

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO APLICADO AL SECADO DE LODOS

Vitória Olave de Freitas - vitoria.olave@utec.edu.uy

Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC- ITRCS), Laboratorio Solar, Uruguay.

Marcelo Coletto Rola – marcelo.coletto@utec.edu.uy

Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC- ITRCS), Laboratorio Solar, Uruguay.

Kelly Andressa Liesenfeld - kelly.liesenfeld@utec.edu.uy

Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC- ITRCS), Ingeniería en Aguas y Desarrollo Sostenible.

Resumen. El objetivo del presente trabajo es desarrollar un prototipo de secador solar tipo invernadero con un sistema de adquisición de datos de temperatura y humedad. Además, se busca evaluar el proceso de secado del lodo generado por la planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa del rubro alimenticio, localizada en Uruguay, y por último determinar el potencial de valorización energética del residuo seco. El prototipo tiene 3m² de área y está constituido por una estructura de hierro, piso de madera tipo OSB tratada, paredes y techos de policarbonato alveolar de 6 mm. Sensores de temperatura y humedad fueron instalados en el interior y exterior del prototipo para evaluar las variables del proceso y controlar el extractor de aire. Los ensayos de secado consistieron en separar el lodo en diferentes capas de espesor 5, 10, 15 y 20 cm, realizar la mezcla manual tres veces en la semana y determinar semanalmente la humedad. Después del secado, el lodo fue enviado para caracterización del potencial de valorización energética. Durante los dos meses de pruebas fueron registrados valores mínimos y máximos de temperatura ambiente externa, en el interior del invernadero y de radiación solar global horizontal de 0 y 27,5 °C, de 0 y 50,8°C y de 0 y 650 W/m², respectivamente. El lodo húmedo presentó un tenor de humedad de aproximadamente 83% (base húmeda) y al final del secado de a 8, 6, 54 y 64 % (base húmeda) para las capas de 5, 10, 15 y 20 cm, respectivamente. La capa de 5 cm alcanzó este porcentaje de humedad al final de 1 mes, mientras las demás en 2 meses. El lodo seco (8% de humedad) presentó un poder calorífico inferior de 16 MJ/kg y superior de 17 MJ/kg, con potencial para ser aplicado como un combustible alternativo.

Palabras clave: *Energía Solar, Secador Solar, Lodos.*

1. INTRODUCCIÓN

Los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) están constituidos de 60-95% en volumen de agua, dependiendo del proceso de deshidratación adoptado. Los grandes volúmenes generados hacen difícil y costoso su manejo y disposición final (Cota Espericueta y Ponce Corral, 2008), representando entre 40 y 50% de los costos de operación de las plantas (Mathioudakis, 2009). Además de las problemáticas sociales y ambientales, los lodos representan uno de los mayores problemas ingenieriles en términos de volumen, procesamiento, reutilización y disposición de los residuos generados en las PTAR, (Tchobanoglus et al., 2003).

Para reducir la humedad presente en los lodos, generalmente se emplean métodos mecánicos, los cuales son capaces de remover entre 20 y 40% del contenido de agua. Para alcanzar porcentajes superiores de remoción, es necesario la aplicación de métodos térmicos (Tchobanoglus et al., 2003), los cuales implican grandes consumos energéticos y emisiones de gases invernadero hacia la atmósfera (Cota Espericueta y Ponce Corral, 2008). El secado es un método térmico capaz de reducir el contenido de agua por debajo del 5% de sólidos secos, disminuyendo la masa y el volumen de desechos y, en consecuencia, el costo de almacenamiento, manipulación y transporte. Además, los lodos secos pueden presentar potencial para ser utilizados como combustibles alternativos, una vez que su poder calorífico es compatible con otros recursos energéticos utilizados para este fin (Bennamoun, 2012; Garanto, 2016).

Una alternativa a los sistemas convencionales de secado es el uso de invernaderos que utilizan energía solar, la cual es una tecnología empleada en países como Alemania, España, Marruecos y Australia, (Thermo-System, 2021). El proceso consiste en esparcir el lodo sobre el suelo del invernadero, ventilar para extraer el vapor de agua resultante del secado y mezclar con frecuencia para evitar la formación de grumos y asegurar la renovación frecuente de la superficie, aumentando la evaporación y evitando olores (Slim y Clodic, 2008; Garanto, 2016). Este proceso es fuertemente afectado por la temperatura del aire, su velocidad superficial, la radiación solar y la humedad ambiente (An y Liu, 2017). Para obtener un secado efectivo, es necesario medir las humedades relativas internas y externas y las temperaturas continuamente y con estos datos controlar el flujo de aire en el interior del secador, promoviendo condiciones óptimas de operación para la maximización del proceso (Cota Espericueta et al., 2006). A través de esta tecnología es posible alcanzar reducciones significativas en el contenido de humedad de los lodos con el uso de una energía renovable. Como desventaja se puede mencionar el requerimiento de grandes superficies para su instalación. (Slim y Clodic, 2008). Los secadores solares para lodos pueden dividirse básicamente en dos categorías, los secadores solares abiertos y los secadores con cubierta (invernaderos). A fin de aumentar la tasa de secado y la eficiencia energética, algunos sistemas incorporan, por ejemplo, dispositivos de almacenamiento de calor o bombas de calor (An y Liu, 2017).

