

OPTIMIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES USANDO ALGORITMOS METAHEURISTICOS

OPTIMIZATION IN THE PRODUCTION OF METHANE FROM WASTEWATER USING METAHEURISTICS ALGORITHMS

Morales-Rivera J. P.^{1*}, Gurubel-Tun K. J.¹, León-Becerril E.², del Real-Olvera J.², Zúñiga-Grajeda V.¹

¹ División de Ingenierías e Innovación Tecnológica, Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Tonalá, Av. Nuevo Periférico 555, Ejido San José Tatepozco, 45425 Tonalá, Jalisco, México.

²Tecnología Ambiental, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Av. de los Normalistas 800, Colinas de La Normal, 44270 Guadalajara, Jalisco, México.*moralesjuan042@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo aborda el estudio de la producción de metano a partir de aguas residuales de la industria de las carnes frías, donde se propone la modificación de un modelo matemático para describir la digestión anaerobia previamente publicado en la literatura. Al comparar los datos experimentales obtenidos con los calculados por el modelo propuesto se encontró un ajuste $R^2 = 0.767$, esto para valores de producción de metano puntual en sesenta días. Por otro lado, se propone en este trabajo una modificación al modelo propuesto y se optimizaron cinco diferentes parámetros cinéticos, por medio

del algoritmo de búsqueda metaheurístico *Particle Swarm Optimization (optimización de enjambre de partículas)*. Al evaluar los resultados de la optimización se observó una mejora en el ajuste inicial del modelo a $R^2 = 0.927$, permitiendo concluir que este tipo de algoritmos metaheurísticos pueden ser muy eficaces al ajustar los parámetros de modelos altamente no lineales y así describir con mayor precisión los sistemas de digestión anaerobia.

Palabras Clave:

Optimización; modelado; metaheurístico; digestión anaerobia.

ABSTRACT

The present work deals with the study of methane production from wastewater from the cold meats industry, where the modification of a mathematical model to describe anaerobic digestion previously published in the literature is proposed. When comparing the experimental data obtained with those calculated by the proposed model, an adjustment $R^2 = 0.767$ was found, this for punctual methane production values in sixty days. On the other hand, a modification to the proposed model is proposed and five different kinetic parameters were optimized, by means of the metaheuristic search algorithm Particle Swarm Optimization (particle swarm optimization). When evaluating the results of the optimization we observed an improvement in the initial adjustment of the model to $R^2 = 0.927$, allowing to conclude that this type of metaheuristic algorithms can be very effective when

adjusting the parameters of highly non-linear models and this describe with greater precision the anaerobic digestion systems.

Keywords:

Optimization; modeling; metaheuristic; Anaerobic digestion.

INTRODUCCIÓN

El proceso de digestión anaeróbica se ha convertido en uno de los métodos más interesantes, para darle tratamiento a los efluentes residuales líquidos orgánicos. Ya que este proceso cuenta con varias virtudes aparte de darle tratamiento a residuos agroindustriales se obtiene como productos el biogás que es considerado como un recurso energético renovable y el restante del proceso puede ser utilizado como fertilizante para los campos agrícolas [1]. El proceso de producción de biogás se puede ver perturbado por varios factores como lo son el pH, la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, la

composición del sustrato etc. [2 y 3]. Estos sistemas de aguas residuales podrían llegar a convertirse en un problema muy serio si se descargan directamente en ríos, cuerpos de agua o en el sistema de alcantarillado. Los procesos de tratamiento para este tipo de residuos hay desde los fisicoquímicos hasta los biológicos, dentro de estas opciones, el proceso aerobio se ha mostrado como un sistema bastante efectivo para el eficaz manejo de estos residuos, llegando a bajar los niveles de amoníaco en un 99.3%, para la demanda química de oxígeno (DQO) en un 95.1 y de fosfatos en un 83.5%, esto a nivel laboratorio [4]. El sistema de digestión anaeróbico presenta otra propuesta para la depuración de este tipo de aguas residuales que son altas en carga orgánica. Siendo sus ventajas la mínima producción de lodo residual, los bajos requerimientos energéticos para realizar el proceso, la no necesidad de introducir oxígeno al sistema, la

