

LIBRERÍA PARA SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON MICROALGAS Y BACTERIAS

Irina Bausa^{a,b}, Smaranda Podar^{a,b}, Raúl Muñoz^{a,c}, Cesar de Prada^{a,b}, Erika Oliveira-Silva^{a,b}

^a Instituto de Procesos Sostenibles, C/ Dr. Mergelina, s/n, 47011, Valladolid

^b Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, C/ Real de Burgos, s/n, 47011, Valladolid

^c Dpto. de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, C/ Dr. Mergelina, s/n, 47011, Valladolid

irina.bausa@uva.es, smaranda@autom.uva.es, mutora@iq.uva.es, prada@autom.uva.es,
erika.oliveira@autom.uva.es

Resumen

El presente trabajo aborda la creación de una librería de componentes en PROOSIS® para la simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales basadas en consorcios microalgas-bacterias. La programación de modelos que describen las interacciones entre microalgas y bacterias puede resultar compleja para estudiantes y personal con poca experiencia en el tema. Por esta razón, en este trabajo se utilizan las ventajas de la programación orientada a objetos para la creación de componentes reutilizables que permitan abordar de manera simple la simulación de este tipo de sistemas. Se presenta la librería ALG_BACT_WWTP y se describen los elementos que conforman la misma.

Palabras clave: Modelado, Simulación, Tratamiento de aguas residuales, Simbiosis microalgas-bacterias.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los conceptos de economía circular y reutilización de recursos han cobrado fuerza en los ámbitos industriales y de investigación. En este particular, los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en consorcios microalgas-bacterias han generado interés en el sector industrial debido al ahorro de energía eléctrica respecto a los sistemas convencionales y a la recuperación de nutrientes del agua residual [6], [2], [4], [15]. En estos sistemas, muchas de las reacciones y procesos físicos, químicos y bioquímicos ocurren de manera simultánea y son fuertemente interdependientes. Además, dependen de condiciones medioambientales como la radiación solar y temperatura, y de variables operacionales como el tiempo de retención hidráulico (*Hydraulic Retention Time, HRT*), concentración de nutrientes y la carga orgánica presente en el agua residual [13]. Por tanto, para el diseño apropiado de sistemas de tratamiento de aguas residuales con microalgas y

bacterias, es necesario el desarrollo de modelos completos que integren los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los mismos, de manera análoga a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales.

Los modelos matemáticos ofrecen una gran oportunidad para estudiar simultáneamente el efecto de los múltiples factores que afectan a las microalgas y bacterias, permitiendo así la predicción de la producción final de biomasa y contribuyendo a la optimización del diseño del sistema en términos de operación y control [12].

En las últimas dos décadas, se han propuesto varios modelos para representar las interacciones microalgas- bacterias [10], [14], [13], [11], [3]. Para la simulación de estos modelos se han empleado diferentes herramientas de programación como Matlab®, COMSOL Multiphysics®, AQUASIM, entre otros.

La utilización de estos modelos requiere una amplia comprensión de las variables y ecuaciones que describen la dinámica del proceso, además de conocimientos matemáticos y de programación que dificultan su uso para estudiantes y personal no familiarizado con todos los elementos de los mismos. Esto provoca en la mayoría de los casos que la inclusión de nuevas unidades de proceso o la modificación de las ya existentes resulte demasiado compleja para una persona ajena al equipo de programación.

Las principales herramientas que permiten acercar los modelos a los usuarios no expertos son los entornos gráficos y la programación orientada a objetos (POO) o programación estructurada. Por una parte, los primeros permiten que el usuario pueda manejar los modelos de forma intuitiva (por ejemplo, mediante iconos que representen un determinado proceso) y, por otra parte, la POO facilita la actualización del software, el trabajo en equipo o la creación de entornos

gráficos mediante características como la reutilización de modelos, herencia, encapsulamiento o la abstracción. Esto permite que el usuario pueda utilizar un componente sin necesidad de conocer los detalles de implementación del modelo, simplemente necesita saber para qué sirve dicho componente y sus entradas y salidas [17]. El modelado orientado a objetos facilita la reutilización de modelos previamente desarrollados y estimula la creación de librerías de componentes parametrizables lo suficientemente generales como para ser usadas en multitud de proyectos de simulación.