Uruguay presenta una ubicación favorable para la generación de energías renovables, como es la energía solar. En el país, el promedio anual de la radiación global horizontal (GHI) es de 4,60 kWh/m²/día, (Alonso-Suárez, 2017). Países Europeos con menor recurso solar, como Alemania, la cual presenta valores de GHI de aproximadamente 3 kWh/m²/día (Instituto Fraunhofer, 2021b), utilizan esta fuente de energía para diversas aplicaciones. En 2020, 10,5% de la energía eléctrica neta pública fue generada a través de la fotovoltaica (Instituto Fraunhofer, 2021a). En el caso de la energía solar térmica, la Universidad de Hohenheim y la empresa Thermo-System desarrollaron un sistema de secado solar de lodos para PTAR y a partir del año de 1995 esta tecnología fue instalada en diversas plantas en el país, tratando más de 10.000 toneladas de lodos al año. A través de las pruebas realizadas, esta tecnología demostró ser adecuada y rentable para plantas pequeñas y medianas en climas moderados y para plantas de mayor tamaño en climas cálidos. Como ventajas del uso de este sistema de secado se puede destacar que el mismo prácticamente no necesita mantenimiento y los índices de evaporación llegan a ser tres veces superiores a los lechos de lodos convencionales (Bux et al., 2002).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es desarrollar un prototipo de secador solar tipo invernadero con un sistema de adquisición de datos de temperatura y humedad. Además, se busca evaluar el proceso de secado de distintas capas de lodo generado por la PTAR de una empresa del rubro alimenticio y el potencial de valorización energética del residuo después de seco.

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño, construcción e instalación del prototipo de secador solar tipo invernadero

El software SolidWorks®, fue utilizado para diseñar la estructura del secador solar tipo invernadero. Este programa permite la creación de diseños de modo rápido y preciso, incluyendo modelos 3D y dibujos 2D de ensamblajes y piezas complejas (SolidWorks®, 2021). En la Fig. 1 se observa la estructura dibujada en el software, la cual presenta dimensiones de 1,5m de ancho, 2m de largo y 1,9 m de alto en el centro de la misma. La estructura fue construida por caños rectangulares de hierro de 40x60mm (color gris). Para la puerta y sistemas de apoyo para las chapas de policarbonato fueron utilizados caños cuadrados de 20mm (color negro). Los materiales elegidos tuvieron en cuenta principalmente el costo, resistencia mecánica y disponibilidad en el mercado local.

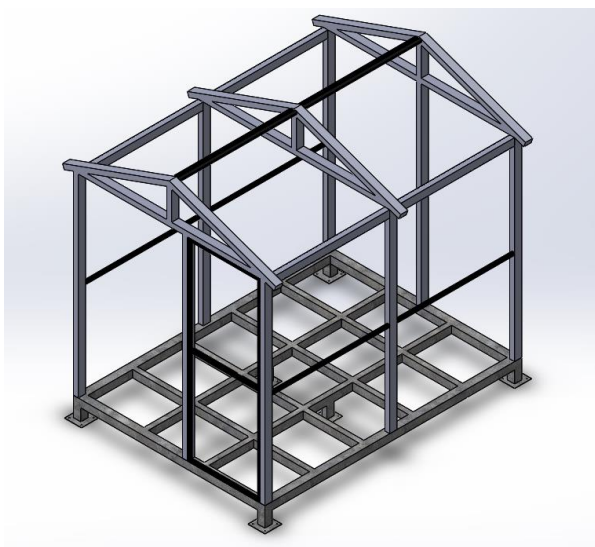


Figura 1 - Diseño del prototipo realizado en el software SolidWorks®.

El piso fue hecho de dos superficies (una externa y otra interna) de madera tipo OSB (*Oriented Strand Board*) tratada y entre las dos se utilizó como aislante térmico espuma plast de alta densidad con 60 mm de espesor, a fin de reducir la pérdida de calor hacia el exterior. Las paredes y techo fueron construidos en policarbonato alveolar de 6mm, teniendo en cuenta que ese espesor es el más indicado para aplicaciones en invernaderos. Un extractor de aire con potencia eléctrica de 48 Watts y capacidad de extracción de 860 m³/h fue instalado con el objetivo de succionar el aire y remover la humedad interna hacia el exterior. El prototipo fue instalado en el Instituto Tecnológico Centro Sur de la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC), ubicado en la ciudad de Durazno, Uruguay. El local de instalación fue elegido en base a un estudio previo de sombra realizado en el software PVSyst®.

2.2 Desarrollo del sistema de monitoreo, adquisición y control de datos del proceso

El sistema de adquisición de datos fue desarrollado utilizando un microcontrolador Arduino® Mega 2560, un módulo RTC 3231, un módulo tarjeta de memoria, un módulo relé, 8 sensores de temperatura DS18B20 y 4 sensores de

humedad relativa modelo DHT22. En el interior del invernadero se instalaron 3 pares de sensores de temperatura en distintas alturas (T_{Alto} , T_{Medio} y T_{Bajo}) para identificar la existencia, o no, del gradiente térmico interno y un par de sensores de humedad relativa (H_{Int}). En el exterior del prototipo, un par de sensores de temperatura y humedad (T_{Ext} y H_{Ext}) se encargaban de registrar las respectivas variables ambientales. Se destaca que en cada posición fueron instalados pares de sensores para garantizar una mayor seguridad y correcta operación del prototipo. El control del extractor fue realizado a través de una comparación entre las humedades interna y externa, siendo accionado solamente cuando H_{Int} es superior a H_{Ext} . Todos los datos se registraron en una frecuencia minutil y los promedios a cada 10 minutos fueron guardados en una tarjeta de memoria de 16GB.

