



# ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS

M. Barceló Villalobos  
mbv001@ual.es

J. L. Guzmán, F.G. Acien Fernández, I. Martín Cara y J.A. Sánchez Molina  
joguzman@ual.es, facien@ual.es, ismael.martin.cara@gmail.com, jorgesanchez@ual.es

## Resumen

*El presente trabajo busca mejorar la productividad de los reactores raceway mejorando el diseño y control automático de este tipo sistemas. Para ello se llevaron a cabo ensayos en un reactor de 100 metros cuadrados, equipado con foso donde se propicia la absorción de CO<sub>2</sub> y desorción de O<sub>2</sub>, modificando el caudal de gas (CO<sub>2</sub> o aire) suministrado al foso. Se evaluó la relevancia de cada una de las secciones que constituyen el reactor raceway en la transferencia de materia global del sistema, así como la transferencia de oxígeno en el foso a diferentes caudales de aire. Este trabajo muestra cómo la aireación puede afectar al coeficiente de transferencia de materia y cuáles son las condiciones óptimas de operación según el diseño del reactor y la especie de microalga utilizada.*  
**Palabras Clave:** Microalgas, raceways, optimizar, producción.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los fotobiorreactores raceways han sido utilizados desde los años 50 para la producción industrial de microalgas. La principal ventaja de este tipo de reactores es su simplicidad y el bajo coste de construcción. Sin embargo, tienen algunos problemas relacionados con su baja productividad, contaminación de los cultivos y el escaso control de las condiciones de cultivo.

Los beneficios en la productividad de la biomasa logrados mediante la mejora de la capacidad de transferencia de materia aparecen en [4]. Además, para mejorar la productividad de estos sistemas y reducir los costos de producción por unidad de biomasa, es necesario garantizar una producción eficiente y controlada. Para conseguirlo, es obligatorio mejorar el diseño del fotobiorreactor, así como las condiciones de operación, especialmente la capacidad de transferencia de materia. El objetivo principal del trabajo realizado es desarrollar una metodología para la medición en línea de los coeficientes de transferencia de materia y cuantificar la relevancia de la mejora de la capacidad de transferencia de materia en el rendimiento del sistema.

## 2 MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 MATERIAL

#### 2.1.1 Microorganismo

La cepa microalga utilizada fue *Scenedesmus almeriensis* (CCAP 276/24), a pH 8.0 controlado por un controlador basado en eventos.

#### 2.1.2 Reactor raceway y condiciones operacionales de cultivo

El reactor raceway utilizado fue el mismo que en [2] (Figura 1). El pH, la temperatura y el oxígeno disuelto se midieron con sondas Crison (Instrumentos Crison, España), conectadas a una unidad de control-transmisor MM44 (Crison Instruments, España), y el software de adquisición de datos (Labview, National Instruments) para tener un monitoreo y control completo de la instalación. El caudal de gas de entrada al reactor se midió con un caudalímetro (SMC, Japan).

Los experimentos se realizaron en modo semicontinuo a una altura de cultivo de 0,15 m. Se utilizó el medio Mean & Myers preparado a partir de fertilizantes en lugar de compuestos químicos puros. El medio de cultivo no se esterilizó, ni se filtró, antes de introducirlo en el reactor.

En la fase de inoculación se utilizaron 3000 L de cultivo procedente de un fotobiorreactor tubular. Seguidamente, se operó en discontinuo durante tres días, hasta obtener una concentración de biomasa de 0,4 g L<sup>-1</sup>. Después, el reactor fue operado en modo semicontinuo a 0,4 día<sup>-1</sup>. Para operar en modo semicontinuo, diariamente se recogió un volumen de cultivo de 6,0 m<sup>3</sup> y se reemplazó con medio fresco, realizando esta operación desde las 8:00 a las 12:00. La operación semicontinua se mantuvo hasta alcanzar estado estacionario, en el que la concentración de biomasa se mantiene ya constante. Sólo se utilizaron los datos correspondientes a las condiciones de estado estacionario. La evaporación en el interior del reactor se compensó diariamente añadiendo medio fresco, además del volumen de medio fresco utilizado para la operación semicontinua del reactor.

