

MODELADO DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN BIODIGESTOR, CALEFACCIONADO CON ENERGÍA SOLAR, MEDIANTE EL SOFTWARE SIMUSOL

J.N. Martín^{1,1}, G. Barea^{2,1}, S. Manrique^{3,2}, A. Esteves^{4,1}

1. Instituto de Ambiente Hábitat y Energía (INAHE), Centro Científico Tecnológico Mendoza CCT - Mendoza. Av. Ruiz Leal s/n Parque General San Martín. Mendoza - Argentina. CP 5500. Tel: 54-261-5244338 / Fax: 54-261-5244001 Correo electrónico: jnmartin@mendoza-conicet.gov.ar

2. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa), Av. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina. +5493874255424.

Recibido 14/08/18, aceptado 28/09/18

RESUMEN: Se desarrolló un modelo térmico con el software SIMUSOL para un prototipo de biodigestor anaerobio, previamente construido. El biodigestor se calefacciona de forma pasiva con energía solar, y se busca lograr el mantenimiento de las condiciones térmicas a través de aislamiento. El modelo computacional propuesto representa los flujos de calor existentes entre los principales elementos de la envolvente del prototipo de biodigestor y el ambiente. Para su ajuste y validación, se realizó un ensayo de 150 horas de mediciones experimentales, registrando como datos de entrada: temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento; además de las temperaturas en 17 puntos del prototipo. El modelo fue revisado en función de los resultados experimentales obtenidos, controlando la diferencia entre valores simulados y medidos. Se obtuvo un buen ajuste entre ambas series de datos, logrando modelar satisfactoriamente el comportamiento térmico del digestor y disponer de una herramienta de mejora del diseño.

Palabras clave: Biodigestor, Energía Solar, Simulación térmica, SIMUSOL

INTRODUCCIÓN

En ámbitos rurales del Centro-Oeste de Argentina habitan comunidades energéticamente aisladas, y con dificultades para proveerse de un recurso energético estable. Estas zonas se caracterizan por ser frágiles desde el punto de vista ecosistémico, tanto por los climas reinantes como por el impacto que el ser humano produce en su necesidad de proveerse de los recursos de subsistencia mínimos. Algunos pobladores hacen uso de las tierras áridas para la cría de ganado, principalmente caprino.

La digestión anaerobia (o biodigestión) de guano es una tecnología promisoría que provee una fuente de energía limpia (biogás) y un fertilizante enriquecido, además de mejorar la sanidad ambiental. Estos beneficios hacen a la digestión anaerobia, una fuente de energía particularmente factible para áreas rurales remotas (Preston y Rodríguez, 2002; Velo, 2006).

El proceso de biodigestión, si bien puede realizarse en diferentes rangos de temperatura, opera con mayor velocidad y eficiencia a temperaturas elevadas, siendo óptimo a temperaturas de 35 °C y acelerándose las reacciones por encima de este valor. En climas fríos y en grandes altitudes, no se reúnen estas condiciones (Weatherford y Zhai, 2015). El diseño del biodigestor debe adaptarse a esas condiciones no ideales. Esta situación ocurre en toda la zona Centro-Oeste de Argentina, cuyas temperaturas disminuyen marcadamente en el invierno y muestran una gran amplitud térmica.

1 Becario doctoral CONICET

2 Investigador Asistente CONICET

3 Investigadora Asistente CONICET

4 Investigador Independiente CONICET

En el marco de las investigaciones del grupo de Energía Renovable en Arquitectura Construcción y Equipamiento, del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), CONICET, se desarrolló un modelo de biodigestor anaerobio con calefacción solar (Orduna et al., 2007). La producción del mismo resultó insuficiente, por lo que, apoyados con una beca doctoral financiada por CONICET, se retomó la investigación. Se desarrolló un nuevo prototipo y siendo que el comportamiento térmico resultaba el punto central de este diseño, se desarrolló un modelo térmico computacional, que permitiera simular el comportamiento del mismo frente a las variaciones de factores del clima, y poder realizar los ajustes técnicos para su óptimo rendimiento.

En este proceso, Hreiz et al. (2017) indican que: “*la simulación constituye una herramienta predictiva poderosa para asistir y dar soporte a ingenieros para conducir estudios costo-eficiencia de digestores anaeróbicos y determinar el diseño y condiciones operativas óptimas: (1) determinando los requerimientos de calor (...), (4) las simulaciones permiten determinar qué fenómenos conducen a las mayores pérdidas de calor y probar la eficiencia de soluciones técnicas potenciales para limitar estas pérdidas y mejorar el balance de energía del digestor, (...)*”.

Existen múltiples trabajos que presentan modelos térmicos de biodigestores para zonas frías. Weatherford y Zhai (2015) revisan modelos existentes para digestores de tipo bolsa en zonas frías. Axaopoulos et al. (2001) simulan, mediante el software TRNSYS, un digestor enterrado de 45 m³ usando datos climáticos experimentales, temperatura ambiente, irradiancia total sobre superficie horizontal y velocidad de viento.