Los datos referentes a la radiación global horizontal (GHI) fueron retirados de la estación meteorológica del fabricante David Instruments, modelo Vantage Pro2Plus (Davis Instruments, 2021), instalada en la azotea de la universidad. Para el posterior análisis de los resultados fue implementada una rutina utilizando el software MatLab®, empleado para hacer los cálculos y generar las gráficas. Para una mejor visualización de los resultados, los datos fueron promediados en escala horaria.

2.3 Evaluación del proceso de secado solar del lodo

Para evaluar el proceso de secado fueron recolectadas muestras de lodo generado en una PTAR proveniente de una industria del rubro alimenticio, localizada en el interior del Uruguay. El lodo utilizado en este estudio fue espesado y deshidratado en una centrífuga con adición de polielectrolito. Del 11/06/2021 hasta el 11/08/2021 se realizaron los ensayos de secado. El diseño experimental consistió en (1) separar el lodo en diferentes capas de espesor 5, 10, 15 y 20 cm en cajas de 40x60 cm; (2) realizar la mezcla manual tres veces en la semana; (3) determinar semanalmente la humedad a través del método de desecación por estufa a 105°C durante 24h.

2.4 Caracterización del lodo seco

Después de pasar por el proceso de secado solar, el lodo fue enviado para análisis del tenor de cenizas, carbono, poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI) con el objetivo de determinar el potencial de valorización energética. En la Tab. 1, son presentados los análisis realizados, la normativa utilizada y el laboratorio responsable. Para todos los análisis se ensayaron dos réplicas de la muestra y se informó el valor promedio.

Tabla 1 - Parámetros analizados, normativa utilizada y laboratorio responsable.

Parámetro	Normativa	Laboratorio
Cenizas	ISO 18122	
Poder calorífico Inferior (PCI) y Poder calorífico Superior (PCS)	DIN 51900-1:2000 DIN 51900-2:2003	Laboratorio Tecnológico del Uruguay - LATU
Carbono (C)	UNE-EN ISO 16948	

DIN: Deutsches Institut für Normung.

ISO: International Organization for Standardization.

UNE- EN: Asociación Española de Normalización.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del desarrollo del prototipo de secador solar tipo invernadero y de los ensayos realizados en el mismo. En base a los datos registrados en el datalogger (Arduino) y de radiación solar (estación meteorológica) se discute y compara el comportamiento de la temperatura en el interior y exterior del invernadero, así como la radiación global horizontal durante los dos meses de pruebas. Por fin, se evalúa los resultados del secado para los distintos ensayos realizados y se compara los mismos con la literatura del área.

3.1 Prototipo de secador solar tipo invernadero

En la Fig. 2 se observa las etapas constructivas del prototipo hasta su conclusión. En la respectiva figura, el ítem (a) demuestra la estructura metálica y los ítems (b), (c) y (d) la composición del piso. Por fin, en el ítem (e) y (f) se visualiza el prototipo finalizado con el policarbonato alveolar, extractor y caja estanco con el datalogger.

