



La transferencia de gases en procesos biotecnológicos

Criterios de cálculo y diseño de sistemas de aireación

José Luis Jiménez Álvarez

Gerente TCI, S.L.L.

Esta presentación técnica evidencia la importancia que tiene no sólo la utilización de materiales de muy buena calidad para la construcción de los equipos de aireación, sino la utilización de correctos criterios de cálculo y diseño que garanticen la idoneidad de los parámetros críticos del bioproceso.

PALABRAS CLAVE

Aireación, gases, oxígeno, bioproceso, sparger

This technical presentation highlights the importance of not only the use of good quality materials for the construction of aeration equipment, but the use of correct calculation and design criteria to ensure the adequacy of the critical parameters of the bioprocess.

KEYWORDS

Aeration, Gases, Oxygen, Bioprocess, Sparger

DEFINICIÓN DE AIREACIÓN DE UN LÍQUIDO

La aireación hace referencia al proceso utilizado para mezclar, circular o disolver un gas en el interior de un líquido. En un bioproceso aeróbico, la aireación hace referencia al proceso de introducir aire para incrementar la concentración de oxígeno en el medio de cultivo. Cumple, además, la función de eliminar los productos resultantes del bioproceso.

La aireación de un líquido puede llevarse a cabo de distintas maneras:

- 1- Burbujeando aire en el líquido.
- 2- Llevando a cabo un *spray* del líquido en aire.
- 3- Agitando el medio para incrementar la superficie de absorción.
- 4- Combinación de las anteriores. Ej. Burbujeo + agitación.

El oxígeno (O₂) es el sustrato gaseoso más importante para el metabolismo microbiano, y el anhídrido Carbónico (CO₂) es el producto metabólico más importante.

La eficiencia de la transferencia de oxígeno es muchas veces el factor limitante de la producción de un bioproceso. Los biorreactores y bioprocesos están diseñados para maximizar la transferencia de oxígeno. Satisfacer la demanda de oxígeno es una de las etapas más costosas de los bioprocesos, tanto desde el punto de vista operativo como desde el punto de vista de la inversión.

De todo lo anterior, se desprende la necesidad de diseñar y calcular correctamente los equipos necesarios para la aireación de un bioproceso.

TRANSFERENCIA DE MASA Y DIFUSIÓN DE GASES

El oxígeno, al igual que todos los gases en la atmósfera, es soluble en el agua en mayor o menor grado. Los dos principales gases componentes del aire, oxígeno y nitrógeno, tienen muy baja solubilidad, ya que no reaccionan químicamente con el agua, y su solubilidad está de acuerdo a la ley de Henry, que establece que la solubilidad de un gas es directamente proporcional a la presión parcial ejercida por este:

$$P_g = P_T y_g = H C_{gl}^s \quad (1)$$

Dónde:

P_g : es la presión parcial del gas.

P_T : es la presión total.

y_g : es la fracción molar del gas.

H : es la constante de Henry.

C_{gl}^s : es la concentración de saturación del gas en el líquido.

La solubilidad del oxígeno también es función de la temperatura: a mayor temperatura, menor solubilidad. Otro factor determinante en la solubilidad de gases es la composición del agua; por ejemplo, a la misma temperatura, la solubilidad del oxígeno en agua con sales disueltas es menor que la solubilidad de este gas en agua pura.

La solubilidad máxima del oxígeno del aire en agua varía desde 14,6 mg/l a 0°C, hasta 7 mg/l a 37°C a la presión de una atmósfera; mientras

que la solubilidad del oxígeno puro en agua es de 43mg/l. Esta baja solubilidad del oxígeno en agua es la principal limitante en el diseño de un bioproceso y la razón de la necesidad de la inyección de oxígeno para de esta manera compensar el oxígeno consumido en los procesos aerobios.

El oxígeno puede ser suministrado en forma de oxígeno puro o como aire. La transferencia de oxígeno se hace generalmente a través de dispositivos sumergidos, que forman pequeñas burbujas en el seno del líquido. Cuanto menor sea el tamaño de las burbujas, mayor será la superficie de contacto y la difusión del oxígeno en el medio de cultivo es más eficiente.

Para incrementar aún más el coeficiente de difusión, y mejorar el aprovechamiento del oxígeno suministrado, se provocan situaciones de turbulencia en el seno del líquido, con lo que el oxígeno se difunde más efectivamente. Esta agitación o turbulencia se provoca con la misma masa de aire inyectada y/o con un medio de agitación mecánico.