En este trabajo, se utiliza el software SIMUSOL para realizar este modelo, contando ya con múltiples aplicaciones que demostraron su potencialidad. Quiroga et al. (2006) y Suárez (2012) realizan y ajustan un modelo de invernadero para cultivo de vegetales en Salta. González et al. (2014) modelan un colector solar de aire y ajustan el modelo con datos experimentales.

Los resultados del modelado térmico se contrastan con datos recabados a nivel experimental con la puesta en marcha del digestor. Dicho modelo, se utilizará para simular el comportamiento del sistema frente a la variación en el registro de los datos de entrada, principalmente, al variar las condiciones climáticas. Se pretende además alentar la aplicación del software SIMUSOL para el ámbito de la biodigestión, que aún cuenta con escasos reportes.

METODOLOGÍA

Descripción del prototipo de digestor anaerobio

Dentro del Área experimental de INAHE, en el Centro Científico Tecnológico (CCT) Mendoza (32,89° S; 68,87° O), se instaló un prototipo de biodigestor (ver Figura 1) a una altitud de 830 m.s.n.m. El digestor es de tipo tubular o de bolsa, construido en polietileno de 200 micrómetros, con un volumen útil de 0,25 m³. El prototipo, diseñado para trabajar semi-enterrado en zonas frías, se encuentra montado sobre una plataforma en altura para facilitar su operación e introducción de mejoras. Dispone de aislación térmica en todo su envolvente. La cubierta está constituida por un film de polietileno translúcido de 200 micrómetros de espesor con inclinación de 144° respecto a la horizontal. La cubierta aislada móvil dispone en su cara interior de papel metalizado reflectante y EPS de 2 cm, con una inclinación de 60° respecto a la horizontal. Se indica con puntos rojos la ubicación aproximada de los sensores de temperatura en el corte transversal. El prototipo dispone de dos sets de sensores como los indicados.

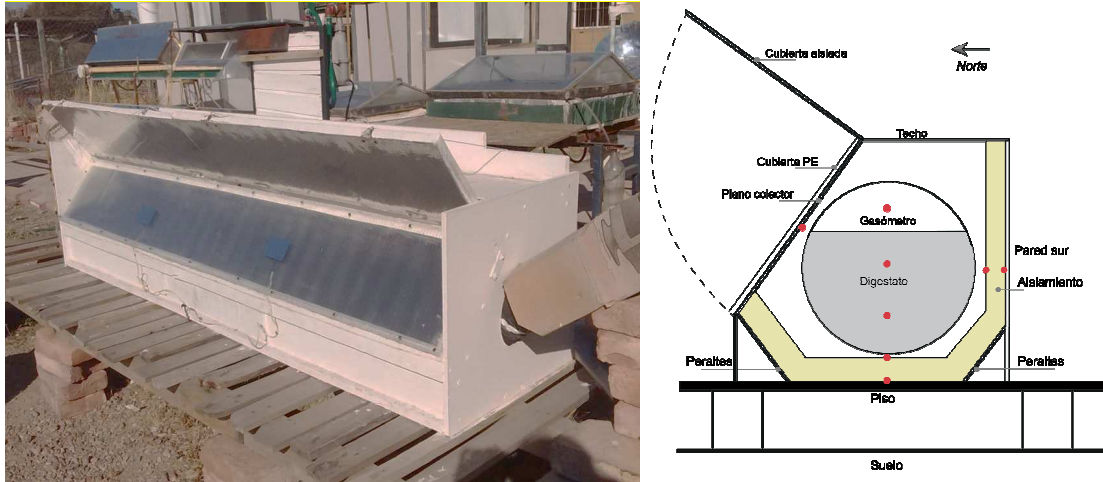


Figura 1. Prototipo en ensayo. Vista anterior y croquis detallando principales partes del mismo.

Descripción del modelo térmico

Se propone un modelo de 1 dimensión “1-D” para simular la variación de temperatura de la biomasa que se está descomponiendo anaeróbicamente, en función de las condiciones climáticas experimentadas en la ciudad de Mendoza (ver Figura 2). Se consideran intercambios de calor por radiación, convección y conducción, además de ganancia de calor a través de un plano colector expuesto a la radiación solar. Se representan con módulos resistivos, flujos de calor y fuentes de temperatura, los intercambios de calor presentes en el prototipo y su interacción con el ambiente.