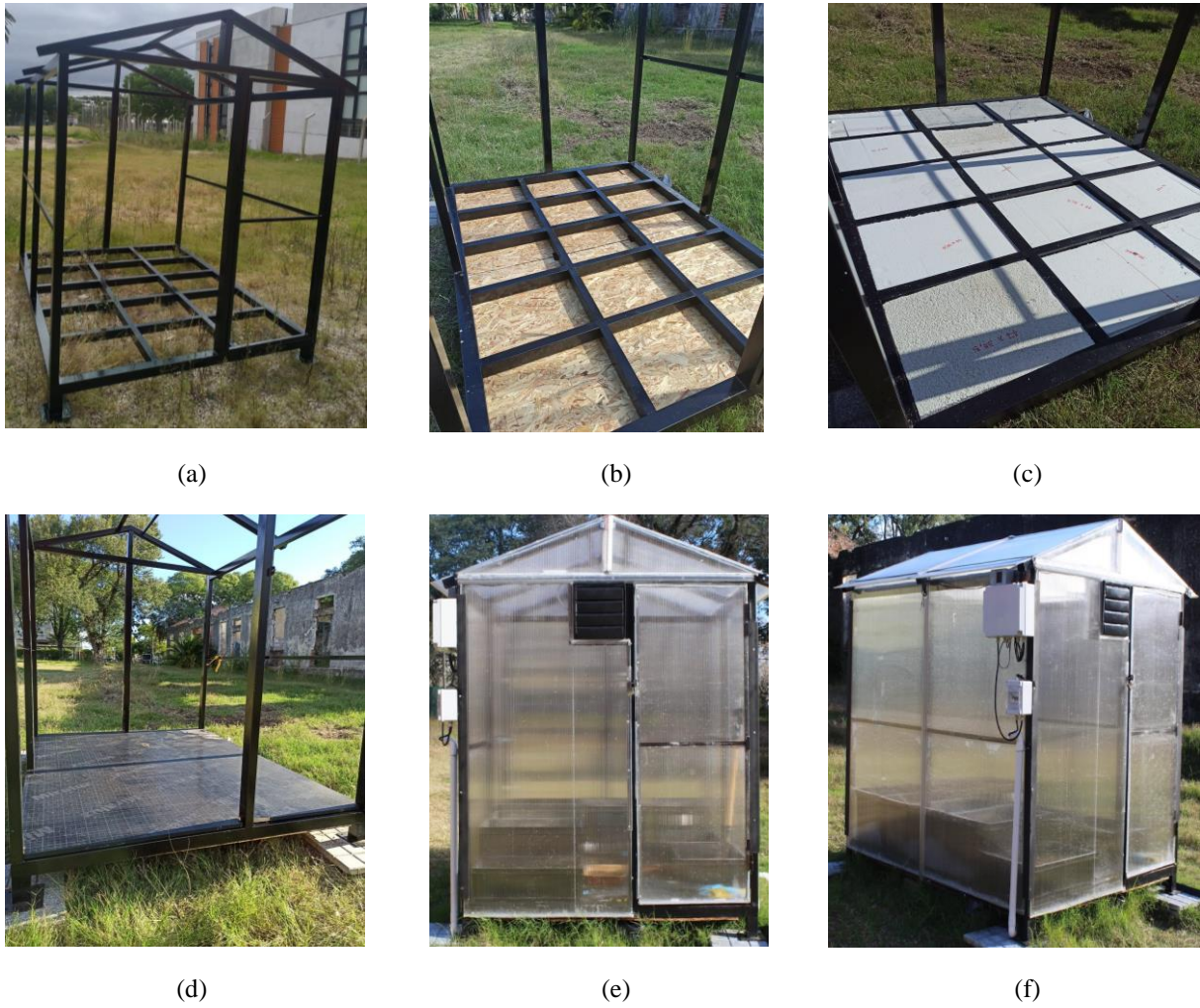


Figura 2 - Prototipo de secador solar tipo invernadero

3.2 Comportamiento de las variables del proceso de secado

En las Fig. 3 y 4 se demuestran el comportamiento de las temperaturas interna y externa en el invernadero, así como la radiación global horizontal registrada en ambos meses de ensayo.

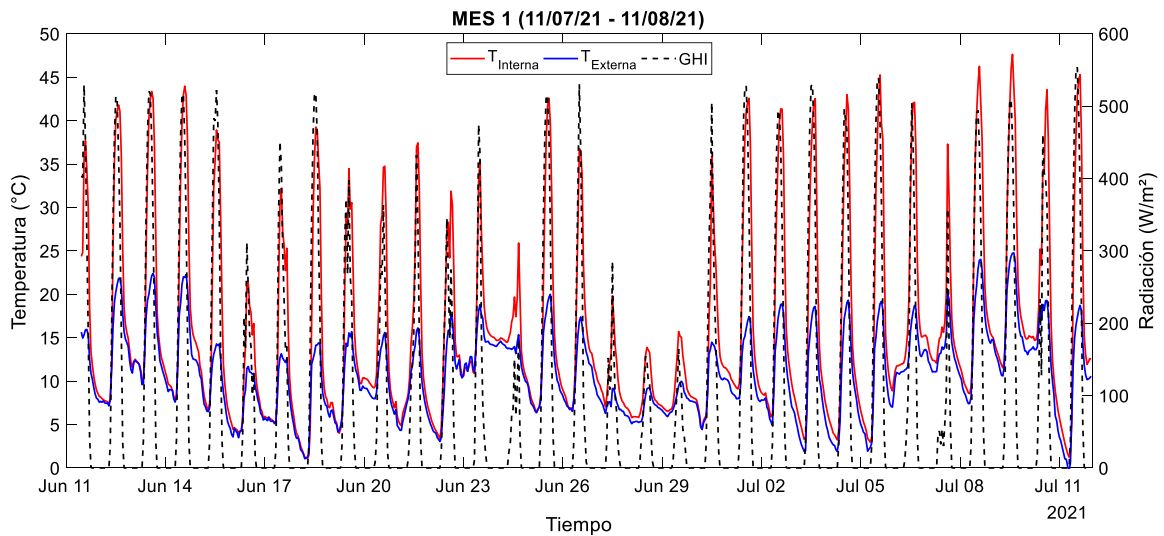


Figura 3 - Temperatura e radiación solar (11/07/21 - 11/08/21)

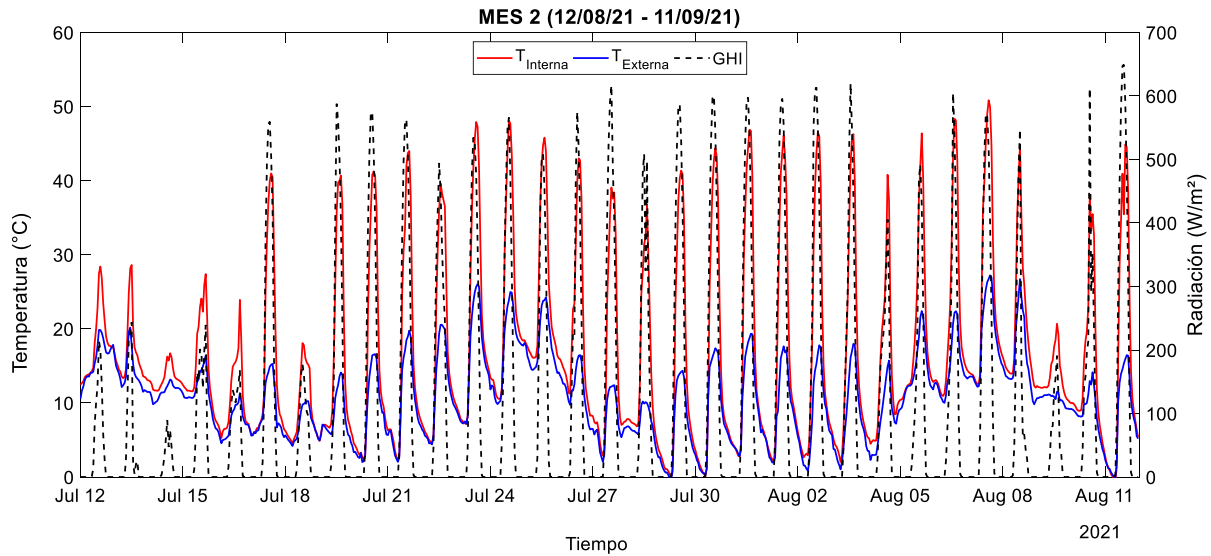


Figura 4 - Temperatura e radiación solar (12/08/21 - 11/09/21)