eliminación de patógenos y finalmente la producción de productos como el biogás [5]. Así mismo con la energía contenida en el biogás es suficiente para convertirse en energía eléctrica mediante un motor a biogás [6]. La digestión anaeróbica es un proceso bastante complejo donde trabajan varios tipos de microorganismos en paralelo y en serie. De esta forma, se transforman las grandes cadenas orgánicas de los sustratos en activos cada vez más simples para finalmente llegar a producir metano y dióxido de carbono en fase gaseosa [7]. Si se aborda desde un punto de vista matemático este proceso es no lineal y muy altamente manipulado por las condiciones operantes del medio y por los parámetros del sistema. El modelo del IWA (The International Water Association), ADM1 (Anaerobic Digestion Model 1) reúne el proceso de transferencia líquido-gas más los 26 estados dinámicos [8]. Sin embargo, dada la alta complejidad de este sistema se hace necesaria la aparición de

varias propuestas de modelos simplificados. Lo anterior, con la intención de optimizar la producción de metano, obtener un control más eficaz del proceso de digestión o bien hacerlos más afín a diversos tipos de reactores o sustratos [9 y 10]. Una de estas propuestas es un sistema de dos reacciones con la hidrólisis y la metanogénesis como protagonistas.

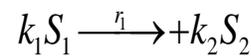
Varios algoritmos de optimización se han implementado en este tipo de procesos anaeróbicos en busca de optimizar sus parámetros. Dentro de los algoritmos metaheurísticos el PSO (particle swarm optimization) presenta varios puntos a favor como su sencillez de ejecución, eficiencia computacional y su manera amigable de implementación [11].

METODOLOGÍA

Las muestras de agua su recolección y tratamiento con un reactor flujo ascendente filtro anaerobio se comentan en el trabajo previo [12]. En este trabajo se

propuso una modificación al modelo previamente reportado [10] de acuerdo con las siguientes reacciones de la **Figura 1**.

Hidrólisis



Metanogénesis



Figura 1. Modelo dos reacciones modificado

dónde:

$r_1 = \mu_1 X_1$ tasa de reacción en la hidrólisis

μ_1 = Modelo crecimiento biomasa hidrolisis

X_1 = Biomasa hidrolítica

$r_2 = \mu_2 X_2$ tasa de reacción en la metanogénesis.

μ_2 = Modelo crecimiento biomasa metanogénesis

X_2 = Biomasa metanogénica

k_1 = Tasa de rendimiento para la degradación del sustrato

k_2 = Tasa de rendimiento para la producción de AGV's (Ácidos Grasos Volátiles)

k_3 = Tasa de rendimiento para el consumo de AGV's

k_4 = Tasa de rendimiento para la producción de CO₂

k_5 = Tasa de rendimiento para la producción de CH₄

S_1 = Concentración sustrato inicial [g/L]

S_2 = Concentración sustrato proceso metanogénesis [g/L]

Para las cinéticas de crecimiento bacteriano en la propuesta de este trabajo se tomaron en cuenta los modelos de Monod y Andrews [13]. Para la reacción de hidrólisis se usó el de Monod y el modelo de Andrews para la reacción para microbios metanogénicos, como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Modelos cinéticos de crecimiento microbiano.