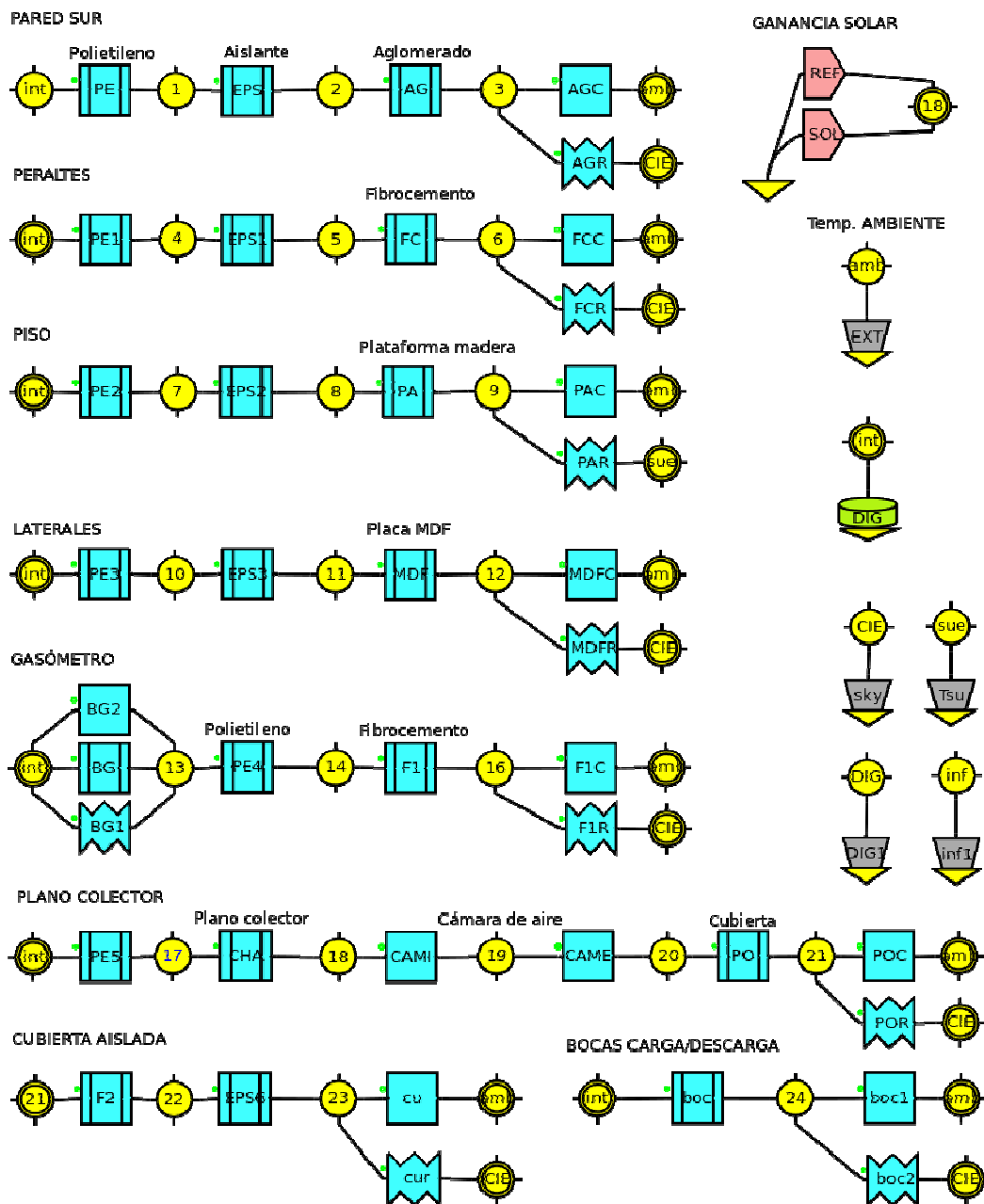


Figura 2. Diagrama DIA utilizado para la simulación con SIMUSOL

a) Intercambios de calor

El modelo representa el comportamiento térmico del prototipo a través de los fenómenos de: a) conducción: a través de muros, piso, techo del gasómetro y plano colector; b) convección: desde superficies exteriores de muros, piso, techo, plano colector al ambiente y en la cámara de aire del plano colector; c) radiación: desde superficies exteriores de muros, piso, techo y plano colector; d) radiación entre la superficie libre del digestato y la cubierta del gasómetro; e) ganancia solar directa y reflejada a través de plano colector.

