

Transferencia de oxígeno disuelto utilizando aspas rectas y curvas en un aireador mecánico

Dissolved oxygen transfer using flat and curves paddle-wheel on a mechanical aerator

C. Blanco-Zúñiga¹, N. Rojas-Arias^{2, 3*}

¹Magister. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja-Boyacá, Colombia. ORCID: 0000-0002-9181-4944

²Estudiante Doctoral. Universidade Federal de Sao Carlos, Departamento de materiais -DeMa, São Carlo, São Paulo, Brasil; ³Investigador externo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tuja-Boyacá, Colombia. ORCID: 0000-0003-3358-2484

Autor para la correspondencia*: nicolas.rojas@uptc.edu.co

Recibido: 15/09/2020

Aceptado: 22/01/2021

Cite this article as: C. Blanco-Zúñiga, N. Rojas-Arias. "Transferencia de oxígeno disuelto utilizando aspas rectas y curvas en un aireador mecánico", *Prospectiva*, Vol 19, N° 1, 2021.

<http://doi.org/10.15665/rp.v19i1.2527>

RESUMEN

En este trabajo se analizó la implementación de dos tipos de aspas en un prototipo de aireación mecánica de eje horizontal, partiendo del análisis de transferencia de oxígeno disuelto (OD). Las mediciones se realizaron en muestras de agua anóxica, utilizando dos tipos de aspas con una misma área y ángulo de impacto, pero con una diferente curvatura. Los datos obtenidos muestran que los dos tipos de aspas presentan la misma eficiencia estándar de aireación (SAE) en ambos dispositivos, obteniendo un valor de 0.50 kgO₂/kWh. Sin embargo, la tasa de transferencia estándar de oxígeno (SOTR) para el aireador de aspas rectas fue un 34.9% mayor que el obtenido con aspas curvas. Los valores de K_La obtenidos fueron de 2.61 h⁻¹ para el aireador de aspas rectas y de 1.94 h⁻¹ para el de aspas curvas, reflejando una menor tasa de transferencia de oxígeno para este último. Sin embargo, el consumo energético es menor al implementar las aspas curvas dentro del sistema de aireación. Esto demuestra la importancia de los parámetros de diseño durante la construcción del dispositivo. Los resultados de este estudio contribuyen en la mejora de aireadores mecánicos, disminuyendo el consumo de energía asociado a los procesos de oxigenación.

Palabras clave: Aireador mecánico, oxígeno disuelto (OD), coeficiente de transferencia de oxígeno, eficiencia de aireación estándar, geometría de las aspas.

ABSTRACT

In this work, the implementation of two types of blades in a prototype of horizontal axis mechanical aeration was analyzed, starting from the dissolved oxygen (DO) transfer analysis. Measurements were made in anoxic water samples, using two types of paddle-wheels with the same area and impact angle, but with a different curvature. The data obtained show that the two types of paddle-wheels have the same standard aeration efficiency (SAE) in both devices, obtaining a value of 0.50 kgO₂/kWh. However, the standard oxygen transfer rate (SOTR) for the flat paddle-wheel aerator was 34.9% higher than that obtained with curved paddle-wheels. The KLa values obtained were of 2.61 h⁻¹ for the flat paddle-wheels aerator and 1.94 h⁻¹ for the curved paddle-wheel, reflecting a lower oxygen transfer rate for the latter. However, energy consumption is lower by implementing the curved blades within the aeration system. This demonstrates the importance of design parameters during construction of the device. The results of this study contribute to the improvement of mechanical aerators, reducing the energy consumption associated with oxygenation processes.

Keywords: Mechanical aerator, dissolved oxygen (DO), oxygen transfer coefficient, standard aeration efficiency, Paddle-wheel geometry.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de aireadores mecánicos permite transferir parte del oxígeno atmosférico a un cuerpo de agua para ser convertido en oxígeno disuelto (OD). Este probablemente es el factor más crítico sobre la calidad del agua en diferentes entornos, siendo de gran importancia en los procesos de restauración de cuerpos de agua, tratamientos de aguas residuales y procesos de acuicultura, representada en la producción de piscicultura a partir de técnicas de cultivo de especies hidrobiológicas en ambientes naturales o artificiales. [1]–[3]. Los aireadores mecánicos permiten obtener una tasa de transferencia de OD entre 1.5 a 2.1 KgO₂/kWh en condiciones estándar y de 0.5 a 1,1 kgO₂/kWh en condiciones de campo [4]. Este tipo de dispositivo es capaz de proporcionar constantemente el OD para mantener las condiciones requeridas en el proceso de aireación [4], [5].