Los pasos seguidos en el transporte del oxígeno desde la burbuja de gas hasta la célula se muestran en la Figura 1.

Que se pueden resumir como sigue:

1- Difusión dentro de la burbuja hacia la interfase gas-líquido.

2- Difusión a través de la interfase gas-líquido.

3- Difusión a través de la película líquida en torno a la burbuja.

4- Movimiento por difusión en el seno del líquido.

5- Difusión a través de la película líquida en torno al agregado celular.

6- Entrada y difusión al agregado celular.

7- Difusión a través de la membrana celular y reacción de oxidación.

La teoría de la difusión gaseosa se basa en un modelo físico en el cual se considera que existe una película en la interfase aire/agua. Esta interfase es la resistencia que se tiene que vencer para que el gas pase al líquido y viceversa. Matemáticamente este concepto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dC}{dt} = N_A = k_L a (C^s - C) \quad (2)$$

Dónde:

N_A : variación de la concentración del gas (transferencia de masa).

k_L : es el coeficiente de transferencia de masa.

a : es la superficie de intercambio por unidad de volumen.

C^s : es la concentración de saturación del gas.

C : es la concentración del gas en la solución.

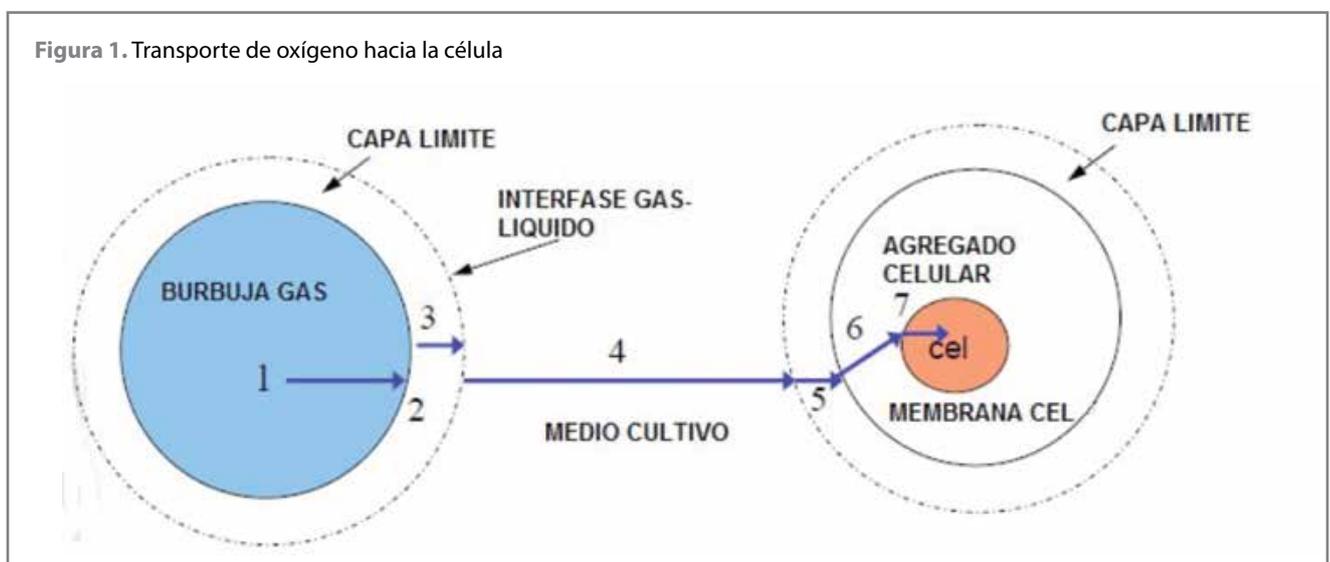
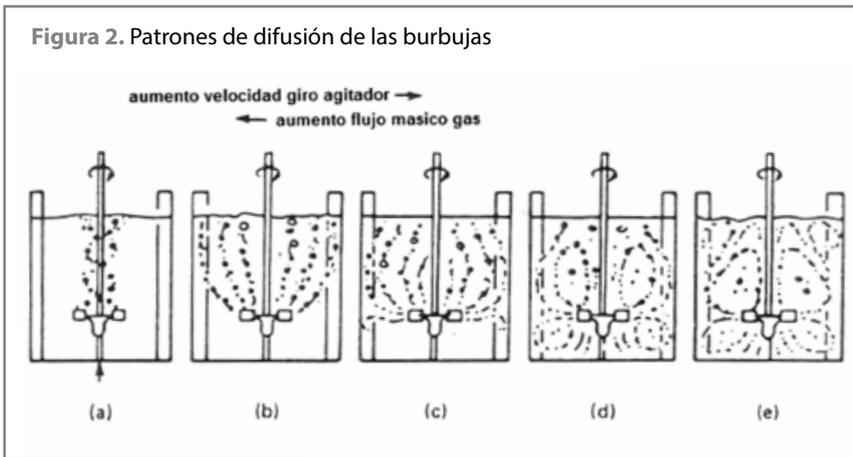