Cinética	Ecuación
Monod	$\mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S}$
Andrews	$\mu = \mu_{\max} \frac{1}{1 + \frac{K_S}{S} + \frac{S}{K_I}}$

dónde:

S=Concentración sustrato

μ_{\max} =Cinética crecimiento biomasa

K_S = Constante de saturación media de sustrato

K_I = Factor de inhibición

Sustituyendo el modelo propuesto en este trabajo con las cinéticas de crecimiento ya mencionadas se obtuvo el modelo de la **Figura 2**.

$$\frac{dX_1}{dt} = D(X_{1in} - X_1) + \left(\mu_{1\max} \frac{S_1}{K_{S1} + S_1} \right) X_1 - K_d X_1$$

$$\frac{dS_1}{dt} = D(S_{1in} - S_1) - \left(\frac{K_1 \mu_{1\max} \frac{S_1}{K_{S1} + S_1} X_1}{Y} \right)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = D(X_{2in} - X_2) + \left(\mu_{2\max} \frac{1}{1 + \frac{K_{S2}}{S_2} + \frac{S_2}{K_I}} \right) X_2 - K_d X_2$$

$$\frac{dS_2}{dt} = D(S_{2in} - S_2) + \left(\frac{(k_2 \mu_{1\max} \frac{S_1}{K_{S1} + S_1} X_1)}{Y} \right) - \left(\frac{k_3 \mu_{2\max} \frac{1}{1 + \frac{K_{S2}}{S_2} + \frac{S_2}{K_I}} X_2}{Y} \right)$$

$$\frac{dMet}{dt} = Y_{CH4} \left(\mu_{2\max} \frac{1}{1 + \frac{K_{S2}}{S_2} + \frac{S_2}{K_I}} X_2 \right)$$

Figura 2. Modelo completo propuesto en este trabajo.

dónde:

Parámetro Valor [Unidad]

D = Tasa de dilución 0.029 [día⁻¹]

KD = Tasa de decaimiento de microorganismos 0.006 [día⁻¹]

$\mu_{\max 1}$ = Cinética de crecimiento de biomasa primera reacción 0.851 [día⁻¹]

$\mu_{\max 2}$ = Cinética de crecimiento de biomasa segunda reacción 0.128 [día⁻¹]

K_{S1} = Constante de saturación media de sustrato 15.3 [g L⁻¹]

K_{S2} = Constante de saturación media de sustrato 0.0364 [g/L]

K_I = Factor de inhibición 95.9 [g L⁻¹]

K_1 = Tasa de rendimiento para la degradación del sustrato 42.14

K2 = Tasa de rendimiento para la producción de AGV's 116.5 [mmol g⁻¹]

K3 = Tasa de rendimiento para el consumo de AGV's 268 [mmol g⁻¹]

K4 = Tasa de rendimiento para la producción de CO2 50.6 [mmol/g]

K5 = Tasa de rendimiento para la producción de CO2 343.6 [mmol g⁻¹]

X1in = Biomasa activa para la primera reacción Variable [g L⁻¹]

S1in = Cantidad de sustrato para la reacción inicial Variable [g L⁻¹]

X2in = Biomasa activa para la segunda reacción Variable [g L⁻¹]

S2in = Cantidad de sustrato para la segunda reacción 0 [g L⁻¹]

YCH4=Factor de rendimiento producción CH4 453 [mmol g⁻¹]

Y=Coficiente producción nuevas células 0.083 [g g⁻¹]

Los parámetros estequiométricos necesarios para poder simular el sistema modificado propuesto se tomaron de la literatura [10,14 y 15]. La estrategia de optimización consiste en plantear de acuerdo con la **Figura 3**, una función objetivo la cual será minimizada haciendo uso del algoritmo metaheurístico ya mencionado con anterioridad [16].

$$J = \sum_{i=1}^l [y_{\text{exp}}(i) - y_{\text{mod}}(i)]^2 \rightarrow \min$$

Figura 3. Función objetivo

dónde:

Y_{exp}=Valores metano experimental

Y_{mod}=Valores metano encontrados por el modelo propuesto

Al aplicar esta función, el objetivo para el algoritmo es buscar valores que minimicen a la misma, al mismo tiempo que va encontrando valores óptimos de los parámetros que se quieran optimizar. Los parámetros a mejorar fueron:

k₁: Tasa para la degradación del sustrato 42.14 [mmol g⁻¹].

k₂: Tasa de para la producción de AGV's (Ácidos Grasos volátiles) 116.5 [mmol g⁻¹].

k₃: Tasa de para el consumo de AGV's 268 [mmol g⁻¹].

k₄: Tasa para la producción de CO₂ ⁽¹⁾ 50.6 [mmol g⁻¹].

k₅: Tasa para la producción de CO₂ 343.6 [mmol g⁻¹].

