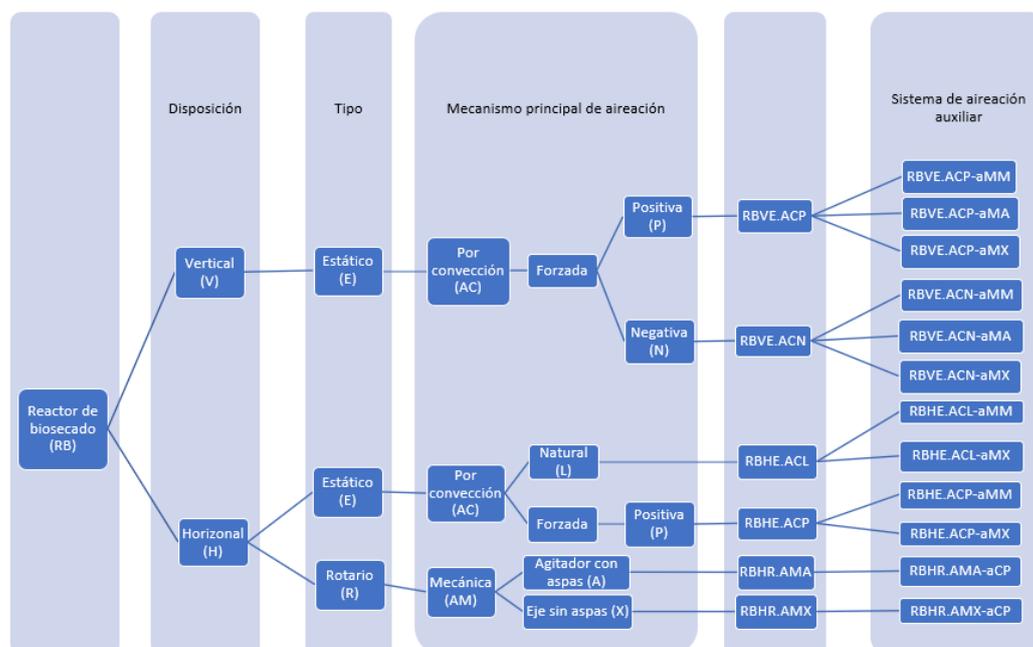
3.4 Clasificación de reactores para biosecado a escala laboratorio y en plantas piloto

A partir del análisis realizado en los puntos anteriores, para desarrollar los criterios de diseño de un reactor de biosecado se establece como punto de partida aquellas investigaciones científicas donde se haya experimentado el biosecado con un reactor de configuración batch a escala laboratorio o en planta piloto. Una vez fijadas estas limitaciones, se encontraron 16 diseños de reactores en investigaciones llevadas a cabo principalmente sobre RSU, rechazos de RSU, y residuos agrícolas. Para analizar cada una de las investigaciones seleccionadas se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- que el biosecado se aplique a RSU y rechazos.
- que se indique la geometría, dimensiones y materiales constructivos del reactor.
- que se defina el método de aireación aplicado.

Con la información obtenida se procedió a la clasificación de los reactores como se indica en la figura 1 donde aparece la clasificación según disposición, tipo y mecanismo principal de aireación del reactor de biosecado. No obstante, para completar dicha clasificación será necesario tener en cuenta aquellos diseños donde el sistema primario de aireación incluye un sistema auxiliar para combinar la aireación por convección con la mecánica (volteo) o viceversa. Para estos casos en la última columna de la figura 1, la aireación auxiliar se representa con la letra “a”, y se incorpora el volteo mecánico manual (M).

Figura 1: Método de clasificación de reactores existentes utilizados en investigaciones sobre biosecado



Del método de clasificación resultan doce codificaciones posibles para asignar a los diseños de reactores de biosecado desarrollados en diferentes investigaciones. De esta manera es posible agruparlos según las consideraciones básicas de diseño contempladas y posteriormente complementar el análisis del diseño incorporando las especificaciones técnicas particulares que cada autor estableció en el reactor con el cual llevo a cabo los experimentos de su investigación. A continuación, se presenta un resumen con los principales aspectos de diseño de los 16 reactores analizados:

- Disposición y tipos de reactores: de los estáticos se analizaron 7 verticales y 9 horizontales, De los horizontales 2 reactores incorporaron en su diseño el efecto invernadero y 3 fueron rotatorios.
- Escalas: 11 fueron de laboratorio y 5 de planta piloto. Cabe destacar que todos los rectores verticales fueron considerados de laboratorio al encontrarse en un rango de volumen de 20,35 a 565 L. Al analizar los horizontales, 4 de ellos se consideraron de laboratorio para un rango de 50 a 800 L, mientras que los 2 reactores horizontales que contemplaban la radiación solar por efecto invernadero fueron considerados planta piloto con volúmenes de 8.900 L y 43.500 L. Si bien la capacidad de este último reactor escapa del rango establecido en este trabajo para el caso de plantas piloto, sus autores Ngamket et al. (2020) lo consideraron como tal. En el caso de tambores rotatorios, el reactor de 200 L fue de escala laboratorio, y los dos restantes de planta piloto con una capacidad de 575 L y 2.000 L.
- Fracción orgánica en los residuos: al considerar los reactores que utilizaron los RSU o CSR como materia prima, en el caso de los de tipo vertical, el contenido de materia

orgánica fue del 44% al 70%, para los horizontales fue de 48% al 95%, y para los rotatorios el contenido de materia orgánica de los RSU utilizados fue cercano al 60%.

- Pretratamiento aplicado al residuo: para conocer en qué casos aplicar un pretratamiento para reducción de tamaño del material, se observa que dos de los siete reactores verticales aplicaron una clasificación previa al tamaño del RSU o CSR a biosecar, mientras que la mitad de los seis reactores horizontales aplicaron trituración, y en dos de los tres tambores rotatorios evaluados se utilizaron residuos con diámetros de partículas determinados.
- Materiales utilizados en la construcción del reactor: se observa el uso de plásticos como PEAD, PVC y Acrílico, y también estructuras metálicas de acero y acero inoxidable. Para el reactor vertical se usan todos los materiales antes nombrados, excepto PEAD. Para los tambores rotatorios se utilizó acero, y para los horizontales estáticos se utiliza principalmente plástico de PEAD, como también acero y acero inoxidable.
- Materiales de aislante térmico: se utilizaron materiales plásticos como el poliuretano con un espesor de 20 a 60 mm y poliestireno con espesor de entre 20 a 25 mm. Algunos diseños implementaron materiales de base orgánica como algodón hueco de 100 mm y corcho, como así también materiales sintéticos como fibra de vidrio, y lana de roca de 25 mm.

3.5 Determinación del diseño más apropiado para el biosecado de RSU

En este apartado se analizarán tres tipos de reactores de biosecado considerados en la figura 1, los verticales estáticos (V), horizontales estáticos (H) y horizontales de tambor rotatorio (R). A partir de este subnivel es posible deducir la alternativa más adecuada en función de la eficiencia de biosecado lograda en las diferentes investigaciones analizadas. Se considerarán aquellas investigaciones que hayan utilizado RSU como materia prima del proceso para poder realizar una comparación adecuada dado que el tipo de residuo utilizado afecta la eficiencia del biosecado. Si bien se han establecido 16 alternativas de diseños de reactores se deben considerar las circunstancias y las condiciones de contorno propias de cada investigación. Para hallar el diseño más apropiado se utilizará el método de decisión multicriterio AHP (por sus siglas en inglés *analytically hierarchy process*). De esta manera se podrá asignar valores ponderados a diferentes criterios relevantes que permitan llegar a la opción más adecuada.

A continuación, se describe de forma breve el procedimiento a seguir:

1. Identificar el residuo a tratar y las circunstancias que lo rodean. En el caso de esta investigación se utilizará como materia prima los rechazos generados durante la etapa biológica de una PTMB de RSU.
2. Identificar los criterios clave para el correcto desarrollo y viabilidad del proceso de biosecado aplicado a RSU y/o rechazos. En este punto se considerarán las principales variables y parámetros que afectan a este proceso.
3. Asignar ponderaciones a los criterios seleccionados: es necesario fijar la importancia de cada criterio a partir de un panel de expertos.
4. Evaluar las alternativas: para cada diseño de reactor, se debe evaluar el desempeño en función de cada criterio identificado para obtener la puntuación final de cada opción.
5. Selección de la mejor opción obtenida.

4. Resultados

A continuación se presentan los resultados del análisis de diferentes investigaciones sobre biosecado, los cuales permitieron seleccionar el diseño más adecuado para un reactor siguiendo un método analítico para decisión multicriterio.