Analizando las Fig. 3 y 4 se puede observar que durante el período total de ensayos los valores mínimo, máximo y promedio de la temperatura externa (ambiente) ha variado entre 0°C , $27,5^{\circ}\text{C}$ y $10,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente. En el mismo período, la temperatura mínima en el interior del invernadero ha sido prácticamente igual a la mínima externa, una vez que el prototipo no presenta ningún sistema de acumulación de energía térmica o tampoco elementos estructurales que generen una inercia térmica relevante. El valor máximo de temperatura registrado en el interior del invernadero fue de $50,8^{\circ}\text{C}$, a las 14h del día 07 de Agosto, para GHI igual a 572 W/m^2 . Se destaca que los valores máximos de temperatura en el interior y exterior del prototipo corresponden al mismo período de tiempo. Durante los dos meses de ensayo, las temperaturas máxima interna y externa sucedieron entre las 12h y 15h. El valor máximo de GHI computado en el período de ensayo se encuentra alrededor de 650 W/m^2 , con un valor promedio de 226 W/m^2 . Se puede observar que los períodos entre 27 - 29 de junio y 12 - 17 de julio fueron característicos de nubosidad y precipitación, los cuales son responsables por la pequeña amplitud térmica entre el interior y exterior del invernadero, afectando directamente los procesos de transferencia de calor y masa, responsables por el secado del lodo.

Bux et al. (2002) realizaron experimentos en un secador solar comercial de lodos de depuradora, desarrollado por la Universidad de Hohenheim y la empresa Thermo-System en Alemania. Los experimentos fueron llevados a cabo con los lodos de una depuradora municipal de una pequeña comunidad de 1000 habitantes. El secador solar utilizado es un invernadero con un piso pavimentado que permite el drenaje del agua presente en los lodos y la planta está completamente rodeada por una cubierta transparente. El lodo fue dispuesto en la cámara de secado separado en dos compartimentos idénticos de 150 m^2 cada uno, en capas de 20 a 50 cm. Estos eran mezclados y aireados automáticamente con un pequeño robot, llamado de "topo eléctrico". Durante el secado, todos los parámetros relevantes para el proceso (temperaturas del lodo y del aire, humedad relativa, la radiación global, la velocidad del viento y contenido de humedad de los lodos) fueron medidos por un microprocesador integrado, el cual controla automáticamente todos los componentes de la planta. Durante el experimento, la temperatura diaria varió entre 9 y 23°C , la humedad relativa del aire ambiente entre 40 y 100%, y la radiación solar entre $1,1$ y $8,1\text{ kWh/m}^2/\text{día}$.

3.3 Evaluación del proceso de secado

Los ensayos de secado fueron realizados durante los meses de junio, julio y agosto, donde las condiciones climáticas no son favorables para el secado solar, considerando que en Uruguay este periodo es caracterizado por bajas temperaturas y elevadas precipitaciones.

La Fig. 5 presenta la variación de la humedad del lodo (b.h) con el tiempo de secado, donde es posible observar que el lodo húmedo dispuesto en las cajas presentó un tenor de humedad promedio inicial de aproximadamente 83% (b.h.) y al final del secado de aproximadamente 8, 6, 54 y 64 % (b.h.) para las capas de 5, 10, 15 y 20 cm, respectivamente. La capa de 5 cm alcanzó este porcentaje de humedad al final de 30 días, mientras las demás al final de 60 días. Para las cajas de 5 y 10 cm se observó una reducción de aproximadamente 70% en el volumen del lodo en las cajas. Bux et al. (2002) observó un aumento en el porcentaje de sólidos secos del lodo de 3 para 93% en un período de secado de 83 días.

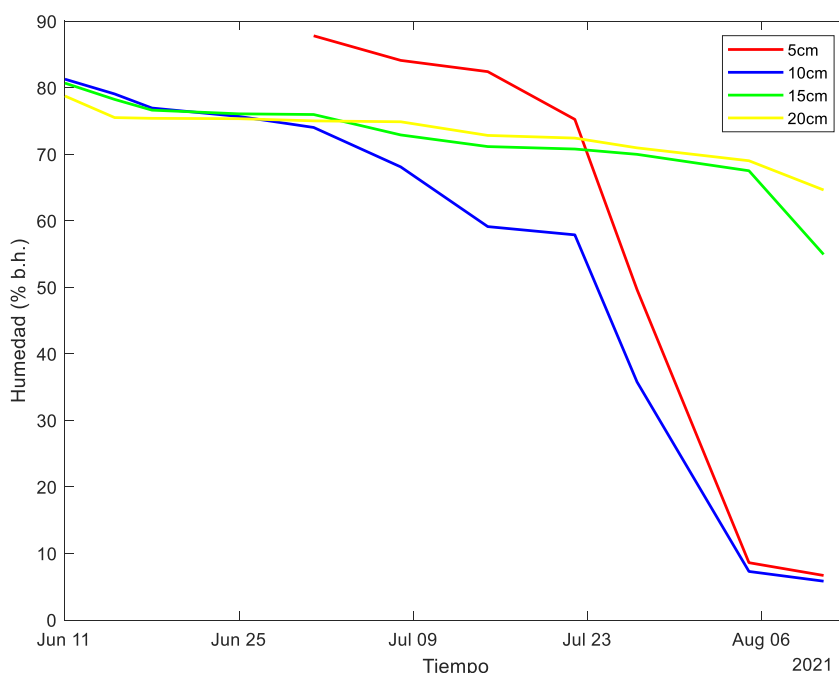


Figura 5 - Variación de humedad del lodo con el tiempo de secado.