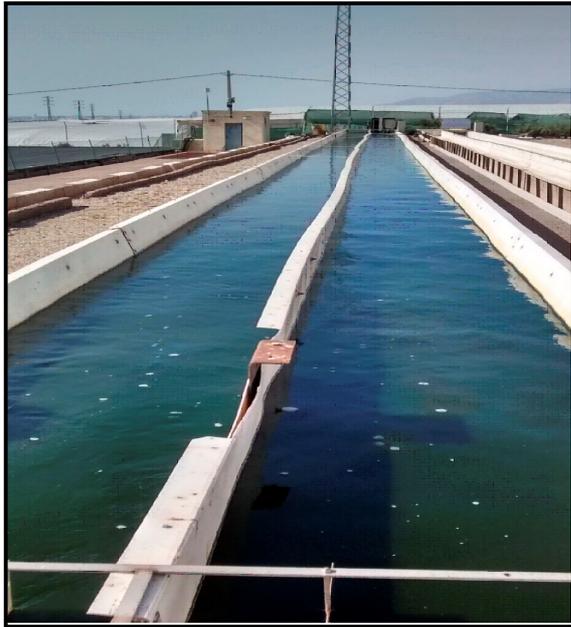


Figura 1. Detalle del lazo del reactor

El carbono requerido por el cultivo fue suministrado mediante inyecciones de  $\text{CO}_2$  a demanda, usando un controlador de pH basado en eventos, y aportando el gas rico en  $\text{CO}_2$  en el foso en condiciones óptimas (Figura 2). Además, se proporciona  $\text{NaHCO}_3$  una vez por semana para mantener la alcalinidad del medio en su valor óptimo 7 mM.



Figura 2. Detalle del foso del reactor

### 2.1.3 Diseño experimental

Se ensayaron seis caudales de gas en el foso (0, 100, 160, 185, 200 y  $350 \text{ L min}^{-1}$ ) para determinar la correlación entre el caudal de gas inyectado y el coeficiente de transferencia de biomasa.

El reactor fue operado en las mismas condiciones ambientales de radiación solar y temperatura, así como operacionales de concentración de biomasa y tasa de dilución, a lo largo de todos los ensayos. La radiación solar media diaria fue de  $600 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , la concentración de biomasa de  $0,39 \text{ g L}^{-1}$ , y las células no presentaron estrés fotosintético alguno ( $\text{Quantum Yield}=0,69$ ).

La inyección de aire se llevó a cabo mediante un burbujeador de burbuja fina que permite trabajar con burbujas de tamaño pequeño, tal y como recomienda [4].

La inyección de aire se mantiene de forma constante al caudal prefijado, y solo se detiene cuando se demanda  $\text{CO}_2$ . Respecto a la demanda de carbono, ésta fue suplida mediante la inyección de  $\text{CO}_2$  puro.

## 2.2 MÉTODOS

### 2.2.1 Caracterización de la transferencia de materia

La concentración de oxígeno disuelto se midió en tres lugares diferentes (palas, foso y lazo). La variación de la concentración de oxígeno disuelto con el tiempo corresponde a una función donde el coeficiente de transferencia de materia (kla) y la fuerza impulsora estaban relacionadas (1), siendo kla el coeficiente de transferencia de materia ( $\text{h}^{-1}$ ),  $[\text{O}_2]$  es la concentración de oxígeno disuelto ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $[\text{O}_2^*]$  es la concentración del oxígeno disuelto en equilibrio con la atmósfera ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y t es el tiempo (s).

$$d[\text{O}_2]/dt = \text{kla} \times ([\text{O}_2^*] - [\text{O}_2]) \quad (1)$$

Si se integra la ecuación (1) entre los tiempos cero y t, el coeficiente de transferencia de materia puede calcularse como:

$$\text{Ln}([\text{O}_2^*] - [\text{O}_2]) / ([\text{O}_2^*] - [\text{O}_2]) = \text{Kla} \times t \quad (2)$$

La concentración del oxígeno disuelto en equilibrio con el aire en las condiciones de los ensayos es de  $9 \text{ mg L}^{-1}$ , tal y como se propone en la Ley de Henry [2].