4.1 Identificación de los criterios para evaluar las alternativas propuestas

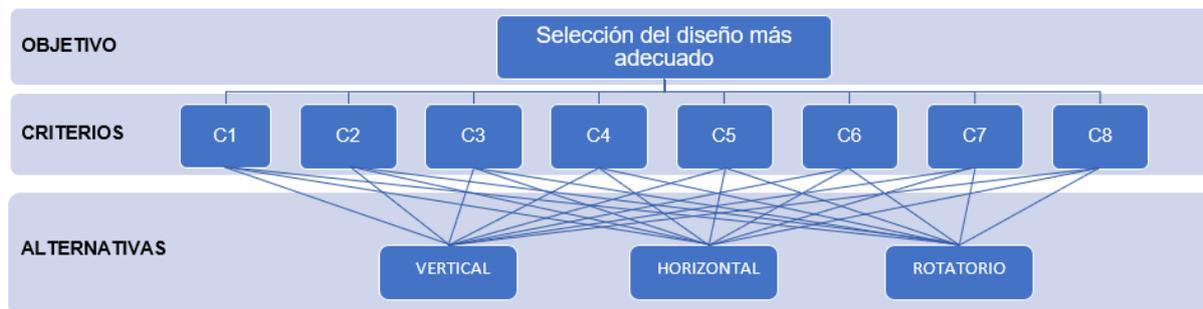
Para la selección de criterios se tuvieron en cuenta consideraciones técnicas, económicas y ambientales. Los factores considerados son los siguientes:

- Temperatura alcanzada durante el proceso (C1): la temperatura es un parámetro crítico en el biosecado (Zhao et al., 2010), ya que determina la existencia de actividad microbiana mediante la generación de calor. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será el calor disponible para transmitirse al resto de la masa de residuos y así a transformar los residuos húmedos en un producto final más seco y manejable.
- Grado de humedad eliminada durante el proceso (C2): la eliminación eficiente de la humedad es esencial para reducir el peso y volumen de los RSU. Cuando el biosecado se aplica en RSU o sus rechazos para la producción de CSR, este parámetro es de mayor importancia. Cuanto mayor sea el porcentaje de humedad eliminada mejor será el proceso (Hao & Jahng, 2019).
- Tiempo requerido para el proceso (C3): el tiempo es un factor clave para la viabilidad económica ya que determina la producción de cada lote. Además, un diseño que logre la mayor reducción de la humedad en el menor tiempo posible será el más adecuado (Yuan et al., 2018).
- Homogeneización de la masa de residuos (C4): cuando el diseño del reactor favorece la homogeneización se logra una distribución uniforme de la masa de residuos, facilitando la transmisión de calor y pérdida de humedad de forma uniforme. Se reduce la variabilidad en los diferentes puntos del dentro del reactor, y también aumenta la calidad del producto final
- Frecuencia de volteo (C5): cuanto más homogénea se encuentra la masa, mejor se produce el biosecado. Un diseño que permita una distribución homogénea del material sin requerir frecuentes volteos mecánicos será más adecuado. También considerar que el volteo se utiliza para mejorar la aireación como en el caso de los rotatorios.
- Necesidad de inyección de aire (C6): la convección forzada aumenta el consumo de energía, por lo que un diseño que minimice la necesidad de convección forzada será más eficiente desde el punto de vista energético.
- Necesidad de incorporación de agentes texturizantes (C7): reducir la dependencia de agentes que mejoren la porosidad de la masa de residuos puede simplificar el proceso y disminuir los costos asociados al almacenaje y manipulación de este material adicional. Un diseño que requiera una cantidad mínima de agentes texturizantes será más eficiente.
- Facilidad de operación (C8): este punto hace referencia a las operaciones relacionadas para llevar a cabo el proceso, teniéndose en cuenta el grado de reducción de tamaño requerido, el uso de motores eléctricos y sistemas mecánicos-para el caso de reactores rotatorios dado que esto implica un mantenimiento periódico y personal cualificado para esto. Se tendrá en cuenta también tanto la facilidad para toma de muestras en diferentes puntos del reactor como la accesibilidad para instrumentos de medición y control que permitan observar la evolución del proceso. Un diseño que incluya el mínimo posible de equipamiento auxiliar, será el más adecuado.