Figura 1. Transporte de oxígeno hacia la célula



De acuerdo a esta teoría, se llega a las siguientes conclusiones:

- Cuanto mayor sea el área de superficie de la burbuja, mayor es el valor del coeficiente global de transferencia de masa.
- Para un volumen determinado de gas, mientras menor sea el tamaño de las burbujas, mayor es el área superficial.
- La turbulencia rompe más fácilmente la película de la interfase que se forma entre el líquido y el gas; por lo tanto, a mayor turbulencia, mayor eficiencia en la transferencia del gas.

En el metabolismo aerobio, los microorganismos requieren, además, del oxígeno, de una fuente de carbono orgánico, agua, fósforo, nitrógeno y otros nutrientes. El medio también debe tener una temperatura y un pH adecuado en el cual las bacterias puedan crecer y proliferar; de esta manera, el bioproceso será rápido y altamente efectivo.

En un medio adecuado, donde los nutrientes y el material orgánico están disponibles en abundancia, es necesario estar suministrando continuamente oxígeno. La solubilidad máxima del oxígeno en el agua es sumamente baja: 7 mg/l a 37°C. Este

es consumido en el metabolismo microbiano, y, si se limita su presencia en el medio, las bacterias aerobias se inhiben y aparecen las facultativas y, posteriormente, si persiste la falta de oxígeno, las anaerobias.

En condiciones anaerobias, la aparición de productos indeseables se hace presente, por lo que es necesario suministrar el oxígeno en las cantidades que se requieran. Para tener un medio aerobio adecuado, la concentración de oxígeno en el agua debe estar entre 1 y 2 ppm, y se deben evitar puntos muertos en el reactor biológico, donde se puedan generar condiciones anaerobias.

La falta de oxígeno en el proceso biológico es uno de los factores cruciales, no solo por la aparición de productos de anaerobiosis, sino porque también, si el oxígeno es escaso, pueden llegar a morir los productos deseados del bioproceso.

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de masa, $k_L a$, se emplean correlaciones empíricas como la siguiente:

$$k_L a = \alpha \left(\frac{P}{\rho V} \right)^\beta \left(v_s \frac{P_a}{P_s} \right)^\gamma \quad (3)$$

Dónde:

P: es la potencia del agitador.

ρ : es la densidad del líquido.

V: es el volumen del reactor.

v_s : es la velocidad superficial del gas.

P_a : es la presión atmosférica.

P_s : es la presión en el nivel de las palas del agitador.

Los parámetros α , β y γ dependen del tipo de agitador y de las características del proceso.

Por último, es importante reseñar la influencia del uso de agentes anti-espumantes:

- Se ubican en torno a las burbujas y disminuyen la transferencia del oxígeno.
- La formación de espuma aumenta con el caudal de aire suministrado.