Existen múltiples ejemplos de la utilización de la programación orientada a objetos y el desarrollo de librerías para simular diferentes procesos industriales [18], [8], [9]. En cuanto a los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en consorcios microalgas y bacterias, según consta a los autores, un enfoque similar se ha presentado solamente utilizando la metodología *Plant Wide Model (PWM)* para describir los procesos de microalgas en simulaciones de plantas de tratamiento de aguas residuales (*Waste Water Treatment Plants, WWTP*) [17].

En este trabajo se presenta una librería de componentes para la simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales basados en consorcios microalgas-bacterias. La librería se ha desarrollado en el entorno de programación dinámica EcosimPro|PROOSIS® [5], debido a la flexibilidad que permite este software para el desarrollo de librerías específicas de simulación con componentes reutilizables. En la Sección 2 se presentan las generalidades del diseño de librerías con PROOSIS®, en la Sección 3 se describe la librería ALG_BACT_WWTP y sus principales componentes. Por último, en la Sección 4 se presenta un ejemplo de simulación utilizando los componentes de la librería ALG_BACT_WWTP.

2 DISEÑO DE LIBRERÍAS EN EcosimPro|PROOSIS®

La simulación de sistemas dinámicos se ha convertido en una herramienta muy potente para el diseño de productos en multitud de áreas de la ciencia. El empleo de la simulación es especialmente de utilidad para obtener parámetros de diseño o confirmar lo adecuado de los supuestos y estudiar diferentes modos de operación.

EcosimPro® es una herramienta de modelado y simulación para sistemas multidisciplinares basados en ecuaciones algebraico-diferenciales y eventos discretos que permite modelar sistemas de control,

térmicos, mecánicos, entre otros. EcosimPro® permite modelar los sistemas físicos a partir de aplicar conceptos novedosos de orientación a objeto análogos a los utilizados en lenguajes de programación como C++ y Java. Utilizando el lenguaje de modelado propio de EcosimPro® (EL), el desarrollador puede encapsular los datos y el comportamiento dinámico del sistema en componentes reutilizables que ofrecen una interfaz pública bien definida, pero que esconden la complejidad de su realización interna. Los componentes individuales son descritos por las ecuaciones diferenciales y algebraicas que los definen. EcosimPro® permite la creación de componentes más complejos integrando otros más simples. También permite definir un componente como una extensión o una especialización de otro componente base a través de los mecanismos de herencia. La tecnología de modelado orientado a objetos de EcosimPro® posibilita la creación de modelos dinámicos complejos a partir de la interconexión de componentes, estimulando así una metodología de trabajo que resulta muy productiva, de reutilización de componentes parametrizables que ya estén probados [7].

Existen varios aspectos que distinguen a EcosimPro® de otras herramientas: la reutilización, es decir, validez de lo ya hecho y aprovechamiento total o parcial para nuevos elementos; modelado desde el punto de vista del equipo físico, no desde el punto de vista de la programación; y código abierto de las librerías, es decir, posibilidad de añadir aquellos elementos que pudieran, excepcionalmente, necesitarse y no están contemplados en ellas. A continuación, se describen algunos conceptos básicos de simulación en EcosimPro®:

- **COMPONENTE:** Representa un modelo mediante variables, ecuaciones diferenciales-algebraicas, topología y comportamiento discreto (Ejemplos de componentes: Resistencia, Bomba, Válvula, Tubería, ...)
- **PUERTOS:** Define los puntos de conexión con otros componentes (intercambio de variables). Se necesitan puertos distintos para cada disciplina (Ejemplo: para sistemas eléctricos, hidráulicos, químicos, etc.)
- **EXPERIMENTO:** Realización de una simulación.
- **LIBRERÍA:** Engloba todos los componentes, puertos, variables globales en una librería (Algunas librerías incluidas en el software son: CONTROL, ELECTRICAL, THERMAL, etc.)