Los supuestos asumidos por el modelo son:

- ✓ cada elemento es representado por una sola temperatura 1-D. Se desestima la estratificación en los fluidos y gradiente térmico en sólidos,
- ✓ no se considera efecto de acumulación de energía en los materiales, envoltorio de polietileno, aislantes térmicos de muros, techo y piso ni en el biogás presente en el gasómetro,

- ✓ el gasómetro es simulado como un prisma rectangular, con su altura determinando el volumen del gasómetro totalmente inflado,
- ✓ se descartan intercambios radiativos entre superficies internas por ser un equipo prácticamente compacto sin espacios abiertos interiores, con excepción del intercambio radiativo entre la superficie del digestato y la superficie interior del gasómetro,
- ✓ el intercambio radiativo de la superficie externa del piso hacia el ambiente es con el suelo, a una temperatura igual a la media mensual para el mes de junio, de 7,9 °C,
- ✓ se descarta generación de calor por microorganismos, y pérdida de calor por evaporación adentro del digestor y en el gas,
- ✓ al ser un proceso en batch no se consideran intercambios de calor por transferencia de masa en la carga y descarga,
- ✓ no se considera pérdida o ganancia de energía por ventilación, infiltración de aire por ser un sistema herméticamente cerrado,
- ✓ se asume que el digestor no afecta la temperatura de la atmósfera, pero ésta si afecta la temperatura del digestor,
- ✓ se asume que el digestato tiene una capacidad calorífica similar al agua (Hreiz et al., 2017; Perrigault et al., 2012), dado que el digestato tiene solo un 8,9 % ST.

Varios autores modelan estos sistemas térmicos asumiendo una temperatura homogénea del digestato en todo su volumen, al igual que en este trabajo. Considerando la heterogeneidad térmica, se requeriría de dinámica de fluidos computacional (CFD), pero es muy compleja en digestión anaerobia por existir una superficie libre, con burbujas de biogás, sólidos suspendidos y un carácter marcadamente no-Newtoniano del digestato (Hreiz et al., 2017).

Dado que la zona del techo de gasómetro no está aislada, se incorpora el intercambio radiativo entre la superficie libre del digestato y la superficie interior de la cubierta del gasómetro, para evaluar su magnitud; considerando valores experimentales preliminares obtenidos, y que estas pérdidas han probado ser considerables por otros autores (Hreiz et al., 2017).

Los intercambios radiativos de las superficies exteriores con el ambiente se implementan usando una temperatura de cielo T_{sky} (Ecuación 1), donde T_{At} es la temperatura ambiente expresada en K (Swinbank, 1963).

$$T_{sky} = 0,0552T_{At}^{1,5} \quad (1)$$

b) Parámetros usados en el modelo

Para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor (ver Tabla 1) se sigue la metodología propuesta por Perrigault et al. (2012) e Incropera et al. (2011).

Elemento	Conductividad Térmica [W/m°C]	Fuente
<i>Aislante EPS</i> ¹	0,035	IRAM11601:2002
<i>MDF 13 mm “particle board high density”</i>	0,17	
<i>Aglomerado 15 mm “particle board low density”</i>	0,078	
<i>Placa Fibrocemento “Asbestos–cement board”</i>	0,58	(Incropera et al., 2011)
<i>Chapa galvanizada</i> ²	118	
<i>Madera de soporte de piso Eucaliptus</i>	0,12	
<i>Polietileno de cubierta 200 microm</i>	0,43	DIN52612
<i>Biogás</i>	0,025	(Perrigault et al. (2012))

Coeficientes Convectivos [W/m ² °C]		
<i>Exterior vertical muro Sur y laterales</i>	13,36	A partir de Perrigault et al. (2012)
<i>Exterior oblicuo Cubierta</i>	28,78	
<i>Exterior horizontal piso</i>	19,60	
<i>Exterior horizontal techo</i>	23,74	
<i>Interior gasómetro</i>	1,51	
<i>Interior cámara de aire plano colector/cubierta</i>	1,28	

Emisividad		
<i>Superficie interna gasómetro</i>	0,90	(Hreiz et al., 2017)
<i>Digestato en contacto con biogás</i>	0,90	
<i>Superficies exteriores, muros, techo, piso y plano colector</i>	0,95	Anónimo

1: Expanded Polystyrene / Poliestireno expandido: espesor 5 cm, 20 kg/m³.

2: *Chapa* Sinusoidal (Acero + Zinc) pintada negro mate, asumido como puro Zn.

Tabla 1. Parámetros térmicos usados en el modelo

El cálculo de los coeficientes convectivos se realizó en una planilla de cálculos externa al software SIMUSOL. Estos coeficientes estáticos no consideran por ejemplo, las variaciones de temperatura existentes en la realidad. Saravia y Alía de Saravia (2014) proponen una metodología superadora que incorpora el cálculo de los coeficientes convectivos dentro del mismo software. Otros parámetros utilizados se detallan en la Tabla 2.

Elemento	Valor	Fuente
<i>Transmitancia visible polietileno de la cubierta</i>	65 %	(Perrigault et al., 2012)
<i>Masa de digestato</i>	234 kg	Medición propia
<i>Capacidad calorífica digestato</i>	4180 [J/kg*K]	(Hreiz et al., 2017; Perrigault et al., 2012)
<i>Área total envolvente</i>	2,96 m ²	Medición propia
<i>Área de ganancia solar</i>	0,48 m ² (16,2% del total)	Medición propia

Tabla 2. Otros parámetros considerados en el modelo

Ensayo experimental del dispositivo y adquisición de datos

Se realizó un ensayo consistente en 150 horas de mediciones experimentales. Este tiempo corresponde al periodo entre las 00:00 hs del día 20/06/2018 hasta las 23:00 hs del día 25/06/2018.