RESULTADOS

Todas las simulaciones y optimizaciones se realizaron usando el software MatLab® R 2016a, primero se obtuvo un gráfico para la producción de metano de manera acumulada como lo muestra la **Figura 4**.

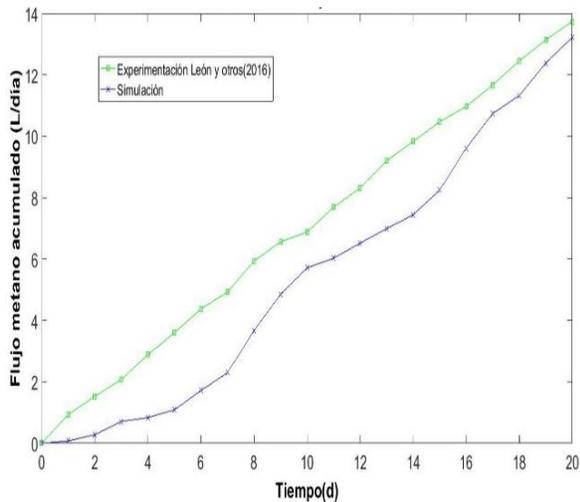


Figura 4. Simulación modelo producción de metano acumulado.

Después se obtuvo la simulación del modelo propuesto y se comparó con los resultados obtenidos a nivel laboratorio para la producción de metano puntual con aguas residuales de la industria de las carnes frías (**Figura 5**).

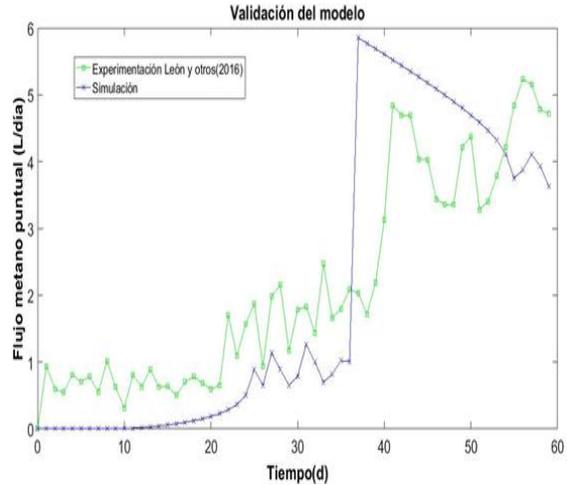
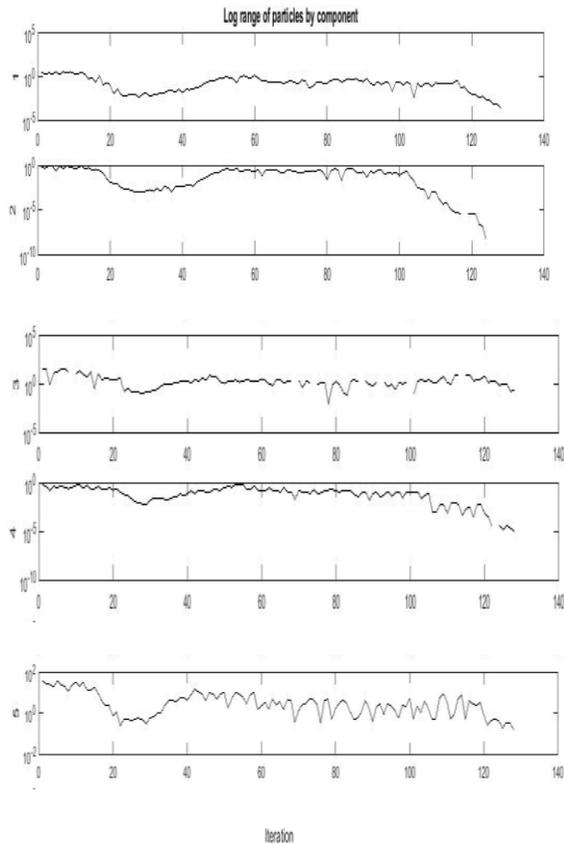