3 LIBRERÍA ALG_BACT_WWTP

La librería ALG_BACT_WWTP en su primera versión posee varios componentes que permiten modelar una planta de tratamiento de aguas residuales simple: puertos, fuente y sumidero, REACTOR ALG BACT y SETTLER. En la Figura 1 se muestran todos los elementos de la librería.

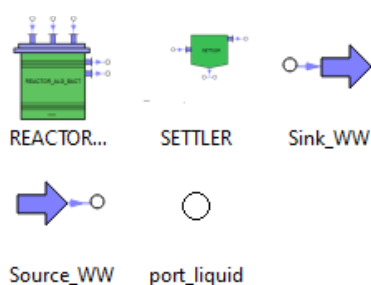


Figura 1: Librería ALG_BACT_WWTP

Existen recursos del lenguaje EL en PROOSIS® que permiten una definición más compacta y que se basan en el uso de *arrays* y de un tipo especial de datos, llamado ENUM, que resulta especialmente útil para definir elementos de un cierto tipo, como por ejemplo especies químicas o microorganismos presentes en el agua residual. En la librería ALG_BACT_WWTP se define un tipo de dato (*WW_components*) que incluye los principales/posibles elementos presentes en el agua residual (Tabla 1). Todos los componentes de la librería trabajan con este tipo de dato.

Tabla 1: Composición del agua residual.

Elementos - Descripción
S _{NH4} - Nitrógeno amónico
S _{NH3} - Nitrógeno amoniacal
S _{NO3} - Nitrato
S _{NO2} - Nitrito
S _{CO2} - Dióxido de carbono
S _{HCO3} - Bicarbonato
S _{CO3} - Carbonato
S _{PO4} - Fosfato
S _{O2} - Oxígeno disuelto
S _H - Iones hidrógeno
S _{OH} - Iones hidróxido
S _S - Materia orgánica soluble rápidamente biodegradable
S _I - Materia orgánica soluble inerte
X _{ALG} - Microalgas
X _H - Bacterias heterótrofas
X _{AOB} - Bacterias oxidantes de amonio
X _{NOB} - Bacterias oxidantes de nitrito
X _S - Materia orgánica particulada lentamente biodegradable
X _I - Materia orgánica particulada inerte

Uno de los componentes de la librería es la fuente de agua residual (*WW_source*). En la fuente de agua residual, sólo se considera la presencia de los elementos disueltos mostrados en la Tabla 1. Además, se han definido el puerto *port_liquid* (para conectar los diferentes elementos de la instalación) y el componente sumidero (*Sink_WW*). Para la simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales, el usuario puede utilizar también componentes de otras librerías de PROOSIS® tales como bombas, válvulas, tuberías, etc.

3.1 REACTOR_ALG_BACT

El componente REACTOR_ALG_BACT puede utilizarse para representar tanto fotobiorreactores como reactores anóxicos involucrados en la planta de tratamiento de aguas residuales. El modelado del reactor se realiza utilizando el modelo BIO_ALGAE 2 [13]. El modelo BIO_ALGAE 2 utiliza la nomenclatura de los modelos de la Asociación Internacional del Agua (*International Water Association, IWA*) y considera 19 elementos (6 particulados y 13 disueltos) implicados como variables en los procesos físicos, químicos y biocinéticos (Tabla 1). En [14] se describen estas variables, el papel que desempeñan en los procesos que tienen lugar en los fotobiorreactores y las interacciones con otras variables.