Una vez definidos los criterios a utilizar, se debe seguir el método AHP para realizar el proceso de toma de decisiones y así poder relacionar cada uno de los ocho criterios con las tres alternativas propuestas para el diseño del reactor. El método admite la posibilidad de incorporar subcriterios para aumentar la interacción con las alternativas propuestas, como el caso de Wei et al. (2020) que aplicaron esta estructura para seleccionar el tratamiento biológico más adecuado para aguas residuales de coque. En la figura 2 se esquematiza la

estructura del método jerárquico aplicado a este trabajo donde se indican los diferentes niveles y la interrelación existente entre éstos.

Figura 2: Estructura para la selección del diseño más adecuado de reactor.



4.2 Evaluar las alternativas para cada uno de los criterios seleccionados

En función de la bibliografía relacionada al diseño de reactores de biosecado que fue estudiada, se procede a evaluar los diferentes criterios seleccionados. En el caso de los criterios C1, C2 y C3 se fijan a partir de un promedio de datos empíricos obtenidos mediante experimentos llevados a cabo con las tres alternativas propuestas del diseño de reactores. Para el resto de los criterios participaron los expertos para calificar cada alternativa con una escala del 1 al 5, siendo esta última la mejor puntuación posible de asignar. Luego se procedió a la normalización de los valores para obtener la tabla 2 (entre 0 y 1), y de esta manera es posible apreciar rápidamente cuál alternativa es la mejor según el criterio analizado. Para el caso de la alternativa vertical, se destaca por la temperatura alcanzada (C1), un bajo requerimiento de frecuencia de volteo (C5), y por su facilidad de operación, mientras que el diseño para un reactor horizontal rotatorio presenta la mejor puntuación en el resto de los criterios. Para el caso del horizontal estático presenta una puntuación media en la mayoría de los criterios, sin destacarse en ninguno por su la mejor puntuación.

Tabla 2: Evaluación de las alternativas en función de los criterios seleccionados

Alternativas	Criterios							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Vertical	1	0,62	0	0,67	1	0,5	0	1
Horizontal	0,30	0,00	0,25	0	0,67	0	0,33	0,5
Horizontal Rotatorio	0	1	1	1	0	1	1	0

Se debe tener en cuenta que con esta evaluación previa no es suficiente para poder seleccionar el mejor diseño, sino que es necesario valorar el peso que cada criterio tiene respecto a los otros que fueron seleccionados.

4.3 Valoración de los expertos para los criterios seleccionados

En el método AHP, los expertos asignan valores numéricos para expresar la importancia relativa de cada criterio en relación con los demás. Esto se realiza mediante la construcción de una matriz de comparación de criterios, donde cada elemento (i, j) de la matriz representa la importancia relativa del criterio i respecto al criterio j. Para esto se utiliza una escala numérica del 1 al 9 con el fin de expresar estas comparaciones:

- 1 se utiliza cuando dos criterios tienen igual importancia.
- 3 se utiliza cuando un criterio es moderadamente más importante que otro.
- 5 se utiliza cuando un criterio es fuertemente más importante que otro.
- 7 se utiliza cuando un criterio es muy fuertemente más importante que otro.
- 9 se utiliza cuando un criterio es extremadamente más importante que otro.

También se pueden utilizar valores intermedios (2, 4, 6, 8) para expresar relaciones de importancia relativa entre los criterios.

A partir de dicha matriz es posible calcular el peso relativo de cada criterio y plasmarlos en la tabla 3 donde es posible apreciar la importancia que cada experto le asignó a los diferentes criterios considerados. Se observa que los expertos 1, 3 y 6, el grado de humedad eliminada (C2) es el que mayor peso tendrá al momento de decidir el diseño más adecuado, para los expertos 2 y 5, es el tiempo requerido por el proceso (C3), mientras que para el experto 4 considera de suma importancia el desarrollo del biosecado con una baja frecuencia de volteo. Otros criterios a considerar, aunque en menor grado de importancia, son la temperatura alcanzada (C1) y la necesidad de inyección de aire mediante convección forzada (C6).

Teniendo en cuenta que la evaluación llevada a cabo por un solo experto demuestra una subjetividad significativa en el peso de los índices de valoración (Wei et al., 2020), para este trabajo se seleccionaron seis expertos que contaban con conocimientos de reacciones biológicas aeróbicas aplicadas sobre residuos. Todos los expertos que participaron en este trabajo corresponden al área de investigación, algunos han llevado a cabo proyectos relacionados al biosecado de residuos, y otros al bioestabilizado de residuos. Considerando que cinco de estos expertos poseen un doctorado y cuentan más de 20 años de experiencia, es posible asegurar que sus valoraciones serán fundamentadas en una sólida base de conocimiento y experiencia en el campo de estudio.