Sin embargo, los procesos de aireación son las etapas con un mayor valor económico, y son las más costosas durante el tratamiento de aguas, con costos desde un 50% hasta 90% de la energía total utilizada durante la restauración del cuerpo de agua [6]. Además, este proceso se ve afectado por diversos factores ambientales y propios del equipo utilizado [7]–[10]. En este último, las características de las aspas juegan un rol fundamental durante el proceso de transferencia de OD, en los cuales, la disposición y geometría del aspa pueden afectar la captación y transporte del oxígeno atmosférico hacia el interior del cuerpo de agua [11]. Además, estos parámetros pueden estar íntimamente ligados sobre la eficiencia energética del proceso y no únicamente sobre el fenómeno de transferencia de oxígeno. Debido a esto, este trabajo se enfoca en estudiar la influencia de dos tipos de aspas, las cuales presentan una misma área de contacto y diferente grado de curvatura. Los ensayos son realizados a una escala de laboratorio utilizando muestras de agua potable generando estado anóxico, centrándose principalmente en el efecto que puede generar la curvatura del aspa sobre la transferencia de OD.

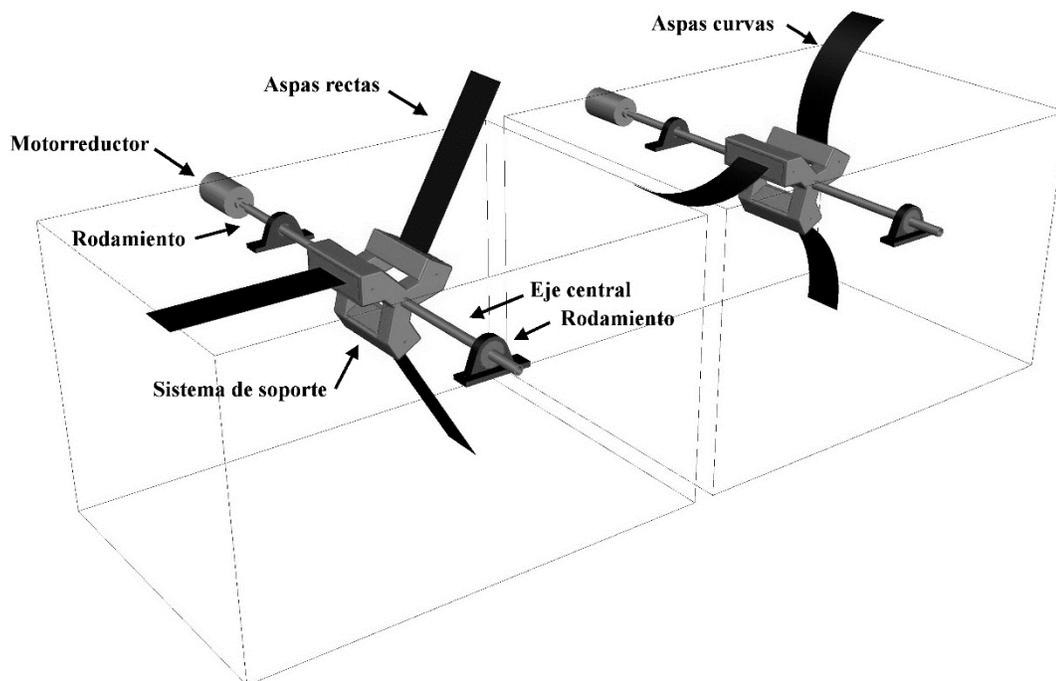
2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se utilizaron dos tipos de aspa dentro de un sistema de aireación mecánico de eje horizontal. Las aspas se fabricaron con lamina de zinc galvanizada, con dimensiones de 18cm de largo, 5cm de ancho y 0.6mm de espesor. Se manejó un tipo de aspa totalmente plana y una segunda con un radio de curvatura de 13.2cm. Las aspas se acoplaron al sistema de aireación mediante un soporte de tereftalato de polietileno glicol

(PETG) producido mediante impresora 3D. La Figura 1 muestra un esquema de los sistemas utilizados en este estudio.