Figura 5. Simulación modelo producción de metano puntual.

Una vez que se representó el modelo para producción de metano acumulado y puntual, se trabajó con la optimización aplicando el algoritmo de enjambre de partículas (PSO). Obteniéndose la **Figura 6** que describe el trazado para el rango del enjambre en la búsqueda de minimizar la función objetivo.



Como se puede observar mientras la tendencia de las partículas sea a cero es indicativo de que la minimización de la función objetivo se realiza de buena manera como lo indican en todos los parámetros buscados por el algoritmo.

Cabe mencionar que se realizó un estudio con más de 50 simulaciones y estas a su vez contaron con un promedio de 130 iteraciones en cada corrida de optimización. En la **Tabla 2** se enlistan los valores cinéticos obtenidos.

Figura 6. Línea trazado enjambre partículas.

Tabla 2. Valores cinéticos optimizados con PSO.

Eficiencia	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	R ²
Mejor	5.608	98.391	259.859	62.740	349.665	0.927
Media	24.492	87.098	249.558	42.507	253.732	0.853
Mínima	12.978	77.032	236.606	70	120.330	0.794

Adicionalmente, se realizó un gráfico de caja para poder visualizar detalladamente el comportamiento estadístico de todos los valores de las constantes cinéticas encontrados en cada corrida del algoritmo metaheurístico (**Figura 7**).

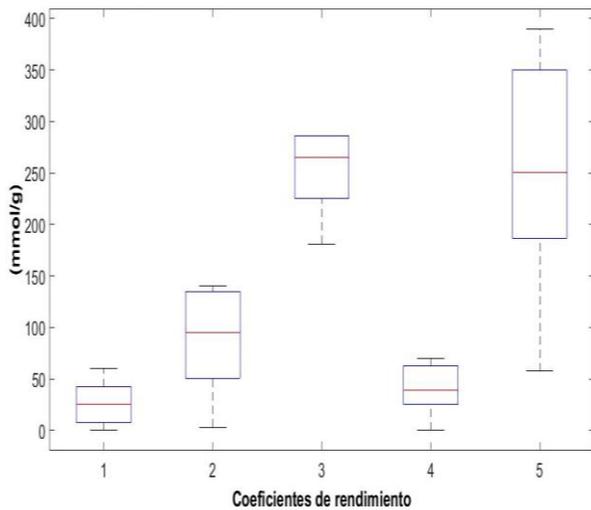


Figura 7. Gráfico de caja valores optimizados modelo.

Finalmente, en la **Figura 8** se volvió a simular el modelo propuesto utilizando los parámetros óptimos encontrados por el algoritmo de búsqueda y comparándolo con el mismo modelo con los valores cinéticos propuestos en la literatura, así como también haciendo

una regresión con los datos obtenidos experimentalmente en un trabajo previo [12].