El coeficiente de transferencia de materia (kla) se determinó inyectando diferentes caudales de gas a través del foso y midiendo las concentraciones de oxígeno disuelto ( $\text{mg L}^{-1}$ ) resultantes en los diferentes lugares propuestos (palas, foso y canal).

### 2.2.2 Caracterización de la producción de oxígeno

Para determinar la producción de oxígeno ( $\text{PO}_2$ ,  $\text{mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) a partir de las medidas de concentración de oxígeno disuelto es necesario conocer los coeficientes

de transferencia de materia (TM) en todo el reactor (3)-(4)

$$d[O_2]/dt = PO_2max + TM_{Canal} + TM_{Palas} + TM_{Foso} \quad (3)$$

$$TM = KLa \times [(O_2) - (O_2^*)] \quad (4)$$

Una vez conocido el valor de concentración de oxígeno máxima que la especie soporta ( $O_2$ ), se podría saber cuál es el caudal de gas que se debe utilizar en cada caso, para lograr un coeficiente óptimo de transferencia de masa (kla) (5).

$$Kla = a \times [Ugr]^b \quad (5)$$

$$Ugr = (\text{caudal de gas}) / (\text{sección del foso}) \quad (6)$$

Donde KLa es el coeficiente de transferencia de materia ( $h^{-1}$ ) y Ugr es el caudal de gas inyectado ( $m^3 s^{-1}$ ) en la sección del foso ( $m^2$ ).

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una de las principales variables que afectan a la fotosíntesis es el oxígeno disuelto tal como se ha comentado previamente. La optimización de la producción en reactores raceway pasa por evitar la acumulación del oxígeno generado por fotosíntesis, ya que puede inhibir el metabolismo o dañar el cultivo si se acumula en exceso [6]. Se ha demostrado que cuando éste es superior al 250% ( $22,5 \text{ mg L}^{-1}$ ), la tasa de fotosíntesis decae exponencialmente. Debido a eso, la desorción del oxígeno del sistema debe ser una prioridad.

En [4] se sugiere que la capacidad de transferencia de materia del reactor está directamente relacionada con el caudal de gas inyectado en el foso, para así satisfacer las necesidades tanto de aporte de carbono como de eliminación de oxígeno del sistema.

En primer lugar, se midió la acumulación de oxígeno disuelto (Fig. 3) en un reactor de  $100 \text{ m}^2$ , durante 24 horas funcionando en modo semicontinuo. Los datos muestran que se alcanza un máximo de oxígeno disuelto de  $19 \text{ mg L}^{-1}$ , determinándose dicho valor en la posición anterior y posterior a las palas de impulsión cuando la irradiancia era de  $1233 \mu\text{E m}^{-2}$ . La concentración de oxígeno disuelto después del foso disminuye debido a que éste se encuentra prácticamente en oscuridad así como a la inyección continua de aire.