El componente REACTOR_ALG_BACT tiene varias entradas y salidas:

- Entrada *f_in*: Entrada de agua residual
- Entrada *f_in_internal recycling*: Entrada para recirculación interna. Ejemplo: proveniente de otro reactor involucrado en la instalación.
- Entrada *f_in_external recycling*: Entrada para recirculación externa. Ejemplo: proveniente de un sedimentador.
- Salida *f_out*: Salida del reactor hacia la próxima etapa.
- Salida *f_out_recycle*: Salida del reactor para recirculación. Ejemplo: recirculación hacia otro reactor.

En el componente REACTOR_ALG_BACT, el usuario puede definir si se utilizará como fotobiorreactor o como reactor anóxico. En caso de que se utilice como un fotobiorreactor, debe definirse el tipo de fotobiorreactor, dependiendo de la posición de la fuente de luz, ya que en reactores de vidrio utilizados a escala de laboratorio puede considerarse

la utilización de luces LED dispuestas circularmente alrededor del fotobiorreactor. Esta distinción es importante, debido a que la posición de la fuente de luz influye sobre el cálculo de la intensidad de luz promedio que incide sobre las microalgas.

En este trabajo se ha utilizado la Ley de Lambert-Beer para describir el efecto de la atenuación de la luz debido a la presencia de biomasa particulada. La intensidad de luz promedio (I_{av} [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]) en cualquier punto dentro del reactor se calcula según la expresión (1) [14]:

$$I_{av} = I_0 \frac{1 - \exp(-k_i TSS \cdot d)}{k_i TSS \cdot d} \quad (1)$$

Donde I_0 [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] es la intensidad de luz incidente, k_i es el coeficiente de extinción para la biomasa particulada [$0.07 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$] y TSS es la concentración del Total de Sólidos en Suspensión ($\text{TSS [g TSS m}^{-3}] = X_{\text{ALG}} + X_{\text{H}} + X_{\text{AOB}} + X_{\text{NOB}} + X_{\text{I}} + X_{\text{S}}$). En la expresión (1), d corresponde al radio del fotobiorreactor si se considera un fotobiorreactor de vidrio con luces dispuestas circularmente; y en caso de un fotobiorreactor horizontal corresponde a la profundidad del fotobiorreactor. Si el componente REACTOR_ALG_BACT se utiliza para representar un reactor anóxico, la intensidad de la luz tiene valor cero.

3.2 SETTLER

El sedimentador se modela tomando como base el modelo de Táacs *et al.* [16]. En este modelo, se supone que en el sedimentador no tienen lugar reacciones biológicas. El sedimentador se considera formado por un conjunto de capas, de manera que el flujo de sólidos debido a la gravedad depende de la concentración de fangos en la misma. Las partículas que entran se distribuyen de manera uniforme e instantánea a través de la capa de entrada y las ecuaciones del modelo sólo consideran el flujo en sentido vertical.

El componente SETTLER tiene varias entradas y salidas:

- Entrada f_{in} : Entrada al sedimentador. Generalmente se conecta a la salida de un reactor.
- Salida $f_{out_clarified}$: Salida del efluente clarificado desde la parte superior del sedimentador.

- Salida $f_{out_recycling}$: Salida desde el fondo del sedimentador para recirculación. Ejemplo: recirculación hacia un reactor.
- Salida f_{out_wasted} : Salida desde el fondo del sedimentador para la purga de biomasa.

4 EJEMPLO DE SIMULACIÓN

A continuación, se presentan algunos resultados de simulación utilizando la librería ALG_BACT_WWTP.

En la Figura 2 se representa un esquemático para la simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales compuesta por un fotobiorreactor y un sedimentador con recirculación. Esta planta puede formarse simplemente tomando los elementos de la librería mostrados en la Figura 1 y conectándolos entre sí. Para definir los valores de los parámetros de cada componente sólo es necesario hacer doble-click sobre el componente y editar estos valores en una ventana como la mostrada en la Figura 3. En [1] se determinan algunos de los parámetros que es recomendable definir en este tipo de simulaciones.