Figura 1. Esquema de los Aireadores mecánicos de eje horizontal utilizados en este estudio. En a) sistema de aspas rectas y b) sistema de aspas curvas.

Figure 1. Diagram of the horizontal axis mechanical aerators used in this study. In a) system of flat paddle-wheels and b) system of curved paddle-wheels.



Fuente: Autores.

Source: Authors.

Los ensayos se realizaron en condiciones controladas a escala laboratorio, utilizando muestras de 39L de agua anóxica depositadas en recipientes de 0.1924m² y 0.2m de profundidad. Las muestras de agua anóxica fueron producidas a partir de muestras de agua potable, para evitar la presencia de materia orgánica y microorganismos que pueden influir consumiendo el OD transferido, situación que puede afectar los datos recolectados en el estudio. Las muestras de agua fueron producidas agregando 3.35g Na₂SO₃ para remover el oxígeno y 0.05 mg/L de CoCl₂, utilizado como agente catalizador. La solución fue homogenizada lentamente durante cinco minutos hasta alcanzar la remoción total del OD presente en la muestra de agua. Los valores de estos reactivos fueron obtenidos a partir de la concentración inicial del OD presente en las muestras de agua, siendo de 7.5 mg/L (Cs) a 17°C, una presión atmosférica de 740hPa y una altura de 2800 msnm. Este valor se obtuvo utilizando un oxímetro electrónico Hach-flexi HQ30d US.

La configuración del sistema aireador permite un impacto de las aspas sobre la superficie del agua en un ángulo de 19.5°. La potencia máxima necesaria para la operación del sistema fue calculada a partir de una velocidad de rotación de 21±1 RPM, evitando las pérdidas del fluido por efectos de derrames o salpicaduras, poco eficaces en los procesos de transferencia de OD [12].

Se monitoreó la concentración de OD con oxímetro en intervalos de 5 minutos durante una hora, y posteriormente en intervalos de 15 minutos hasta alcanzar una concentración de saturación del 98% respecto a la concentración inicial. Estas mediciones se realizaron en las diagonales opuestas del montaje para cada tiempo de medida a una profundidad de 5cm, procedimiento desarrollado en 6 réplicas para cada ensayo con el fin de asegurar la validez y replicabilidad del proceso.

Se utilizaron modelos de regresión no lineal para analizar los datos recolectados en este estudio. Se evaluó La tasa de transferencia estándar de oxígeno (SOTR), el coeficiente de transferencia ($K_L a$), y la eficiencia estándar de aireación (SAE). El mecanismo utilizado es reportado por [3], [13]. Debido a que se requiere un factor de corrección de la temperatura, la tasa de transferencia se expresa de la siguiente manera:

$$C = C_{\infty}^* - (C_{\infty}^* - C_0) \cdot \exp[K_L a(t - t_0)] \quad (1)$$

Donde:

C = Concentración promedio efectiva de OD en la fase líquida.

C_0 = Concentración inicial de OD, cuando $t = t_0$.

C_{∞}^* = Concentración final promedio de OD alcanzada en un tiempo infinito (mg/L).

$K_L a$ = Coeficiente de transferencia de masa volumétrico (1/T).

Esta ecuación permite ser utilizada en muestras de agua limpia, dentro de un estado no estacionario, determinando la capacidad de transferencia de equipos de aireación. Debido a que la temperatura varía durante el proceso de experimentación, $K_L a$ se convierte a una temperatura estándar ($T=20^{\circ}\text{C}$) usando la ecuación 2:

$$K_L a_{20} = 1,024^{(20-t)} \quad (2)$$

La cantidad de oxígeno transferido por unidad de tiempo (SOTR_{20}) es obtenida a partir de la ecuación 3:

$$\text{SOTR} = K_L a_{20} \cdot C_{s,20} \cdot V \quad (3)$$

Donde:

$K_L a_{20}$ = Coeficiente de transferencia de masa volumétrico (1/T), a una temperatura de 20°C .

$C_{s,20}$ = Concentración de saturación para un estado estable a una temperatura de 20°C .

V = Volumen del líquido.