Es posible observar que entre los días 11/06/21 hasta el día 01/07/21 las 3 capas de lodo (10, 15 y 20 cm) presentaron un bajo descenso en la humedad, comportamiento que puede estar directamente vinculado con las condiciones climáticas de este período, caracterizado por varios días con baja radiación y consecuentemente bajas temperaturas, como es posible verificar en las Fig. 3 y 4. A partir del día 01/07/21 fue agregado al invernadero la caja con capa de lodo de 5 cm, la cual juntamente con la 10 cm empezaron a presentar una disminución más significativa en la humedad del lodo. Desde esta fecha hasta el día 11/07/21 se observó temperaturas más cálidas, seguidas nuevamente de un período de bajas temperaturas, el cual reflejó directamente en reducción de la tasa de remoción de humedad del lodo. Es posible observar que las cajas de lodo que tenían 5 y 10 cm presentaron los mejores resultados cuando comparadas a las capas de 15 y 20 cm. El mismo comportamiento fue observado por Lima (2010).

Salihoglu et al. (2007) realizaron el secado de lodos de una planta municipal de tratamiento de aguas residuales que presenta procesos de eliminación biológica de nutrientes (BNR). Los lodos presentaban una concentración de sólidos inicial de un 20% y fueron sometidos al secado en un invernadero tipo túnel completamente cerrado por una lámina de policarbonato transparente de 10 mm de espesor con una transmitancia de luz del 80%. El lodo fue dispuesto en una capa de 25 cm de espesor en el piso del invernadero, construido de hormigón impermeable con 10 m² de área. El mismo fue calentado con tuberías de agua caliente conectadas a dos colectores solares de placa plana. Además, la planta presentaba una unidad de almacenamiento de calor en lecho de roca de 50 cm de profundidad bajo el suelo de hormigón. Los lodos eran mezclados manualmente dos veces al día para su renovación. Los mismos fueron deshidratados hasta una concentración de sólidos secos de 35%, llevando 15 días en verano y 30 días en invierno para alcanzar este porcentaje de sólidos. El efecto invernadero permitió que la temperatura interior de los lodos fuera de 9-13°C más alta que la temperatura exterior.

Lima (2010) evaluó el secado y la higienización en invernadero agrícola de los lodos activados generados en las PTAR de la región Metropolitana de Vitória, Espírito Santo (Brasil). Para esto, utilizó un invernadero de 6m de ancho, 15m de largo y paredes laterales con 2 m de alto, construido de estructura de madera con cubierta de plástico translúcido y un piso de material impermeable. Se realizaron aberturas laterales (ventanas) para permitir la circulación del aire en el interior del invernadero. El estudio fue dividido en dos etapas, en un primer momento se evaluó los lodos digeridos aeróbicamente, con y sin cal, y luego los lodos no digeridos, también con y sin cal. Cada etapa estaba compuesta por tres ciclos con diferentes procedimientos metodológicos y una duración de aproximadamente 70 días. A través de las condiciones metodológicas ensayadas, la autora indica que la mejor configuración para el secado y sanitización de los lodos para cumplir con la normativa de este residuo fueron un tiempo de secado de aproximadamente 36 días, para una capa de lodo de 10 cm y una mezcla de tres veces por semana, sin adición de cal. Con estas condiciones fue posible obtener un lodo con una humedad final de aproximadamente un 25%, lo que permite una reducción del volumen alrededor del 76%.

Mathioudakis et al. (2009) proponen el secado de lodos de aguas residuales después del espesamiento y deshidratación en un secador solar a escala piloto de aproximadamente 2,5 m³ hecho de policarbonato. El prototipo estaba equipado con un sistema de almacenamiento de energía con suelo de grava, por el que circulaba agua caliente generada por un colector solar. Además, tenía instalado un ventilador en el interior para proporcionar un aire turbulento capaz de

eliminar la humedad de la capa superficial y dos ventiladores axiales que extraían el aire saturado. Fueron deshidratados aproximadamente 8 kg de lodos en cajas con una profundidad entre 20 y 25 cm. Los mismos fueron mezclados manualmente una vez al día. Los resultados obtenidos demostraron que el contenido de humedad disminuyó del 85% al 6% (b.h.) entre 7 y 12 días en verano y hasta el 10% entre 9 y 33 días en otoño. El sistema de almacenamiento de energía aceleró el proceso de secado entre 1 y 9 días durante el invierno.

3.4 Potencial de valorización energética del lodo seco

Para evaluar el potencial de valorización energética del lodo en estudio se determinó el poder calorífico (superior e inferior), el contenido de carbono (C) y de cenizas. Los resultados son presentados en la Tab. 2.

Tabla 2 – Resultados obtenidos en la caracterización del lodo seco para valorización energética.