El prototipo de digestor se utilizó con una carga consistente de mezcla de agua y guano caprino en una proporción de 8,9 % de Sólidos Totales (ST). Si bien su diseño permite carga semi-continua de material, en esta etapa se operó en forma discontinua o batch.

Se le asignó al único elemento másico, el digestato, una temperatura inicial de 17,2 °C. Durante el día (entre las 9:30 y las 16:30), con cielo despejado, se simula con radiación solar incidiendo sobre el plano colector (cubierta aislada abierta). Al atardecer (desde las 16:30), la cubierta cierra el plano colector disminuyendo pérdidas. Este comportamiento se modeló usando una resistencia conductiva durante las horas sin radiación solar, igual al EPS 0,035 W/m°C. En la Figura 2, se puede observar las dos vías de simulación en el nodo 21.

Un dato indispensable para el cálculo solicitado por Simusol, es la radiación global sobre el plano inclinado del colector solar. Dichos valores se calcularon por medio del software Energy Plus usando de base los datos de irradiancia de la estación de INAHE. En primer lugar se armó un archivo de clima en formato *.epw con datos de radiación global sobre plano horizontal. Por medio de Legacy Openstudio se dibujó el plano con la misma inclinación del colector. Se corrió la simulación con el dato de salida requerido con frecuencia horaria (OutputVariable: Surface Outside face Incident solar radiation ratio per área).

Se realizó el seguimiento de las variables climáticas (velocidad del viento, temperatura ambiental e irradiancia global en un plano horizontal) y de comportamiento térmico del prototipo (temperatura) durante 6 días consecutivos, en el inicio de la temporada invernal. Según el Servicio Meteorológico Nacional, el mes de junio se caracteriza por una mínima media de 4 °C y máxima media de 15 °C.

Los datos climáticos locales (ver Figura 3) se obtuvieron de la estación meteorológica del CCT Mendoza y de la estación de medición de irradiancia e iluminancia de INAHE (INAHE, s/f). De la primera se utilizaron los valores medios diarios de velocidad de viento [m/s] y de la segunda los valores de irradiancia global en plano horizontal [W/m²]. Estos datos se obtuvieron con un piranómetro Eppley 8-48, con un datalogger Webdaq100 registrando minuto a minuto datos de irradiancia e iluminancia global y difusa. El dato horario de radiación se obtuvo por promedio de los 60 datos registrados y la velocidad de viento, considerada en el cálculo de coeficientes convectivos, y fue el promedio de todo el periodo.

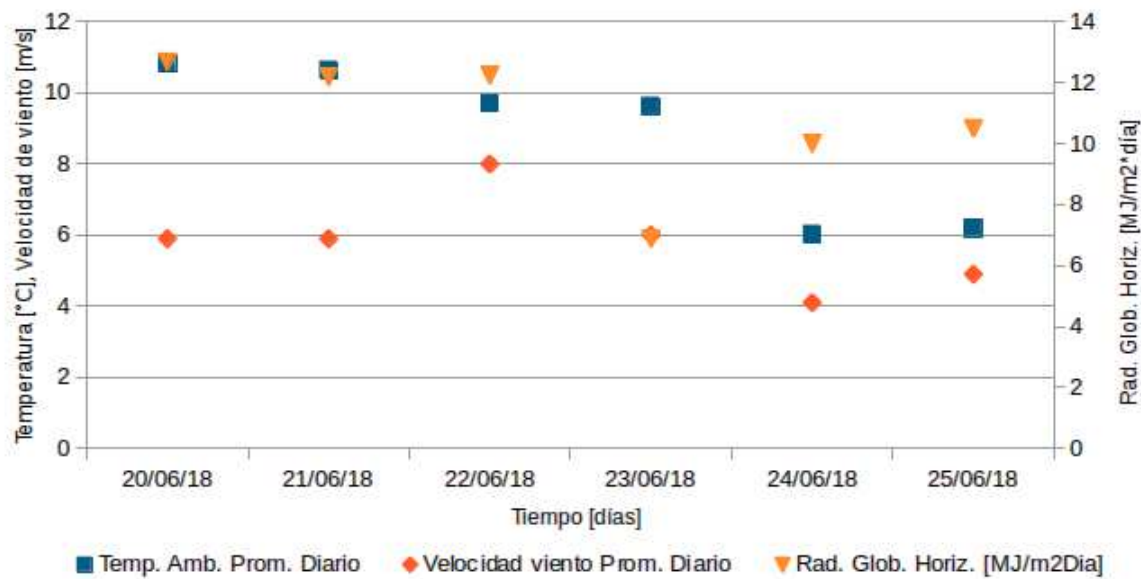


Figura 3. Datos climáticos promedio diario durante período de ensayo

Las mediciones de temperatura del prototipo se realizaron con 17 sensores digitales DS18B20 y un datalogger, fabricado por quienes suscriben, basado en microcontroladores Arduino. Varios autores han utilizado este tipo de esquemas de medición y adquisición de datos entre los que se destacan Bohórquez et al. (2009) por presentar el mismo como una metodología replicable. Las temperaturas monitoreadas en el prototipo cada 15 minutos se promediaron en base horaria.