La SOTR permite determinar la SAE en cada uno de los procesos al ser relacionada con la potencia consumida durante el proceso de aireación. La SAE es determinada a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{SAE} = \frac{\text{SOTR}}{P} \quad (4)$$

$$P = V \cdot A \quad (5)$$

Donde:

SOTR = Tasa de transferencia estándar de oxígeno ($\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$).

P = Potencia consumida en vatios (w).

V= Voltaje

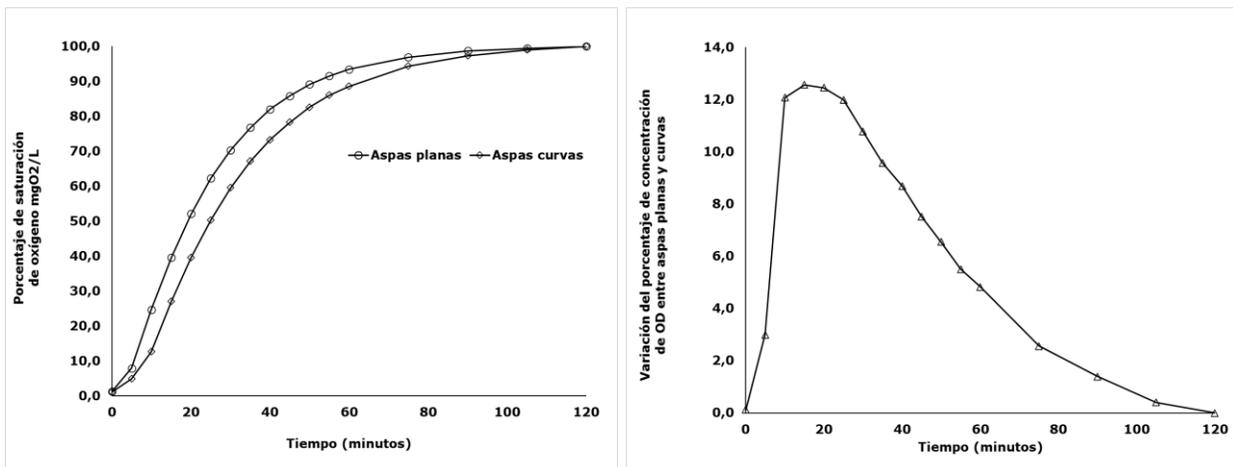
A= Amperaje

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2-a muestra la variación del porcentaje de concentración del OD del agua, en función del tiempo de agitación. Se observa una alta tasa de transferencia de OD en los primeros minutos del proceso de aireación para ambos sistemas. Después de 60 minutos de realizar el proceso de aireación, se observa que el sistema de aspas planas logra obtener un valor de concentración de OD en el agua de 95%, mientras el sistema de aspas curvas no supera el 90%. A partir de este momento se empieza a observar una reducción en la tasa de transferencia de OD en los cuerpos de agua. Este comportamiento se debe principalmente a que las aguas con una alta carencia de oxígeno generarán una mayor velocidad de saturación en la etapa inicial del proceso debido a la diferencia de presión entre el oxígeno atmosférico y OD presente en el agua [14], presentando un comportamiento de Arrhenius donde se reduce gradualmente la transferencia de OD en el agua hasta obtener un valor de saturación máximo, cercano al valor de concentración de OD original [15].

Figura 2. Comportamiento en la transferencia de OD para los dos sistemas de aspas. En a) Curvas de porcentaje de saturación del OD en las muestras de agua y b) Variación en el porcentaje de transferencia de OD entre los dos sistemas por tiempo de medición.

Figure 2. DO transfer behavior for the two paddle-wheel systems. In a) DO saturation percentage curves in water samples and b) Variation in DO transfer percentage between the two systems by measurement time.



Fuente: Autores.