Parámetro	Resultado
Cenizas*	21%
Poder calorífico Inferior (PCI)	16 MJ/kg
Poder calorífico Superior (PCS)	17 MJ/kg
Carbono (C)*	43,8%

*Base seca

Del punto de vista energético, la biomasa es definida como toda materia orgánica que puede ser utilizada para generar energía (Kumar et al, 2002). La energía térmica generada durante la quema de la biomasa puede ser evaluada por su poder calorífico, el cual es determinado en términos de energía por unidad de masa o volumen de combustible. Son descritos dos tipos de poder calorífico, el poder calorífico superior, cuando el agua está en forma líquida, estado típico en las condiciones de ensayo de combustibles, pero poco aplicado en situaciones prácticas, y poder calorífico inferior, cuando el agua está presente en forma de vapor, situación que realmente ocurre en los productos de combustión de las chimeneas (Nogueira, 2005). El grado de humedad de la biomasa está directamente relacionado con el poder calorífico, una vez que la humedad interfiere directamente en el proceso de combustión, pues la mayor parte de la energía liberada durante los procesos térmicos es consumida para evaporar el agua presente en la biomasa (Padilha, 2019).

Analizando los resultados presentados en la Tab. 2, se visualiza que el lodo después de seco (8% de humedad) presentó un poder calorífico inferior de 16 MJ/kg y superior de 17 MJ/kg, que es del mismo orden de magnitud del potencial energético de biomazas como la madera (10 a 20% de humedad) cuyo valor varía de 14 a 17 MJ/kg (Campregher, 2005). Asimismo, al comparar los resultados obtenidos con otras biomazas, como el bagazo de caña de azúcar en briquetas, que presenta un PCS de 14,5 MJ/kg, los lodos secos analizados presentaron un mayor poder calorífico (Borges, 2008). Según Domínguez et al. (2004), gran parte de los combustibles utilizados para generar energía, como el carbón, el papel o la madera, presentan poderes caloríficos similares a los que presentan los lodos secos, esto indica que estos residuos presentan potencial de utilizarse como biomasa combustible para la generación de energía, contribuyendo así en la reducción de los costos con otros combustibles tradicionalmente utilizados y también la disposición en rellenos sanitarios.

Según Toledo et al. (2015), cuanto mayor es el contenido de carbono en la biomasa, mayor será su potencial energético. Conforme demostrado en la Tab. 2, el tenor de carbono del lodo es de 43,8%, el cual fue mayor que el valor encontrado por Padilha (2019) al analizar el tenor de carbono de un lodo secundario de origen frigorífico (23,6%).

El lodo en estudio presentó un tenor de cenizas de 21%. Padilha (2019), al analizar el tenor de cenizas de un lodo generado en una industria frigorífica, obtuvo para el lodo secundario 42,3%. El autor menciona que el alto tenor de cenizas del lodo secundario es debido a la mayor cantidad de materiales inorgánicos presentes en el efluente que generó el lodo. Meneghini et al. (2015), al analizar lodos generados por el mismo sector encontró un tenor de cenizas 17,5%. Un elevado tenor de cenizas puede ser el principal inconveniente en el uso del lodo para los procesos de combustión, una vez que la ceniza es un material inerte que no produce calor y su aumento disminuye el poder calorífico (Virmond, 2007). Una posible aplicación para las cenizas generadas es utilizarlas en la construcción civil, en la fabricación de ladrillos y cementos, visto que toda la materia orgánica presente en el lodo será eliminada en la combustión (Fontes, 2003).

4. CONCLUSIÓN

Evaluando los resultados obtenidos en este estudio y trabajos del área, es posible concluir que los mismos son similares y que las diferencias identificadas entre las condiciones de secado y tiempos de proceso están directamente relacionadas con las configuraciones de los prototipos (dimensiones, tipos de materiales utilizados en la estructura, sistemas de ventilación y extracción de aire, presencia de sistemas de acumulación de energía), con las condiciones

ambientales de los días de ensayos y también con las características de los lodos deshidratados. Todavía, los resultados encontrados para el incremento de la temperatura en el interior del prototipo y el tiempo de secado, considerando el período del año en que se realizó los ensayos (invierno), pueden ser considerados atractivos, indicando que el prototipo tiene potencial para seguir siendo evaluado y optimizado. Se destaca que, comparando el secado en invernaderos solares con los actuales procesos de deshidratación de lodos utilizados en las industrias de Uruguay, este proceso es capaz de reducir los niveles de humedad a porcentajes muy inferiores, utilizando una tecnología amigable con el medio ambiente, de bajo costo de operación y consumo energético. Además de reducir considerablemente el volumen, el lodo después del secado presenta poder calorífico compatible con gran parte de los materiales utilizados para generar energía, teniendo capacidad de ser valorado y utilizado como un combustible alternativo.

Hacer la correcta gestión de los residuos sólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales es una cuestión de relevancia en la agenda ambiental de muchos países. Por esta razón están siendo desarrollados diversos estudios que tienen el objetivo de proponer soluciones más eficientes y amigables con el medio ambiente. En este sentido, considerando los resultados obtenidos hasta el momento y con el intuito de obtener un secador solar optimizado, futuramente se busca (a) evaluar el secado para distintos tipos de lodo (b) optimizar las condiciones operativas, a fin de acelerar el proceso de secado; (c) instalar un sistema de calentamiento y/o almacenamiento de energía para disminuir los efectos de la variación de la temperatura intradiaria; (d) desarrollar un sistema automatizado de mezcla del lodo para acelerar el proceso de secado.

REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R., 2017. Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales, Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay).
- An, X., Liu, W., 2017. Review on Sludge Drying Process and Dryer in Solar Energy, *American Journal of Energy Engineering*, 5(5), 34.
- Bennamoun, L., 2012. Solar drying of wastewater sludge: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 1061-1073.
- Bux, M., Baumann, R., Quadt, S., Pinnekamp, J., Mühlbauer, W., 2002. Volume reduction and biological stabilization of sludge in small sewage plants by solar drying, *Drying Technology*, 20(4-5), 829-837.
- Borges, F., 2008. Caracterização e Estudo da Potencialidade de Lodos de Efluentes Doméstico e Industrial como Combustível na Geração de Energia. Tesis de Maestría en Ingeniería de Procesos. Universidade da Região de Joinville. Joinville.
- Campregher, N., 2005. Estudo da Viabilidade de Incorporação do Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria de Papel, Celulose e Aparas em Material Cerâmico, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, UFSC, Florianópolis.
- Cota Espericueta, A. D., Ponce Corral, C., Padilla Franco, J. H. N., 2006. Diseño, construcción y operación de un secador solar de lodos generados en plantas tratadoras de aguas, *Memorias de la XXX Semana Nacional de Energía Solar*, Veracruz.
- Cota Espericueta, A. D., Ponce Corral, C., 2008. Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar, *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(4), 161-170.
- David Instruments, 2021. Disponible en: <https://www.davisinstruments.com/pages/vantage-pro2>. Accedido el 16 de noviembre de 2021.
- Domínguez, A., Menéndez, J.A., Inguanzo, M., Pis, J.J., 2004. Sewage sludge drying microwave energy and characterization by IRTF, *Afinidad*, Oviedo, 61(512), p.280-285, 2004.
- Fontes, C. M. A., 2003. Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Garanto, O., 2016. Solar sludge drying technology and dried sludge as renewable energy—closing the loop, *J Traffic Transp Eng*, 4, 221-229.
- Instituto Fraunhofer, 2021a. Net Public Electricity Generation in Germany in 2020. Disponible en: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/electricity_production_germany_2020.pdf. Accedido el 05 de diciembre de 2021.
- Instituto Fraunhofer, 2021b. Recent facts about photovoltaics in Germany. Disponible en: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>. Accedido el 05 de diciembre de 2021.
- Kumar, A., Purohit, P., Rana, S., Kandpal, T. C., 2002. An approach to the estimation of the value of agricultural residues used as biofuels, *Biomass and Bioenergy* 22, p. 195-203.
- Lima, M. R. P., 2010. Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto, Tesis de Doctorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Mathioudakis, V. L., Kapagiannidis, A. G., Athanasoulia, E., Diamantis, V. I., 2009. Extended dewatering of sewage sludge in solar drying plants, *Desalination*, 248:733–9.

- Meneghini, C., Proinelli, R., Pintro, D. A. B., 2015. Avaliação técnica e econômica da co-combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor, VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Universidade do Oeste de Santa Catarina, Porto Alegre.
- Nogueira, L. A. H., Horta F. J, Rocha. C. R., 2005. Eficiência energética no uso de vapor, Rio de Janeiro, Eletrobrás.
- Padilha, J., Kurek, A.P., Souza, O., Sellin, N., 2019. Avaliação da potencialidade energética de lodos gerados no tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de aves. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/potencialidade-energetica-lodos-efluentes-abatedouros/>. Acessado el 22 de noviembre de 2021.
- Salihoglu, N. K., Pinarli, V., Salihoglu, G., 2007. Solar drying in sludge management in Turkey, Renewable energy, 32(10), 1661-1675.
- Slim, R., Zoughaib, A., Clodic, D., 2008. Modeling of a solar and heat pump sludge drying system, International journal of refrigeration, 31(7), 1156-1168.
- SolidWorks, 2021. Disponível em: <https://www.solidworks.com/es/domain/design-engineering>. Acessado el 29 de noviembre de 2021.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., Stensel, H. D., 2003. Wastewater engineering: Treatment and reuse, American Water Works Association, Journal, 95(5), 201.
- Thermo-System, 2021. Disponível em: <https://www.thermo-system.com/es/referencias>. Acessado el 03 de noviembre de 2021.
- Toledo, M., 2015. Estudo preliminar do potencial energético de variedades de eucalipto cultivadas no Rio Grande do Sul, Centro de Estudos em Biorrefinaria, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.
- Virmond, E., 2007. Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia, Tesis de Maestría, Programa de Postgrado en Ingeniería Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DESIGN, CONSTRUCTION AND EVALUATION OF A SOLAR GREENHOUSE DRYER APPLIED TO SLUDGE DRYING

Abstract. *The aim of this work is to develop a greenhouse-type solar dryer prototype with a temperature and humidity data acquisition system. In addition, to evaluate the drying process of the sludge generated by the wastewater treatment plant of a food company located in Uruguay, and finally, to determine the potential energy valorization of the dried residue. The prototype has an area of 3m² and consists of an iron structure, treated OSB wood floor, and 6 mm honeycomb polycarbonate walls and roof. Temperature and humidity sensors were installed inside and outside the prototype to evaluate the process variables and control the air extractor. The drying tests consisted of separating the sludge into different layers of 5, 10, 15 and 20 cm thickness, manual mixing three times a week and weekly moisture determination. After drying, the sludge was sent for characterization of its potential energy valorization. During the two months of tests, minimum and maximum values of external ambient temperature, inside the greenhouse and global horizontal solar irradiation were recorded of 0 and 27,5 °C, 0 and 50.8°C and 0 and 650 W/m², respectively. The sludge presented an initial moisture content of approximately 83% (wet basis) and at the end of drying process of 8, 6, 54 and 64% (wet basis) for the 5, 10, 15 and 20 cm layers, respectively. The 5 cm layer reached this moisture content at the end of 1 month, while the others in 2 months. The dried sludge (8% moisture) presented a lower calorific value of 16 MJ/kg and a higher calorific value of 17 MJ/kg, with potential to be applied as an alternative fuel.*

Key words: *Solar Energy, Solar Dryer, Sludge.*