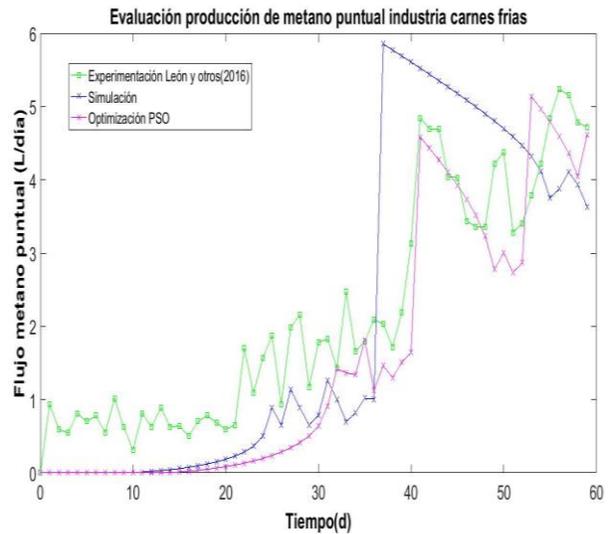


Figura 8. Tendencia modelo (optimizado y literatura).

En esta simulación con valores óptimos se encontró una regresión $R^2 = 0.927$ al comparar con datos experimentales y se nota claramente como la tendencia de la curva con datos mejorados con PSO tiene una tendencia mucho más en común con los datos reales que el mismo modelo, pero con datos tomados de la literatura.

DISCUSIÓN

En el presente trabajo se obtuvo un modelo matemático modificado para simular la producción de metano puntual dentro de un sistema anaeróbico, ajustado a los datos de laboratorio obtenidos por León Becerril *et. al* [12], y por Liu C.F *et. al* [17], donde se simula un solo lote de carga orgánica. En este proyecto se simularon tres lotes de forma continua iniciando con OLR (Organic load Rate) de $1.17 \text{ Kg m}^{-3}\text{d}^{-1}$ luego $1.75 \text{ Kg m}^{-3}\text{d}^{-1}$ y terminando con $3.5 \text{ Kg m}^{-3}\text{d}^{-1}$. Ya que al ir agregando más material orgánico, la producción de biogás no iba a disminuir, sino que al aumentar resultaría más difícil encontrar las cinéticas de crecimiento bacteriano adecuadas para simular estos resultados tan particulares. Se encontró con el beneficio de que el modelo puede ser válido dentro de esos rangos de carga orgánica. Además, el rendimiento del algoritmo de optimización resultó ser

eficiente y con buen ajuste a los datos experimentales ya que obtener esta clase de ajuste resulta bastante complejo y los resultados reportados en la literatura no son tan satisfactorios, usando el ADM1 [18 y 19].

CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo son que la propuesta para un modelo anaeróbico de dos reacciones (hidrólisis y metanogénesis) es válido para aguas residuales con alta carga orgánica como lo son las de la industria de las carnes frías para rangos de carga orgánica de $(1.17 \text{ a } 3.5) \text{ Kg m}^{-3}\text{d}^{-1}$. En la búsqueda de mejorar el rendimiento en la producción de biogás se utilizó el algoritmo de búsqueda PSO, en el cual se obtienen resultados destacados al aumentar el ajuste R^2 del modelo de 0.767 hasta llegar a 0.927. Sumado a esto su bajo costo computacional y alta eficiencia hacen de

este programa una opción muy viable en la búsqueda de mejorar modelos de digestión anaeróbica.