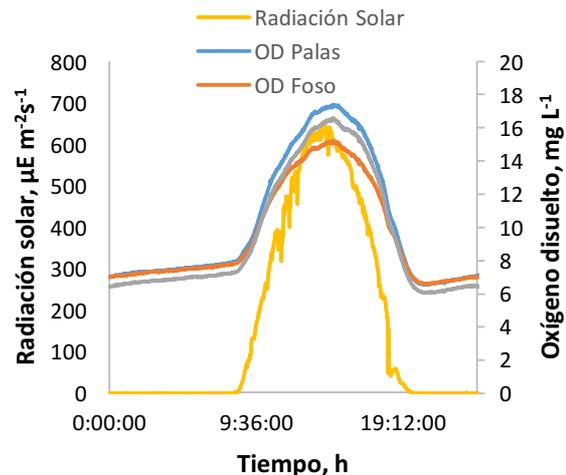


Figura 3. Oxígeno disuelto ( $\text{mg/L}$ ) en 24 horas

Estudios previos con diversas microalgas han demostrado que el aumento de la tasa de aireación para mejorar la eliminación de oxígeno permite mejorar la productividad del cultivo pero si el caudal aportado es excesivo se puede producir daño cuando la turbulencia generada es demasiado intensa [3].

Los datos aquí reportados muestran que la transferencia de materia en el foso es la más significativa de todo el reactor, mientras que en el lazo dicha capacidad de transferencia es muy baja (Fig. 4). La elevada capacidad de transferencia en el foso es debido al uso de difusores de burbuja fina, lo cual permite alcanzar un alto valor del coeficiente de transferencia de materia [6].

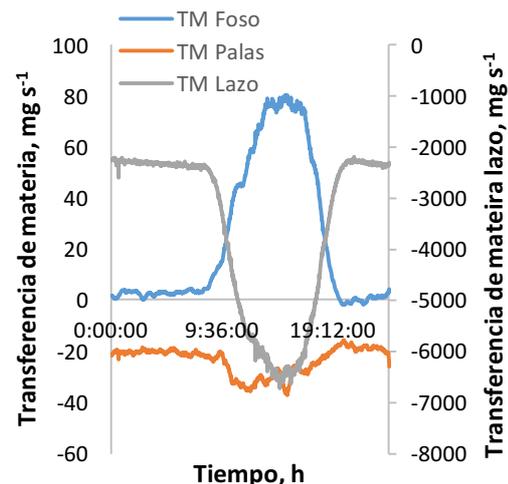


Figura 4. Transferencia de materia en el reactor (palas, foso, lazo)

Análisis anteriores han demostrado que el coeficiente de transferencia de materia puede ser suficientemente

alto si la mezcla entre gas y líquido es adecuada, lo cual ocurre únicamente en las secciones del foso y de las palas, con valores de hasta 90 y 160 h<sup>-1</sup> [6].

Con el objetivo de cuantificar la influencia del caudal de gas en la capacidad de transferencia de materia del reactor, se realizaron experimentos manteniendo el reactor en condiciones de estado estacionario, pero modificando el caudal de aire aportado en el foso. Los resultados obtenidos muestran como el coeficiente de transferencia de materia (kla) en el foso aumenta exponencialmente con el caudal de aire inyectado (Fig. 5).

Finalmente, cabe decir que tanto el diseño como la operación óptima de cualquier reactor requiere un conocimiento en detalle del sistema, así como disponer de modelos matemáticos que lo representen satisfactoriamente [5]. En este trabajo se propone un modelo empírico (Fig.6) como herramienta a utilizar a modo de medidor en línea (5), resultando en:

$$Kla = 31080 Ugr - 14.032$$

Cabe destacar que este modelo sólo es válido para concentraciones de oxígeno que van en el rango de 150 a 250% (datos no mostrados).

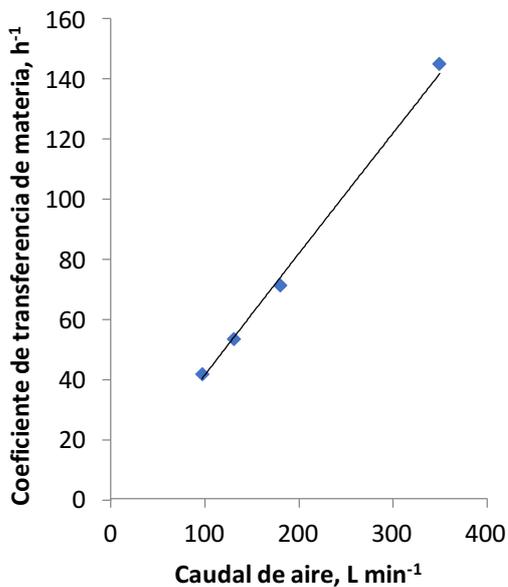


Figura 5. Análisis del coeficiente de transferencia de materia a distintos caudales de aire