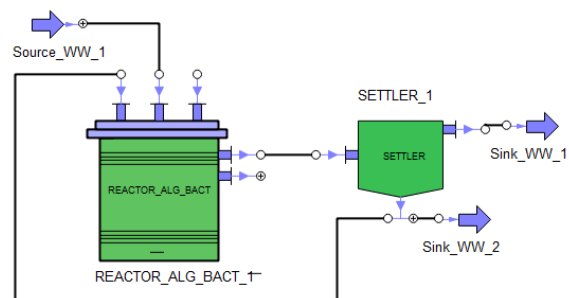


Figura 2: Esquemático de una planta de tratamiento de aguas residuales

Name	REACTOR_ALG_BACT_1	Units	Description
v_alg	2.5	1/d	Maximum growth rate of microalgae (1/d)
v_sob	0.63	1/d	Maximum growth rate of ammonium oxidizing bacteria (1/d)
v_h	1.3	1/d	Maximum growth rate of heterotrophic bacteria (1/d)
v_hidro	3	1/d	Hydrolysis rate constant (1/d)
v_nob	1.1	1/d	Maximum growth rate of nitrite oxidizing bacteria (1/d)

Figura 3: Ventana de edición del componente REACTOR_ALG_BACT

En la Figura 4 se representan las concentraciones de biomasa de microalgas, biomasa de bacterias heterótrofas y Total de Sólidos en Suspensión en el fotobiorreactor horizontal. En la Figura 5 se muestra

la intensidad de luz incidente en el fotobiorreactor (I_{aerobic}) y la intensidad de luz promedio (I_{av}) que incide sobre las microalgas. En este caso se ha considerado una iluminación LED con ciclos que emulan la luz solar. Un análisis de conjunto de las figuras 4 y 5 permite observar la dependencia de la intensidad de luz promedio (I_{av}) con el total de biomasa en el sistema (expresión 1).

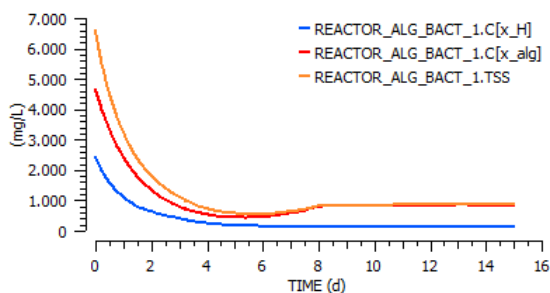


Figura 4: Concentración de biomasa en el fotobiorreactor

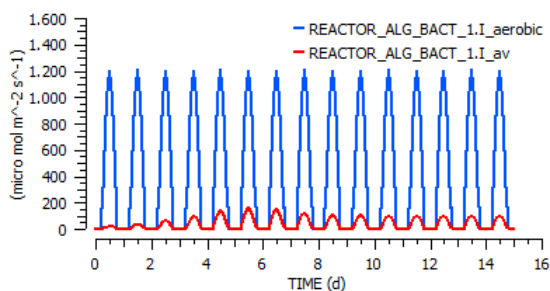


Figura 5: Intensidad de la luz en el fotobiorreactor

La Figura 6 muestra las concentraciones de carbono orgánico total (*Total Organic Carbon, TOC*) presentes en el agua residual que entra al fotobiorreactor y en el fotobiorreactor. En las Figura 7 y 8, se representan las concentraciones de amonio y amoníaco y de fosfatos, respectivamente, en el fotobiorreactor. La evolución de todas estas variables es de especial importancia, pues constituyen indicadores de la actividad de los diferentes microorganismos en el sistema.