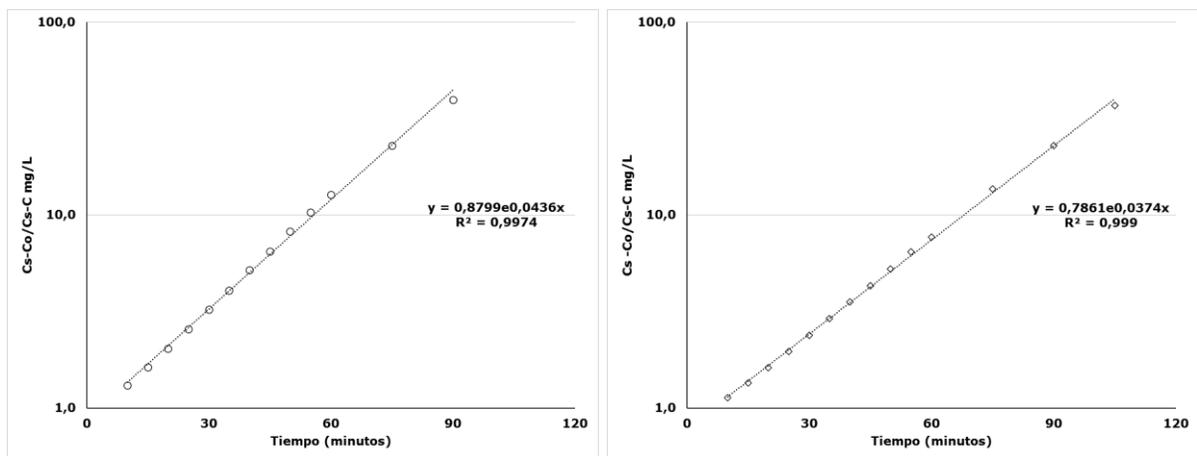
Source: Authors.

La Figura 2-b muestra la diferencia en porcentaje del OD transferido entre los dos sistemas, obteniendo su pico máximo a los 15 minutos con una diferencia del 12.5%. La aplicación de un sistema de aireación con aspas planas permite una mayor tasa de transferencia de OD por unidad de tiempo obteniendo hasta un 12.5% de OD transferido en comparación al sistema de aireación con aspas curvas. Esta diferencia del OD transferido entre los dos tipos de aspas va reduciéndose gradualmente hasta ser prácticamente nulo después de 120 minutos de realizar el proceso de aireación. A partir de este punto se obtiene una concentración de saturación del 98% (7.35 mg/L), respecto a la concentración inicial. Este comportamiento se debe principalmente al comportamiento de Arrhenius y la reducción de la presión existente entre el oxígeno atmosférico y el presente en el cuerpo de agua [14]–[16].

Los valores de K_{LA} calculados por métodos de regresión no lineal permitieron determinar el proceso de transferencia en función del consumo energético [17]. La Figura 3 presenta la relación $C_s - C_o / C_s - C$ en función del tiempo de reoxigenación del agua. Las ecuaciones obtenidas a partir de la tendencia no lineal para cada uno de los sistemas de aireación, permiten realizar el cálculo de K_{LA} , para cada intervalo de tiempo. Las Figuras permiten observar una mayor pendiente generada por el sistema de aireación de aspas planas. Un incremento en la pendiente de la curva corresponde a una mayor tasa de tasa de transferencia por unidad de tiempo. Este comportamiento asegura la ventaja que poseen la implementación de aspas planas sobre el proceso de transferencia de OD en las muestras de agua anóxica. En este sentido, al aplicar un ángulo de impacto de las aspas a 19.5° sobre el agua, se obtiene que los valores de K_{LA} para los sistemas de aireación de aspas planas y curvas es de 2.61 h^{-1} y 1.94 h^{-1} , respectivamente.

Figura 3. Variación de $C_s - C_o / C_s - C$ (mg/L) en función del tiempo para a) aireador con aspas planas, b) aireador con aspas curvas.

Figure 3. Variation of $C_s - C_o / C_s - C$ (mg / L) as a function of time for a) aerator with flat paddle-wheel, b) aerator with curved paddle-wheel.



Fuente: Autores.

Source: Authors.

Los valores de SOTR y SAE también fueron obtenidos en este estudio con el fin de establecer la eficiencia durante la transferencia y de consumo energético del proceso para ambos sistemas de aireación. Se observa un incremento del 34% de SOTR para el sistema de aspas planas en relación al manejo de aspas curvas. Un