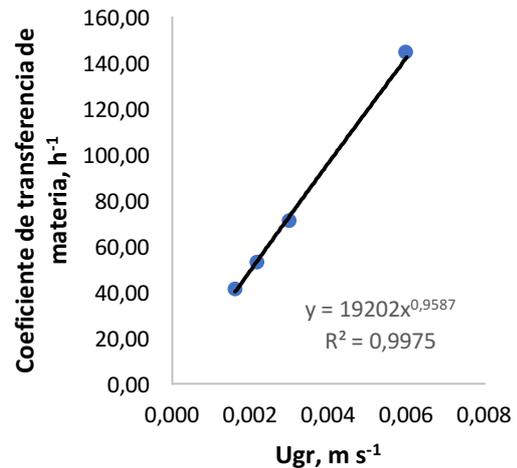


Figura 6. Ajuste empírico del coeficiente de transferencia

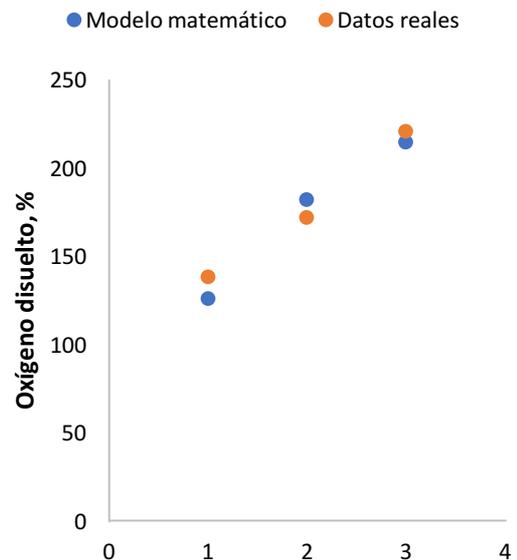


Figura 7. Validación del ajuste empírico

Se ha utilizado el modelo desarrollado por Fernández [3] para demostrar la relevancia del kla en la productividad del sistema. Éste es un modelo dinámico desarrollado para el cultivo de microalgas basado en principios fisicoquímicos y biológicos, que permite modelar la tasa fotosintética del alga (mg L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>).

A la vista de la Figura 8, se demuestra una mejora en la productividad del sistema, gracias a la mejora del coeficiente de transferencia de materia (kla) obtenido.

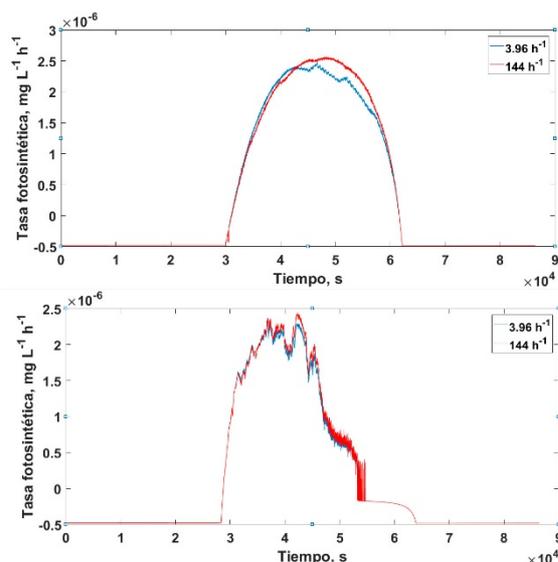


Figura 8. Mejora de la producción de oxígeno ( $\text{mg O}_2 \text{L}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) respecto al aumento del  $k_{\text{La}}$  ( $\text{h}^{-1}$ ). Datos mostrados para dos días.