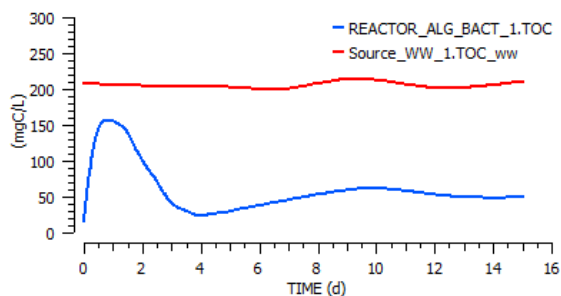


Figura 6: Concentración de Carbono Orgánico Total en el agua residual y el fotobiorreactor

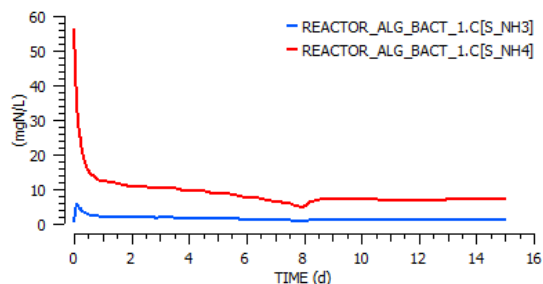


Figura 7: Concentración de amonio y amoníaco en el fotobiorreactor

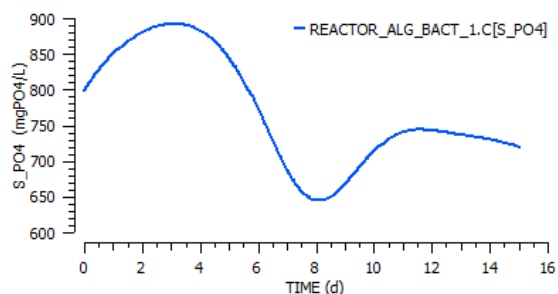


Figura 8: Concentración de fosfatos en el fotobiorreactor

4 CONCLUSIONES

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en consorcios microalgas-bacterias involucran un elevado número de reacciones y procesos químicos y bioquímicos. La utilización de EcosimPro® en la simulación de este tipo de procesos permite que este sistema tan complejo sea descrito como componentes individuales (objetos). El uso de objetos facilita al programador de la librería la actualización y/o corrección del modelo usado; su propiedad de encapsulamiento oculta las complejidades del código (ecuaciones diferenciales algebraicas) al usuario, quedando visible solamente una interfaz gráfica más amigable e intuitiva. Los objetos también pueden ser conectados entre sí, permitiendo que usuarios sin mucha experiencia modelen diferentes unidades de tratamiento de aguas residuales. Las simulaciones empleando esta librería permiten conocer la evolución dinámica de las variables involucradas en el sistema. Como trabajo futuro, pueden añadirse nuevos componentes a la librería que permitan simular plantas de mayor complejidad y los sistemas de control asociados a las mismas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Castilla y León y EU-FEDER (CLU 2017-09 y UIC 233), por la Junta de Castilla y León y el Fondo Social Europeo (Orden EDU/601/2020) y por el Proyecto a-CIDiT (PID2021-123654OB-C31).

English summary

LIBRARY FOR WASTEWATER TREATMENT PLANTS BASED ON MICROALGAE AND BACTERIA

Abstract

The present work deals with the creation of a library of components in PROOSIS® for the simulation of wastewater treatment plants based on microalgae-bacteria consortia. The programming of models to describes the interactions between microalgae and bacteria can be complex for students and no-trained people in the field. For this reason, in this work the advantages of object-oriented programming are used for the creation of reusable components that allow a simple approach to the simulation of this type of systems. The ALG_BACT_WWTP library is presented and library elements are described.

Keywords: Modeling, Simulation, Wastewater treatment, Algal-bacterial symbiosis.