valor de SOTR alto permite una mayor transferencia de OD al cuerpo de agua por unidad de tiempo, siendo este un factor importante en cuerpos de agua de gran volumen. No obstante, los valores de SOTR no son suficientes, ya que estos no permiten determinar la eficiencia del proceso en relación al consumo energético requerido por cada uno de los dispositivos. Los valores de SAE muestran que los dos sistemas utilizados presentan la misma eficiencia en relación al consumo energético aplicado. El sistema de aireación con aspas planas muestra una potencia consumida de 1.86W durante el proceso de aireación. Este valor disminuye al aplicar sistemas de aspas curvas, obteniendo un valor de 1.38 W. Esta situación pone en evidencia que la curvatura de las aspas disminuye el esfuerzo asociado al desplazamiento y penetración del agua, favoreciendo una reducción en el consumo energético requerido para rotar el sistema de aspas a una velocidad constante [12], [18]. En ambos casos, el valor de la SAE fue de 0.5 kgO₂/kWh. El resumen de los datos de proceso obtenidos en este estudio es presentado en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Resumen de los datos obtenidos en este estudio.

Table 1. Summary of the data obtained in this study.

Tipo de aspa	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (W)	K _{La} (h ⁻¹)	dc/dt g/h·m ³	SOTR kg/h	SAE kgO ₂ /kWh
Plana	6	0.31	1.86	2.61	24.04	0.94	0.50
Curva	6	0.23	1.38	1.94	17.81	0.70	0.50

Fuente: Autores.

Source: Authors.

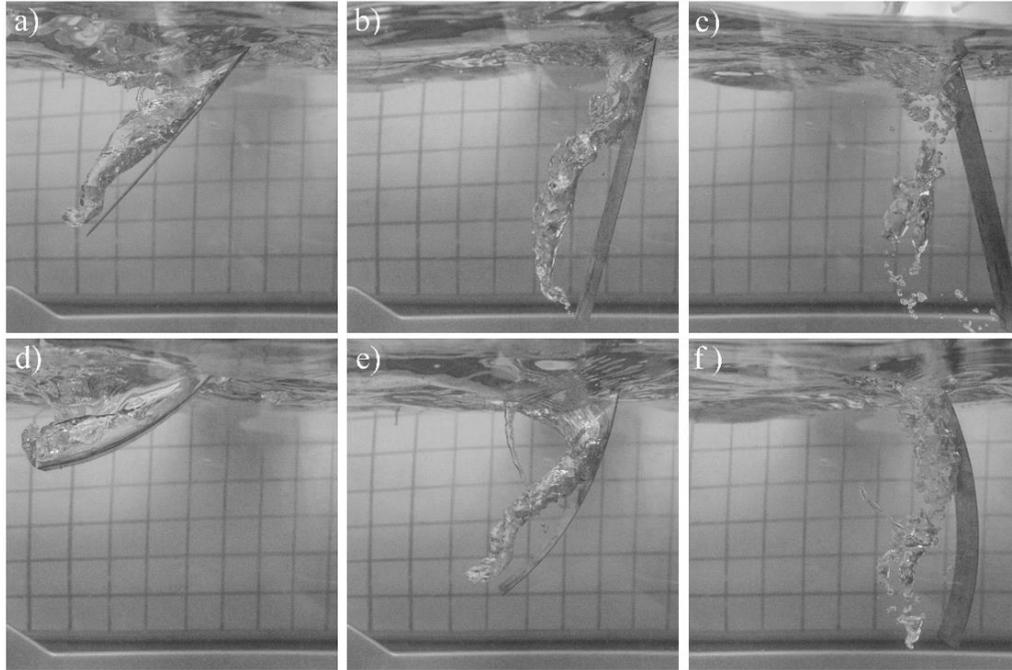
Este estudio permitió observar y analizar el comportamiento del aire atrapado, a medida que las aspas impactan y se sumergen en el cuerpo de agua. La velocidad de rotación, así como la penetración de las aspas revelan una tendencia repetitiva relacionada con el volumen de aire atrapado. La Figura 4 presenta el comportamiento encontrado en los dos tipos de sistemas utilizados. Independiente de la geometría del aspa, son generados vórtices de aire atrapados en el cuerpo de agua, los cuales se forman por el rompimiento de la superficie del agua desde el borde del aspa.

Visualmente, el sistema de aspas planas muestra un ligero incremento del volumen de aire atrapado en comparación al manejo de aspas curvas, siendo este fenómeno dependiente de cada impacto sobre el agua. La turbulencia generada por las aspas planas a nivel de la superficie del fluido permite capturar un mayor volumen de aire, el cual puede influir significativamente durante el proceso de transferencia de OD, representados en los coeficientes K_{La} [19]. A medida que las aspas giran dentro del sistema, estas inducen el desplazamiento del aire atrapado por el movimiento inercial de rotación que genera el aspa dentro del fluido.