El sensor utilizado se presenta con un encapsulado TO-92 y envainado plástico. El error es, según dato del fabricante, de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, para el resto del rango es de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La resolución del sensor es programable desde 9 a 12 Bits. En los ensayos se programó en 10 Bits.

Se introdujeron pequeñas modificaciones en el modelo propuesto, observando la mejora en el ajuste con respecto a los datos experimentales, como por ejemplo: el espesor del aislamiento, la cantidad de masa térmica del digestato, la cantidad de la energía reflejada por el reflector que es absorbida por el plano colector (JREF); y asumiendo que el rendimiento del colector es del 50 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ajustes y validación del modelo

La Figura 4 muestra con detalle las temperaturas del digestato registradas en la experiencia (TEMP DIG) y las obtenidas por la simulación (TEMP int).

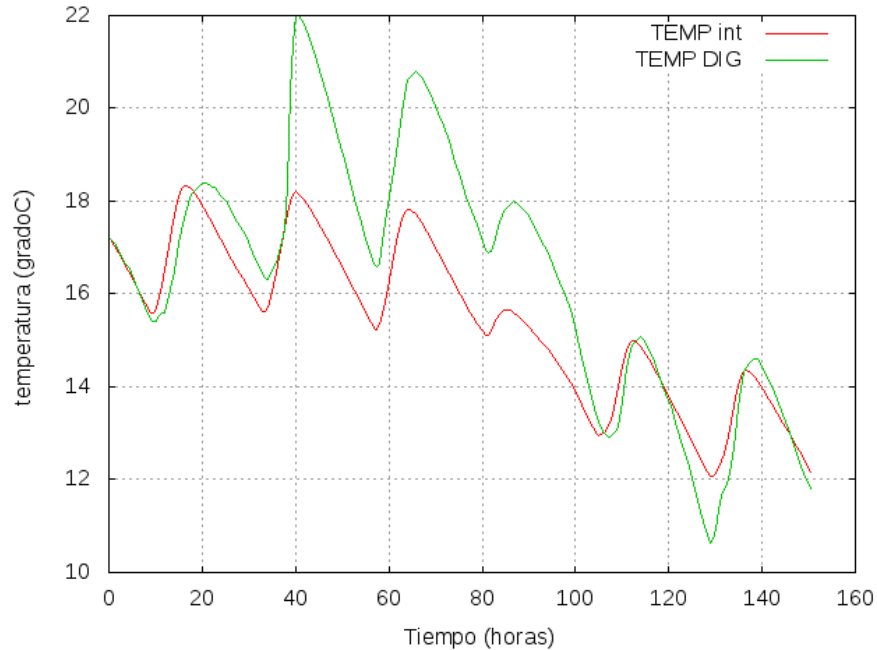


Figura 4. Temperaturas del digestato medidas y simuladas. Donde: TEMP int = Temperatura simulada; TEMP DIG= temperatura medida.

Considerando los datos horarios de temperatura promedio de los cuatro sensores del digestato, en comparación con los datos de simulación para todo el periodo, la diferencia entre los valores es de 1,36 °C que equivale un 8,44 % de la temperatura media del digestato (ver Figura 4).

Perrigault et al. (2012) obtienen un error típico de 0,47 °C correspondiendo a un 2 % de error respecto a la misma temperatura. Hassanein et al. (2015) obtienen un acuerdo entre los datos simulados y datos validados, con una diferencia de 0,34 °C o 3,3 % de diferencia. Por último Jayashankar et al. (1989) obtienen una diferencia de $\pm 2,6$ °C mientras que Fleming (2002) obtiene un 5,7 % de diferencia.

Se evalúa estadísticamente el comportamiento del modelo basado en el primero, quinto y sexto día, a través del Test no paramétrico de Kruskal Wallis. Los días restantes no se toman en cuenta por presentar un comportamiento poco usual, dado por la variabilidad climática real no aplicable a un modelo computacional de este tipo. Se encuentra que entre las series de datos de temperatura del digestato medida y simulada no hay una diferencia significativa, con $H = 0,002$ y $p = 0,963$.