Tabla 3: Valoración de los criterios según los expertos

Criterio	Valoración					
	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6
C1	0,103	0,049	0,135	0,033	0,244	0,132
C2	0,339	0,152	0,258	0,038	0,183	0,213
C3	0,202	0,416	0,092	0,097	0,310	0,076
C4	0,048	0,264	0,021	0,025	0,061	0,023
C5	0,015	0,032	0,040	0,242	0,012	0,072
C6	0,242	0,018	0,061	0,365	0,038	0,101
C7	0,032	0,012	0,040	0,071	0,021	0,072
C8	0,020	0,057	0,353	0,130	0,132	0,310

De la tabla 3 es posible identificar los puntos de consenso y discrepancia, lo cual es de suma importancia para llevar a cabo la toma de decisiones con un enfoque sistemático y riguroso.

4.4 Evaluación de las alternativas posibles en función del peso de cada criterio

Para poder evaluar las alternativas de diseño de reactor posibles en función del peso asignado por los expertos a cada criterio, es necesario llevar a cabo operaciones matriciales entre los valores presentado en la tabla 2 y los de la tabla 3. De esta manera se afecta con el peso de cada criterio la valoración de cada una de las alternativas para el criterio evaluado que corresponda. A partir de esta operación se obtiene la tabla 4 donde en cada fila de ésta se presentan los puntos de vista de los expertos mediante la asignación el grado de importancia de cada criterio según la alternativa evaluada. La suma de los valores que componen cada fila permitirá saber cuál es el reactor más adecuada para cada experto. Por otro lado, este método utilizado desestima la valoración del experto en aquellos criterios donde la alternativa obtuvo la peor puntuación para los criterios evaluados en la tabla 2, lo cual afecta la selección de dicha alternativa al evitar la suma ponderada.

Al analizar la tabla 4 es posible ver el diseño que resultó seleccionado para cada experto:

- Experto 1: Vertical (0,280 < 0,499 > 0,324)
- Experto 2: Horizontal Rotatorio (0,416 < 0,863 > 0,172)
- Experto 3: Vertical (0,279 < 0,731 > 0,473)
- Experto 4: Vertical (0,283 < 0,626 > 596)
- Experto 5: Horizontal Rotatorio (0,559 < 0,613 > 0,230)
- Experto 6: Vertical (0,285 < 0,712 > 0,486)

Tabla 4: Valoración de los criterios según los expertos

Alternativa	Experto	Criterios								Suma	Promedio
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Vertical	1	0,103	0,209	0,000	0,032	0,015	0,121	0,000	0,020	0,499	0,591
	2	0,049	0,094	0,000	0,176	0,032	0,009	0,000	0,057	0,416	
	3	0,135	0,159	0,000	0,014	0,040	0,031	0,000	0,353	0,731	
	4	0,033	0,023	0,000	0,017	0,242	0,182	0,000	0,130	0,626	
	5	0,244	0,112	0,000	0,040	0,012	0,019	0,000	0,132	0,559	
	6	0,132	0,131	0,000	0,015	0,072	0,051	0,000	0,310	0,712	
Horizontal	1	0,100	0,000	0,012	0,000	0,161	0,000	0,007	0,000	0,280	0,255
	2	0,015	0,000	0,104	0,000	0,021	0,000	0,004	0,028	0,172	
	3	0,040	0,000	0,023	0,000	0,027	0,000	0,013	0,176	0,279	
	4	0,010	0,000	0,024	0,000	0,161	0,000	0,024	0,065	0,283	
	5	0,072	0,000	0,077	0,000	0,008	0,000	0,007	0,066	0,230	
	6	0,039	0,000	0,019	0,000	0,048	0,000	0,024	0,155	0,285	
Rotatorio	1	0,000	0,048	0,015	0,242	0,000	0,020	0,000	0,000	0,324	0,559
	2	0,000	0,152	0,416	0,264	0,000	0,018	0,012	0,000	0,863	
	3	0,000	0,258	0,092	0,021	0,000	0,061	0,040	0,000	0,473	
	4	0,000	0,038	0,097	0,025	0,000	0,365	0,071	0,000	0,596	

5	0,000	0,183	0,310	0,061	0,000	0,038	0,021	0,000	0,613
6	0,000	0,213	0,076	0,023	0,000	0,101	0,072	0,000	0,486

Con estos valores es posible conocer que la ponderación realizada por los expertos orienta la decisión hacia la alternativa del diseño vertical pero no es suficiente para determinar que éste el diseño más para llevar a cabo el biosecado.