Se presume que la rotación de los vórtices de aire atrapados dentro del agua también favorece la transferencia de oxígeno atmosférico hacia los cuerpos de agua en forma de OD. El desplazamiento final del aspa contribuye a que estos vórtices se desintegren liberando el aire restante en forma de cúmulos de burbujas, el cual termina por escapar hacia a la superficie. La transferencia de oxígeno atmosférico en OD podría tener una relación directa con la cantidad de aire atrapado dentro del fluido, así como el tiempo de contacto y retención entre ambas fases (gas-liquido).

Figura 4. Comportamiento del aire atrapado bajo el agua en los sistemas de aspas trabajados. a-b-c) aspas planas d-e-f) aspas curvas.

Figure 4. Behavior of air trapped under water in the worked blade systems. a-b-c) flat blades d-e-f) curved blades.



Fuente: Autores.
Source: Authors.

Por otra parte, la turbulencia del fluido no solo es generada por la rotación y el impacto de las aspas, también influyen las burbujas de aire atrapadas las cuales generan turbulencia a medida que estas ascienden [20]. Un mejor entendimiento de esta situación, puede favorecer en el diseño de sistemas aireadores mecánicos más eficaces frente al consumo de energía y con una mayor tasa de transferencia de oxígeno, el cual presenta un rol importante durante un proceso de transferencia de OD [7].

Los datos obtenidos en este estudio permiten deducir: 1) la aplicación de un sistema de aireación de aspas curvas presenta una menor tasa de transferencia de OD por unidad de tiempo en comparación al sistema de aspas planas; 2) Debido a que el proceso muestra un comportamiento de Arrhenius, esta diferencia de porcentaje de OD transferido se va reduciendo gradualmente hasta obtener valores similares al llegar al punto de saturación; 3) La aplicación de un proceso de aireación posterior a este punto no generará un aporte significativo al porcentaje de OD disuelto en el agua, por lo cual causará un incremento en el consumo energético y tiempo requerido durante el proceso de aireación; 4) ambos sistemas presentan un mismo valor de SAE, por lo cual el costo y consumo energético de los dos sistemas será igual. Sin embargo, el tiempo consumido en una etapa también es un factor importante dentro de un proceso de ingeniería. Si se tiene en cuenta este factor, la aplicación de sistemas de aireación de aspa plana siguen presentando una ventaja sobre las aspas curvas, permitiendo obtener más rápidamente valores cercanos al punto de saturación de OD.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó el efecto de la curvatura presente en dos tipos de aspa utilizadas en un sistema de aireación mecánico de eje horizontal. La eficiencia energética de estas aspas se realizó a partir de ensayos de transferencia de OD en cuerpos de agua anóxica. El efecto de la curvatura de las aspas se ve reflejado en la eficiencia y consumo energético del proceso. Se observa que la geometría de las aspas presenta una gran influencia sobre el proceso de transferencia del OD, teniendo como base la comparación de los resultados obtenidos de la eficiencia estándar de aireación (SAE).

Desde un punto de vista general, ambos tipos de aspa presentan un valor de SAE similar. Sin embargo, el sistema de aspas planas genera una mayor tasa de transferencia por unidad de tiempo y un valor de K_{LA} superior en comparación al sistema de aspas curvas. Este factor puede ser de gran utilidad dentro de los procesos donde se requiere realizar una transferencia de OD a grandes cuerpos de agua.

La geometría de las aspas en un aireador mecánico de eje horizontal puede generar un comportamiento casi predecible del aire atrapado dentro de un cuerpo de agua, incluso cuando se presenta agitación o turbulencia sobre la misma superficie del fluido. Adicionalmente, se observó la formación de vórtices y atrapamiento de burbujas de aire dentro de los cuerpos de agua, los cuales pueden contribuir en el proceso de transferencia. Se espera estudiar más a profundidad este efecto en investigaciones futuras.