REFERENCIAS

- [1] Dhussa, A. K., Sambhi, S. S., Kumar, S., Kumar, S., & Kumar, S. (2014). Nonlinear Autoregressive Exogenous modeling of a large anaerobic digester producing biogas from cattle waste. *Bioresource technology*, 170, 342-349.
- [2] Zareei, S., & Khodaei, J. (2017). Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Renewable Energy*, 114, 423-427.
- [3] Q. Zhang, J. H, D.J. Lee, Biogas from anaerobic digestion processes: research updates, *Renew. Energy* 98 (2016) 108e119.
- [4] López-López, A., Vallejo-Rodríguez, R., Méndez-Romero, D.C. (2010). Evaluation of a combined anaerobic and aerobic system for the treatment of slaughterhouse wastewater. *Environmental technology*, 31(3): 319–326.
- [5] Harris, P.W., McCabe, B.K. (2015). Review of pre-treatments used in anaerobic digestion and their potential application in high-fat cattle slaughterhouse wastewater. *Applied Energy* 155: 560-575.
- [6] K. Reisberg, L. Sun, L. Leven, S.J. Horn, A. Schnurer, (2013) Biogas production from wheat straw and manuree Impact of pretreatment and process operating parameters, *Bioresour. Technol.* 149 232-237.
- [7] Heponiemi A., Lassi U. (2012). Advanced Oxidation Processes in Food Industry Wastewater Treatment - A Review, in: Valdez, B. (Eds.), *Food Industrial Processes-Methods and Equipment*, In Tech, pp. 313-338.
- [8] Batstone D, Keller J, Angelidaki R, Kalyuzhnyi S, Pavlostathis S, Rozzi A, Sanders W, Siegrist H, Vavilin V (2002) *Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)*, Scientific and Technical Report No. 13. IWA Publishing, London.
- [9] Lara-Cisneros G, Aguilar-Lo´pez R, Femat R (2015) On the dynamic optimization of methane production in anaerobic digestion via extremum-seeking control approach. *Comput ChemEng* 75:49–59.
- [10] Owhondah, R. O., Walker, M., Ma, L., Nimmo, B., Ingham, D. B., Poggio, D., & Pourkashanian, M. (2016). Assessment and parameter identification of simplified models to describe the kinetics of semi-continuous biomethane production from anaerobic digestion of green and food waste. *Bioprocess and biosystems engineering*, 39(6), 977-992.

- [11] Bai, J., Liu, H., Yin, B., & Ma, H. (2015). Modeling of enhanced VFAs production from waste activated sludge by modified ADM1 with improved particle swarm optimization for parameter estimation. *Biochemical Engineering Journal*, 103, 22-31.
- [12] León-Becerril, E., García-Camacho, J. E., Del Real-Olvera, J., & López-López, A. (2016). Performance of an upflow anaerobic filter in the treatment of cold meat industry wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 385-391.
- [13] O. Bernard, Z. Hadj-Sadok, D. Dochain, A. Genovesi, J.P. Steyer, (2001) Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic Biotechnology and Bioengineering 75 (4) 424-438. DOI: 10.1002/bit.10036.
- [14] Fedailaine, M., Moussi, K., Khitous, M., Abada, S., Saber, M., & Tirichine, N. (2015). Modeling of the Anaerobic Digestion of Organic Waste for Biogas Production. *Procedia Computer Science*, 52, 730-737.
doi:10.1016/j.procs.2015.05.086
- for performance appraisal and design of UASB reactors. *Bioresource Technology*, 99(7), 2132-2140.
- doi:10.1016/j.biortech.2007.05.053
- [15] Bhunia, P., & Ghangrekar, M. M. (2008). Analysis, evaluation, and optimization of kinetic parameters
- [16] Fidanova, S. S., & Roeva, O. N. (2013). Metaheuristic techniques for optimization of an E. coli cultivation model. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 27(3), 3870-3876.
- [17] Liu, C. F., Yuan, X. Z., Zeng, G. M., Li, W. W., & Li, J. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource technology*, 99(4), 882-888.
- [18] Shi, X. S., Yuan, X. Z., Wang, Y. P., Zeng, S. J., Qiu, Y. L., Guo, R. B., & Wang, L. S. (2014). Modeling of the methane production and pH value during the anaerobic co-digestion of dairy manure and spent mushroom substrate. *Chemical Engineering Journal*, 244, 258-263.
- [19] Chen, X., Chen, Z., Wang, X., Huo, C., Hu, Z., Xiao, B., & Hu, M. (2016). Application of ADM1 for modeling of biogas production from anaerobic digestion of *Hydrilla verticillata*. *Bioresource technology*, 211, 101-107.