En la Figura 5 se presentan los flujos de calor entre la masa del digestato y el ambiente a través de las distintas capas: polietileno, aislante y material de envolvente. El valor positivo de los flujos indica pérdida de calor hacia el ambiente. La pérdida de calor a través del gasómetro (RPE4) es la más significativa, representando aproximadamente un 60 % del total, por ser el elemento a mayor temperatura de todo el sistema y no estar aislado del ambiente en este ensayo.

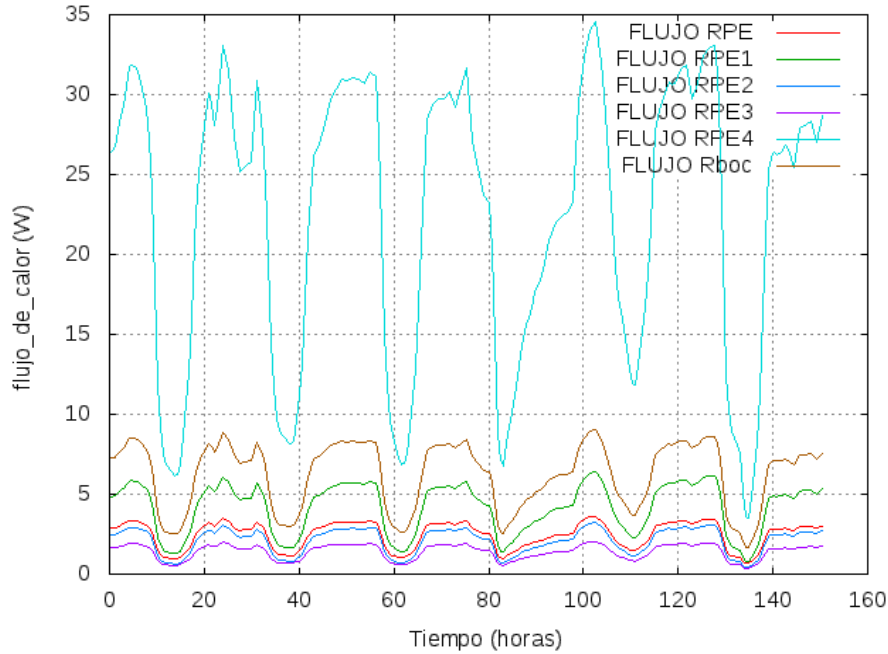


Figura 5. Flujos de calor desde la masa del digestato. Donde: RPE: muro Sur. RPE1: peraltes Norte y Sur del piso. RPE2: piso. RPE3: ambos laterales. RPE4: gasómetro. Rboc: bocas de alimentación/descarga.

De lo analizado para el gráfico anterior, interesó indagar sobre cuál de los mecanismos de transferencia de calor presentes en la zona del gasómetro, era el principal en cuanto a la pérdida de calor.

En la Figura 6 se desglosa el resultado de los flujos de calor por convección, conducción y radiación en el gasómetro. La radiación es el mecanismo más significativo con aproximadamente dos terceras partes de las pérdidas de calor que, en relación a las pérdidas totales, explicaría el 40 % de las mismas. Esto se condice con lo estudiado por Hreiz et al. (2017) que indican que alrededor de un 30 % de las pérdidas de calor del digestato son por radiación desde la superficie del digestato.

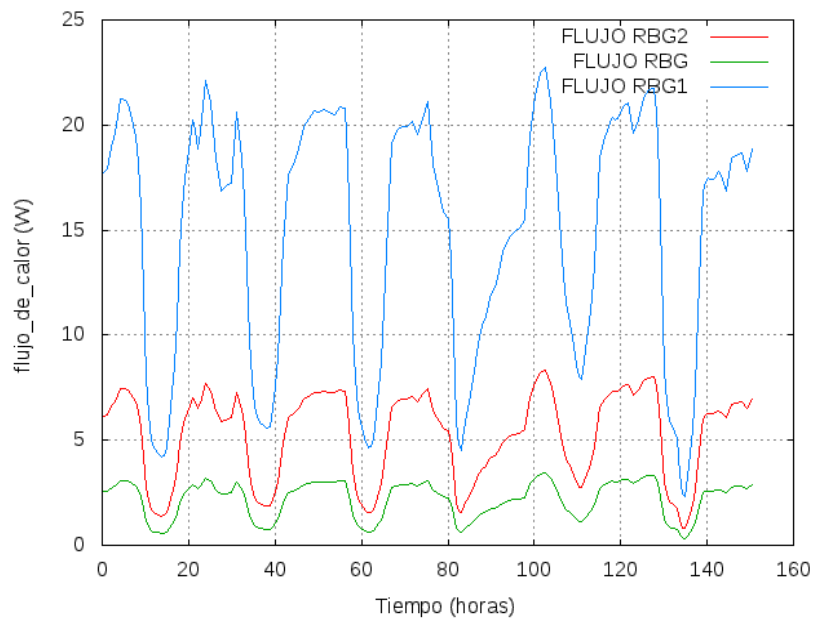


Figura 6. Flujos de calor a través del gasómetro. Donde: RBG2: resistencia convectiva, RBG: resistencia conductiva, RBG1: resistencia radiativa.