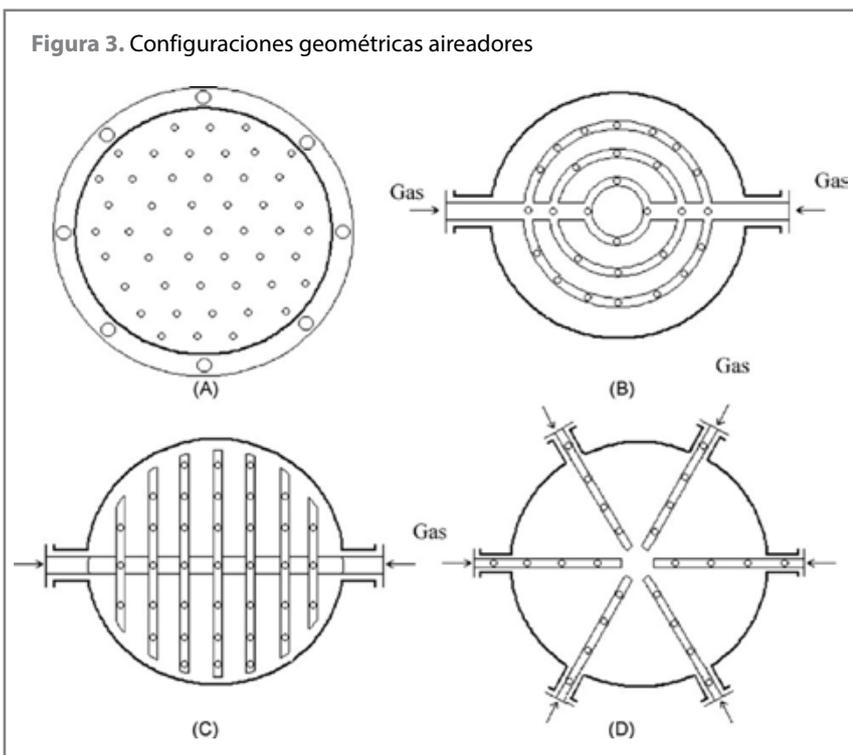


Figura 4. Sparger tubular sinterizado, tubular perforado y anular perforado



PATRONES DE DIFUSIÓN DE LAS BURBUJAS DE GAS

En la Figura 2 se muestran los diferentes patrones de difusión de las burbujas que se pueden formar. Estos patrones están controlados por dos parámetros: la velocidad de giro del agitador y el flujo másico del gas.

Los tipos de patrón de flujo (a), (b) y (c), denominados como carga inicial, inundación y transición, están dominados por el flujo másico del gas. Los tipos (d) y (e), denominados como dispersión completa y gran recirculación, están dominados por la agitación.

ELEMENTOS PARA LA AIREACIÓN DE UN LÍQUIDO: SPARGERS

Existen dos tipos de clasificaciones para los elementos de aireación: por su forma constructiva y por su configuración geométrica.

Por su forma constructiva, existen dos tipos diferentes:

- Metal sinterizado:
 - Elevada superficie de las burbujas por unidad de volumen.
 - Usual en pequeños bioreactores.
 - Más difícil de limpieza.
 - Coeficiente global de transferencia de masa, de dos a cinco veces mayor que tubo perforado.

- Tubo perforado
 - Fácilmente limpiables.
 - Más adecuado para grandes caudales másicos de gas.
 - Menor superficie de las burbujas por unidad de volumen.

En la Figura 3 se muestran las diferentes configuraciones geométricas:

- Placa inferior perforada.
- Anular: simple o múltiple.
- Ramificada.
- Tubular: simple o múltiple.

En la Figura 4 se muestran ejemplos de diferentes tipos de elementos de aireación.

Para el diseño de aireadores de tubo perforado se deben cumplir las dos condiciones siguientes (Ec. 4 y 5):

$$\frac{\frac{1}{2}\rho v_{in}^2}{\Delta P_o} \leq 0,1 \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_o} \leq 0,1 \quad (5)$$

Donde:

ρ : densidad gas.

v_{in} : velocidad a la entrada de las perforaciones.

ΔP : Perdida de carga en el tubo.

ΔP_o : Perdida de carga en cada perforación.

Aplicando las condiciones anteriores para el caso de un sparger anular simple, se obtiene la ecuación (6), que nos relaciona el número de perforaciones, n , con el diámetro de las perforaciones, d_o , y el diámetro del tubo perforado, D_p :

$$d_o \leq \frac{0,7D_p}{(0,27 + n^2)^{\frac{1}{4}}} \quad (6)$$

Como usualmente el número de perforaciones es grande, se puede simplificar a la siguiente expresión:

$$d_o = \frac{0,7D_p}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Bibliografía

- [1] Anand V. Kulkarni, Shrikant V. Badgandi, Jyeshtharaj B. Joshi, 2009. "Design of ring and spider type spargers for bubble column reactor: Experimental measurements and CFD simulation of flow and weeping". Chemical Engineering Research and Design 87
- [2] Sardeing, R., Aubin, J., Poux, M. and Xuereb, C., 2004. "Gas-Liquid Mass Transfer: Influence of Sparger Location". Trans IChemE, 82.
- [3] McCabe, W.H. Smith, J.C., Harriott H., 2007. "Operaciones unitarias en ingeniería química", Mc Graw Hill.
- [4] Landau L.D., Lifshitz E.M., 1991. "Mecánica de Fluidos", Ed. Reverté.
- [5] Idelchik I.E., 1993. "Handbook of Hydraulic Resistance", CRC Press.