Numerosos estudios han mostrado una amplia gama de valores de  $k_{\text{La}}$  entre  $0,4$  y  $350 \text{ h}^{-1}$  para diversos sistemas aireados [1]. Se obtuvieron valores de  $63,7 \text{ h}^{-1}$  en el foso, en un reactor que operaba con una altura de líquido de  $0,2 \text{ m}$ , velocidad de dilución de  $0,25 \text{ d}^{-1}$ , velocidad de  $0,22 \text{ m s}^{-1}$ ,  $0,7 \text{ g}$  de sólidos totales  $\text{L}^{-1}$ , así como el caudal de gas de combustión de  $100 \text{ L min}^{-1}$  de una caldera de diesel [4]. En cambio, los resultados de este estudio muestran valores de hasta  $144 \text{ h}^{-1}$  a un caudal de aire de  $350 \text{ L min}^{-1}$ , altura de líquido de  $0,15 \text{ m}$ ,  $0,3 \text{ g}$  de Sólidos Totales  $\text{L}^{-1}$  y una velocidad de líquido de  $0,26 \text{ m s}^{-1}$ . Estas diferencias se explican por el incremento del caudal de aireación así como por la propia configuración del sistema de burbujeo empleado.

## 4 CONCLUSIONES

La transferencia de materia ocurre principalmente en el foso, siendo mucho menor en las palas y nula en el lazo de reactores raceway. La metodología utilizada permite medir el coeficiente de transferencia de materia en reactores ya en operación así como la influencia en el mismo de las condiciones de operación impuestas. Se ha determinado la influencia del caudal de gas sobre el coeficiente de transferencia de materia, obteniéndose un modelo empírico que ha sido calibrado. Mediante el uso de este modelo es posible regular adecuadamente el caudal de aire aportado en el foso de forma que se optimice el funcionamiento del reactor. Posteriormente deberán realizarse estudios para analizar la influencia de otras variables como la concentración de biomasa, composición del medio o velocidad del líquido en dicho coeficiente de transferencia de materia.

## Agradecimientos

Este estudio fue apoyado por el apoyo financiero proporcionado por el Ministerio de Economía y Competitividad (DPI2014-55932-C2-1-R). Agradecemos la asistencia práctica del personal de la Estación Experimental Las Palmerillas de la Fundación Cajamar.

## Referencias

- [1] Carvalho, A. P., Meireles, L. A., & Malcata, F. X. (2006). Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances. *Biotechnology Progress*, 22(6), 1490–1506. <http://doi.org/10.1021/bp060065r>
- [2] Fernández, I., Ación, F. G., Guzmán, J. L., Berenguel, M., & Mendoza, J. L. (2016). Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production. *Algal Research*, 17, 67–78. <http://doi.org/10.1016/j.algal.2016.04.021>
- [3] Fernández, I., Ación, F. G., Berenguel, M., & Guzmán, J. L. (2014). First principles model of a tubular photobioreactor for microalgal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(27), 11121–11136. <http://doi.org/10.1021/ie501438r>
- [4] Mendoza, J. L., Granados, M. R., de Godos, I., Ación, F. G., Molina, E., Heaven, S., & Banks, C. J. (2013). Oxygen transfer and evolution in microalgal culture in open raceways. *Bioresource Technology*, 137, 188–195. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.127>
- [5] Merchuk, J. C., Sheva, B., & College, J. (2011). Photobioreactors – Models of Photosynthesis and Related Effects. *Comprehensive Biotechnology (Second Edi, Vol. 1)*. Elsevier B.V. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00103-3>
- [6] Molina Grima, E., Ación Fernández, F. G., García Camacho, F., & Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Progress in Industrial Microbiology*, 35(C), 231–247. [http://doi.org/10.1016/S0079-6352\(99\)80118-0](http://doi.org/10.1016/S0079-6352(99)80118-0)