4.5 Selección de la mejor opción obtenida

Para establecer el diseño que resulte más adecuado para el método aplicado, se debe calcular el promedio de cada alternativa, aplicado la suma de las filas de expertos en la tabla 4. Una vez conocidos estos valores, el resultado más elevado determinará el diseño más adecuado. De esta manera se concluye que el diseño vertical presenta mejores condiciones para desarrollar el biosecado para fines investigativos y aplicado a rechazos de RSU.

El método aplicado ha permitido seleccionar el diseño de reactor de una forma fundamentada, dado que los criterios utilizados para evaluar las alternativas, surgieron de un extenso análisis de bibliografía relacionada a experimentos de biosecado. Una vez definida la disposición y tipo del reactor, es posible continuar hacia otra etapa de diseño más detallada, enfocada al dimensionamiento del reactor, material constructivo, elementos auxiliares a incorporar, sistema de control y medición. En tanto que el reactor a desarrollar para la etapa de experimentación corresponderá a alguna de las codificaciones de la figura 1 para reactores verticales.

5. Conclusiones

En el presente trabajo que consistió en la evaluación de diferentes alternativas para la selección del diseño de reactor más adecuado para llevar a cabo el procedo de biosecado, se logró cumplir con el objetivo propuesto como se indica en los argumentos explicados a continuación.

A partir del estudio de las diferentes investigaciones científicas que utilizaron reactores de biosecado, fue posible identificar los tres diseños más comunes y los criterios técnicos que influyen en la eficiencia de un proceso biológico aeróbico de este tipo.

La evaluación de las tres alternativas posibles se realizó mediante el análisis de 16 diseños de reactores utilizando el método jerárquico AHP. Como resultado, se determinó que el reactor vertical es el más idóneo para llevar a cabo el biosecado. Este procedimiento permitió una evaluación enfocada en la eficiencia del proceso desde el punto de vista energético, ya que se siguieron los criterios establecidos.

El método AHP resultó una herramienta valiosa para estructurar el proceso de toma de decisiones, integrando los diferentes puntos de vista de los expertos involucrados en este trabajo. La ponderación de los criterios por parte de los expertos fue determinante para seleccionar la alternativa más adecuada.

6. Referencias

- Ab Jalil, N. A., Basri, H., Ahmad Basri, N. E., & Abushammala, M. F. M. (2016). Biodrying of municipal solid waste under different ventilation periods. *Environmental Engineering Research*, 21(2), 145–151. <https://doi.org/10.4491/eer.2015.122>
- Cai, L., Gao, D., & Hong, N. (2015). The Effects of Different Mechanical Turning Regimes on Heat Changes and Evaporation During Sewage Sludge Biodrying. *Drying Technology*, 33(10), 1151–1158. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1016574>
- Colomer-Mendoza, F. J., Herrera-Prats, L., Robles-Martínez, F., Gallardo-Izquierdo, A., & Piña-Guzmán, A. B. (2013). Effect of airflow on biodrying of gardening wastes in reactors. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25(5), 865–872. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60123-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60123-5)
- Contreras-Cisneros, R. M., Orozco-álvarez, C., Piña-Guzmán, A. B., Ballesteros-Vásquez, L. C., Molina-Escobar, L., Alcántara-García, S. S., & Robles-Martínez, F. (2021). The relationship of moisture and temperature to the concentration of O₂ and CO₂ during biodrying in semi-static piles. *Processes*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/pr9030520>
- dos Reis, R. F., Sergio Cordeiro, J., Font, X., & Laguna Achon, C. (2020). The biodrying process of sewage sludge—a review. *Drying Technology*, 38(10), 1247–1260. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1629689>
- Guerra-Gorostegi, N., González, D., Puyuelo, B., Ovejero, J., Colón, J., Gabriel, D., Sánchez, A., & Ponsá, S. (2021). Biomass fuel production from cellulosic sludge through biodrying: Aeration strategies, quality of end-products, gaseous emissions and techno-economic assessment. *Waste Management*, 126, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.036>
- Hamidian, A., Sarshar, Z., & Stuart, P. R. (2017). Technoeconomic analysis of continuous biodrying process in conjunction with gasification process at pulp and paper mills. *Drying Technology*, 35(3), 300–311. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1164182>
- Hao, Z., & Jahng, D. (2019). Variations of organic matters and extracellular enzyme activities during biodrying of dewatered sludge with different bulking agents. *Biochemical Engineering Journal*, 147, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.04.001>
- Huiliñir, C., & Villegas, M. (2015). Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge. *Water Research*, 82, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.046>
- Kristanto, G. A., & Zikrina, M. N. (2017). Analysis of the effect of waste's particle size variations on biodrying method. *AIP Conference Proceedings*, 1903. <https://doi.org/10.1063/1.5011528>
- Ma, J., Zhang, L., & Li, A. (2016). Energy-efficient co-biodrying of dewatered sludge and food waste: Synergistic enhancement and variables investigation. *Waste Management*, 56, 411–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.007>
- Manthos, G., Zagklis, D., Papapanou, M., Zafiri, C., & Kornaros, M. (2022). High-rate in-vessel continuous composting of olive mill byproducts. *Waste Management*, 151, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.037>
- Mohammed, M., Ozbay, I., Karademir, A., & Isleyen, M. (2017). Pre-treatment and utilization of food waste as energy source by bio-drying process. *Energy Procedia*, 128, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.021>
- Orozco-Álvarez, C., Díaz-Megchún, J., Osorio-Mirón, A., García-Salas, S., Hernández-Sánchez, E., Palma-Orozco, G., & Robles-Martínez, F. (2022). Finite Difference Modeling