Los autores expresan su motivación al desarrollar este tipo de investigaciones, las cuales generan una base para contrarrestar las afectaciones que el cambio climático inducirá en diferentes cuerpos de agua, principalmente efectos de desoxigenación por incremento de la temperatura. Esta investigación podría favorecer el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a temas asociados con tratamiento de aguas, principalmente en procesos de acuicultura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Ingeniería ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia -UPTC por aportar y contribuir en el desarrollo de este trabajo. Uno de los autores (N.R.A.) agradece especialmente a esta institución por su invitación para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] United States Department of Agriculture and N. R. C. Service, "Aeration of ponds used in aquaculture," 2011.
- [2] J. A. Rojas Romero, Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño, 3rd ed. Bogotá. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.
- [3] C. M. Barreto et al., "Sidestream superoxygenation for wastewater treatment: Oxygen transfer in clean water and mixed liquor," *J. Environ. Manage.*, vol. 219, pp. 125–137, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.04.035.
- [4] G. Tchobanoglous, F. Louis Burton, and H. D. Stensel, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, Fourth Edit. Mc Graw Hill, 2004.
- [5] N. Tahri, W. Bahafid, H. Sayel, and N. El Ghachtouli, "Biodegradation: Involved Microorganisms and Genetically Engineered Microorganisms," *Biodegrad. - Life Sci.*, 2013, doi: 10.5772/56194.

- [6] J. Daw, K. Hallett, J. DeWolfe, and I. Venner, "Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities," Tech. Rep. NREL/TP-7A30-53341 January 2012, no. January, p. 25, 2012.
- [7] T. Itano et al., "Water circulation induced by mechanical aerators in a rectangular vessel for shrimp aquaculture," *Aquac. Eng.*, vol. 85, pp. 106–113, 2019, doi: 10.1016/j.aquaeng.2019.03.006.
- [8] A. S. Ren, F. Chai, H. Xue, D. M. Anderson, and F. P. Chavez, "A Sixteen-year Decline in Dissolved Oxygen in the Central California Current," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-25341-8.
- [9] W. Bao, Z. Peng, D. Zhou, S. Zhu, and Z. Ye, "Performance evaluation of an intensive pond aquaculture system for commercial freshwater fish production," pp. 3–12, 2018, doi: 10.13031/aim.201801093.
- [10] A. Torres, J. Quintero, and L. Atehortúa, "Determination of the specific oxygen uptake rate in microorganisms including electrode time response," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 43, pp. 33–41, 2018.
- [11] Y. Qiu et al., "Optimal surface aeration control in full-scale oxidation ditches through energy consumption analysis," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 7, 2018, doi: 10.3390/w10070945.
- [12] S. Bahri, Jufriadi, and H. Anwar, "The Ineffectiveness of Water Splash on Paddlewheel Aerator," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 268, p. 012162, Jul. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/268/1/012162.
- [13] L. Uby, "Next steps in clean water oxygen transfer testing – A critical review of current standards," *Water Res.*, vol. 157, pp. 415–434, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.watres.2019.03.063.
- [14] H. A. Abdelrahman and C. E. Boyd, "Effects of mechanical aeration on evaporation rate and water temperature in aquaculture ponds," *Aquac. Res.*, vol. 49, no. 6, pp. 2184–2192, Jun. 2018, doi: 10.1111/are.13674.
- [15] A. Bahadori and H. B. Vuthaluru, "Simple Arrhenius-type function accurately predicts dissolved oxygen saturation concentrations in aquatic systems," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 88, no. 5, pp. 335–340, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.psep.2010.05.002.
- [16] R. Sander, "Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15(8), pp. 4399–4981, 2015.
- [17] A. S. of C. Engineers, *ASCE Standar: Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water (2-06)*. 2007.
- [18] S. Bahri, R. P. A. Setiawan, W. Hermawan, and M. Z. Junior, "Simulation on Blade Geometry and Operational Condition toward Torque Requirement and Drag Force in Paddle Wheel Aerator," vol. 6, no. 2, pp. 812–816, 2015.
- [19] L. Tian, Z. Xu, L. Chen, Y. Liu, and T. Zhang, "Study on oxygen gas holdup and kinetics using various types of paddles during marmatite leaching process," *Hydrometallurgy*, vol. 180, pp. 158–171, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.hydromet.2018.06.011.
- [20] C. D. DeMoyer, E. L. Schierholz, J. S. Gulliver, and S. C. Wilhelms, "Impact of bubble and free surface oxygen transfer on diffused aeration systems," *Water Res.*, 2003.