El calor perdido a través de las bocas de alimentación y descarga, una zona sin aislamiento, de mucha menor área expuesta, explica un 15 % de las pérdidas de calor.

CONCLUSIONES

El modelado del comportamiento térmico de un sistema de digestión anaerobia con SIMUSOL, incorpora en la temática una herramienta fundamental para mejorar un diseño y conocer con más detalle cómo se distribuyen los flujos de calor en un prototipo.

El modelo se ajusta a la realidad, considerando los datos experimentales seleccionados, lo que permite hacer nuevas simulaciones, variando las condiciones climáticas y poniendo a prueba el diseño del prototipo, virtualmente en otros climas.

El modelo permite identificar la existencia y magnitud de flujos de calor importantes como el existente en el gasómetro. Del mismo modo identificar la necesidad de ampliar el área del plano colector para aumentar la ganancia de calor en el digestato.

Nuevos datos, que surjan de la experimentación en proceso, permitirán realimentar el modelo, con el objetivo de ajustarlo cada vez más a la realidad y a la variabilidad climática presente.

REFERENCIAS

- Fleming, J. G. (2002). Novel simulation of anaerobic digestion using computational fluid dynamics, 208. Retrieved from <http://repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/4158/1/etd.pdf>
- González, S. M., Larsen, S. F., Hernández, A., & Lesino, G. (2014). Thermal evaluation and modeling of a double-pass solar collector for air heating. *Energy Procedia*, 57, 2275–2284. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.235>
- Hassanein, A. A. M., Qiu, L., Junting, P., Yihong, G., Witarsa, F., & Hassanain, A. A. (2015). Simulation and validation of a model for heating underground biogas digesters by solar energy. *Ecological Engineering*, 82, 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.010>
- Hreiz, R., Adouani, N., Jannot, Y., & Pons, M. N. (2017). Modeling and simulation of heat transfer phenomena in a semi-buried anaerobic digester. *Chemical Engineering Research and Design*, 119, 101–116. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.007>
- INAHE. (s/f). Equipamiento del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía. Disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/portal/inahe/equipamiento.pdf>
- Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. US Patent 5,328,671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Jayashankar, B. C., Kishor, J., Goyal, I. C., Sawhney, R. L., & Sodha, M. S. (1989). Solar assisted biogas plants IV: Optimum area for blackening and double glazing over a fixed-dome biogas plant. *International Journal of Energy Research*, 13(2), 193–205. <https://doi.org/10.1002/er.4440130208>
- Orduna D., Buenanueva F., Esteves A. (2007). Biodigestor calefaccionado con energía solar para producción discontinua de biogás. Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (INCIHUSA-CONICET).
- Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J., & Poggio, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource Technology*, 124, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.019>
- Preston, T.R., Rodríguez, L., (2002). Low-cost biodigesters at the epicenter of ecological farming systems. Proceedings Biodigester Workshop, March 2002.
- Quiroga, M., Echazú, R., Saravia, L., & Palacios, A. (2006). SIMULACIÓN CON SIMUSOL – LINUX DE INVERNADERO ANDINO DE EL ROSAL, SALTA, 10, 9–13.

- Saravia, L. S., & Alía de Saravia, D. (2014). Acceso al cálculo directo de coeficientes convectivos dentro del programa simusol, 2(8), 7–14.
- Suárez, H. (2012). Invernadero con acondicionamiento térmico solar: modelización con simusol, 16(fig 1), 167–172.
- Swinbank, W. C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339–348. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>
- Velo, E., 2006. Aprovechamiento energético de la biomasa. In: Velo E., Sneij J., Delclòs J. (Eds.), *Energía, participación y sostenibilidad. Tecnología para el desarrollo humano*. Barcelona: Ingeniería Sin Fronteras – ISF. p. 131e44.
- Weatherford, V. C., & Zhai, Z. J. (2015). Affordable solar-assisted biogas digesters for cold climates: Experiment, model, verification and analysis. *Applied Energy*, 146, 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.111>

ABSTRACT

A thermal model of an anaerobic digester previously builded is developed with SIMUSOL. The digester is heated with passive solar energy and insulated to reach the optimal thermal conditions. The computational model represents heat fluxes between the main elements of the prototype envelope, with the ambient air and the sky. For the adjust and validation, an experiment is conducted with 150 hours of measures, and registration of entry data - air temperature, solar radiation, wind speed and 17 temperature nodes inside the prototype. The model is revised with experimental results, checking the differences between simulated and experimental data. A good agreement of this two series of data is reached, that allows to model the thermal behaviour of the prototype and to provide a tool for design improvement.

Keywords: Biodigester, Solar Energy, Thermal Simulation, SIMUSOL