- of the Temperature Profile during the Biodrying of Organic Solid Waste. *Sustainability (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142214705>
- Patcharavongsiri, M., Tondee, T., & Teekasap, S. (2019). Process of changing municipal solid waste into RDF using rotary bio-drying. In *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology* (Vol. 14, Issue 2).
- Pilnáček, V., Benešová, L., Cajthaml, T., & Inemannová, P. (2021). Comparison of temperature and oxygen concentration driven aeration methods for biodrying of municipal solid waste. *European Journal of Environmental Sciences*, 11(1), 38–45. <https://doi.org/10.14712/23361964.2021.5>
- Rao, D. V, Polzin, K., Houts, M., Curran, F., & Rodriguez, M. (2021). *Application of analytical hierarchy process for narrowing down nep candidate reactor designs.*
- Robles-Martínez, F. (2012). Biodrying under Greenhouse Conditions as Pretreatment for Horticultural Waste. *Journal of Environmental Protection*, 03(04), 298–303. <https://doi.org/10.4236/jep.2012.34038>
- Rochaeni, A., Mulyatna, L., Ariantara, B., Fathul, M., & Sagrim, W. M. (2021). Continuous thermophilic composting process using heating lamps controlled by a microcontroller. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 802(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/802/1/012052>
- SOMSAI, K., TONDEE, T., & KERDSUWAN, S. (2015). Effect of Pile Height on Heat Generated during Rotary Bio-drying Process for Municipal Solid Waste (MSW). *International Journal of Applied and Physical Sciences*, 1(3). <https://doi.org/10.20469/ijaps.50004-3>
- Tun, M. M., & Juchelková, D. (2019). Drying methods for municipal solid waste quality improvement in the developed and developing countries: A review. In *Environmental Engineering Research* (Vol. 24, Issue 4, pp. 529–542). Korean Society of Environmental Engineers. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.327>
- Wei, C., Wei, J., Kong, Q., Fan, D., Qiu, G., Feng, C., Li, F., Preis, S., & Wei, C. (2020). Selection of optimum biological treatment for coking wastewater using analytic hierarchy process. *Science of the Total Environment*, 742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140400>
- Yuan, J., Zhang, D., Li, Y., Li, J., Luo, W., Zhang, H., Wang, G., & Li, G. (2018). Effects of the aeration pattern, aeration rate, and turning frequency on municipal solid waste biodrying performance. *Journal of Environmental Management*, 218, 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.089>
- Zarkadas, I., Angeli, E., Sainis, I., Voudrias, E., & Pilidis, G. (2018). Food Waste Composting in a High Rate Continuous Feed Drum Reactor: Startup and Carbon Balance Analysis. *Clean - Soil, Air, Water*, 46(2). <https://doi.org/10.1002/clen.201700622>
- Zhao, L., Gu, W. M., He, P. J., & Shao, L. M. (2010). Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge. *Water Research*, 44(20), 6144–6152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.002>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