Referencias

- [1] Bausa, I., R. Muñoz, S. Podar, and C. de Prada, “Modelo para la estimación de la concentración de biomasa en una instalación reactor anóxico-fotobiorreactor aerobio de algas y bacterias para el tratamiento de aguas residuales domésticas,” in *XLII JORNADAS DE AUTOMÁTICA: LIBRO DE ACTAS*, 2021, pp. 427–434. doi: 10.17979/spudc.9788497498043.427.
- [2] Brennan, L. and P. Owende, “Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 557–577, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.009.
- [3] Casagli, F., G. Zuccaro, O. Bernard, J. P. Steyer, and E. Ficara, “ALBA: A comprehensive growth model to optimize algae-bacteria wastewater treatment in raceway ponds,” *Water Research*, vol. 190, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.watres.2020.116734.
- [4] Craggs, R., T. Lundquist, and J. Benemann, “Wastewater treatment and algal biofuel production,” in *Algae for Biofuels and Energy*, Springer New York, 2013. doi: 10.1007/978-94-007-5479-9.
- [5] Empresarios Agrupados Internacional, “EcosimPro | PROOSIS - Modelling and Simulation Toolkits and Services,” 2022. <https://www.ecosimpro.com/> (accessed Jun. 20, 2022).
- [6] Lundquist, T., I. Woertz, N. Quinn, and J. Benemann, “A realistic technological and economic assessment of algae biofuels.” Berkeley, California, 2010.
- [7] Mazaeda, R., A. Merino, and A. Rueda, “Diseño de Librerías de Procesos con EcosimPro.” 2004. Accessed: Jun. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.ecosimpro.com/papers/power-water-process/>
- [8] Mazaeda, R., C. de Prada, A. Merino, and L. F. Acebes, “Librería de Modelos Orientada a Objetos para la Simulación del Cuarto de Azúcar: Cristalizador Continuo por Evaporación al Vacío,” *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 8, no. 1, pp. 100–111, 2011, doi: 10.4995/RIAI.2011.01.12.
- [9] Palacin, L. G., F. Tadeo, H. Elfil, C. de Prada, and J. Salazar, “New dynamic library of reverse osmosis plants with fault simulation,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 25, no. 1–3, pp. 127–132, 2011, doi: 10.5004/dwt.2011.1434.
- [10] Reichert, P., *et al.*, “River water quality model no. 1 (RWQM1): II. Biochemical process equations,” *Water Science and Technology*, vol. 43, no. 5, pp. 11–30, 2017.
- [11] Sánchez-Zurano, A., E. Rodríguez-Miranda, J. L. Guzmán, F. G. Ación-Fernández, J. M. Fernández-Sevilla, and E. M. Grima, “ABACO: A new model of microalgae-bacteria consortia for biological treatment of

- wastewaters,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, pp. 1–24, Feb. 2021, doi: 10.3390/app11030998.
- [12] Solimeno, A. and J. García, “Microalgae-bacteria models evolution: From microalgae steady-state to integrated microalgae-bacteria wastewater treatment models – A comparative review,” *Science of the Total Environment*, vol. 607–608, pp. 1136–1150, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.114.
- [13] Solimeno, A., C. Gómez-Serrano, and F. G. Ación, “BIO_ALGAE 2: improved model of microalgae and bacteria consortia for wastewater treatment,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 25, pp. 25855–25868, Sep. 2019, doi: 10.1007/s11356-019-05824-5.
- [14] Solimeno, A., L. Parker, T. Lundquist, and J. García, “Integral microalgae-bacteria model (BIO_ALGAE): Application to wastewater high rate algal ponds,” *Science of the Total Environment*, vol. 601–602, pp. 646–657, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.215.
- [15] Suganya, T., M. Varman, H. H. Masjuki, and S. Renganathan, “Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55. Elsevier Ltd, pp. 909–941, Mar. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.026.
- [16] Takacs I, I., G. G. Patryioand, and D. Nolasco, “A Dynamic Model of the Clarification-Thickening Process,” 1991.
- [17] Tejido-Núñez, Y., E. Aymerich, L. Sancho, E. Ayesa, and T. Fernández-Arévalo, “Microalgae-based wastewater treatment: modelling and simulation for enhancing its implementation,” in *IWA YWP Conference 2019-Book of Abstracts*, 2019, pp. 206–207.
- [18] Vilas, C., M. R. García, J. R. Banga, and A. A. Alonso, “Desarrollo de una librería de componentes en Ecosimpro para la operación de...,” *RIAI- Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 5, no. 1, pp. 51–65, 2008.



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).