

Incremento de la eficiencia estándar de aireación (SAE), de un aireador de superficie de baja velocidad

Increased standard aeration efficiency (SAE), of a low speed surface aerator

César René Blanco Zúñiga



David Eduardo Aparicio Plazas



Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC

OPEN ACCESS

Recibido: 12/01/2022

Aceptado: 11/04/2022

Publicado: 30/06/2022

Correspondencia de autores:

cesar.blanco@uptc.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Evaluar la tasa de transferencia de oxígeno disuelto (OD), en un aireador de superficie de baja velocidad (Low Speed Surface Aerator – LSSA), variando la potencia; y proponer una modificación geométrica de los impulsores, para mejorar la eficiencia de aireación estándar (Standard Aeration Efficiency - SAE). **Metodología:** Se modeló un LSSA a través de software CAD, y se construyeron 3 prototipos de LSSA, mediante un proceso de impresión 3D, modificando la geometría original del impulsor. Luego se realizaron ensayos a escala piloto, usando los LSSA acoplados a un motorreductor capaz de generar 210 RPM. Finalmente, se determinaron los coeficientes de transferencia de oxígeno, y la eficiencia de aireación en el agua, de los LSSA, por medio de un modelo matemático. **Resultados:** A partir de las proyecciones obtenidas, se estableció que la modificación geométrica propuesta, incrementa la SAE en un 20.3% y 29.8% para potencias de 1 y 2 vatios (W), respectivamente; manteniendo casi constante la tasa de transferencia estándar de oxígeno (Standar Oxygen Transfer Rate - SOTR); además, la forma geométrica y disposición de los impulsores propuesta, parece favorecer el tiempo de contacto entre la fase gaseosa (aire) y la fase líquida (agua), mejorando el tiempo de permanencia de las burbujas atrapadas, evidencia representada en los coeficientes kLa (h^{-1}). **Conclusiones:** De acuerdo con los resultados, se puede inferir que estos aireadores de tipo LSSA, pueden ser optimizados con un diseño más eficiente, permitiendo reducir el consumo energético asociado a su funcionamiento, sin penalizar la transferencia de OD.

Palabras clave: Aireador superficial de baja velocidad, impulsores, oxígeno disuelto (OD), coeficiente de transferencia de oxígeno, eficiencia de aireación estándar, impeller blade, low speed surface aerator.

Abstract

Objective: To evaluate the dissolved oxygen (DO) transfer rate in a Low Speed Surface Aerator - LSSA, varying the power; and propose a geometric modification of the impellers, to improve the Standard Aeration Efficiency (SAE). **Methodology:** An LSSA was modeled through CAD software, and 3 LSSA prototypes were built, through a 3D printing process, modifying the original geometry of the impeller. Then pilot scale tests were carried out, using the LSSA coupled to a gear motor capable of generating 210 RPM. Finally, the oxygen transfers coefficients and the water aeration efficiency of the LSSA were determined by means of a mathematical model. **Results:** From the projections obtained, it was established that the proposed geometric modification increases the SAE by 20.3% and 29.8% for powers of 1 and 2 watts (W), respectively; keeping the standard oxygen transfer rate (SOTR) almost constant; furthermore, the proposed geometric shape and arrangement of the impellers seems to favor the contact time between the gas phase (air) and the liquid phase (water), improving the residence time of the trapped bubbles, evidence represented in the coefficients kLa (h^{-1}). **Conclusions:** According to the results, it can be inferred that these LSSA type aerators can be optimized with a more efficient design, allowing to reduce the energy consumption associated with their operation, without penalizing the transfer of DO.

Keywords: Low speed surface aerator, impellers, dissolved oxygen (DO), oxygen transfer coefficient, standard aeration efficiency, impeller blade, low speed surface aerator.

Introducción

El cambio climático y las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), asociadas a la actividad antropogénica, representan un gran reto para la industria en la actualidad, por este motivo, las empresas buscan minimizar el impacto asociado al consumo energético para reducir sus emisiones. Así, la implementación y desarrollo de nuevas tecnologías o procesos, pueden disminuir la huella de carbono respecto a las necesidades energéticas y al uso indiscriminado de combustibles fósiles. Una de las actividades que tiene un mayor impacto en el clima, producto de la emisión de GEI, debido a su alta demanda energética, es el tratamiento de agua residuales [1, 2, 3, 4]; sobre todo en las etapas donde se realiza la transferencia de oxígeno atmosférico en oxígeno disuelto, proceso indispensable para la degradación biológica de la materia orgánica.

Estos costos energéticos, asociados a procesos de aireación, pueden comprender entre un 50 a un 90%, del total de la energía utilizada durante el tratamiento del agua [5]. Desde este punto de vista, el principal objetivo del proceso de aireación en cuerpos de agua y en las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), es transferir oxígeno desde la atmosfera hacia el agua [6], incrementando su OD, y removiendo gases y otras sustancias relativas al agua, [7]; que se puede llevar a cabo mediante la implementación de: aireación difusa, aireación - agitación mecánica sumergida, aireación de superficie, aireación con oxígeno puro y aireación por cascada [8].

La aireación de superficie se realiza a través de un dispositivo mecánico que permite la entrada de oxígeno atmosférico al agua por la agitación de la superficie, se caracteriza por su simplicidad, confiabilidad y competitividad en la transferencia de oxígeno [9]; de hecho, permite transferir oxígeno atmosférico por medio de un eje propulsor conformado por impulsores en diferentes configuraciones. Este tipo de aireador puede ser de flujo axial ascendente, con algunas desventajas debido a la generación de ruido y olores por la resuspensión y salpicadura de gotas sobre la superficie del agua residual [9]; o descendente, que corresponde a una tecnología desarrollada recientemente [10].

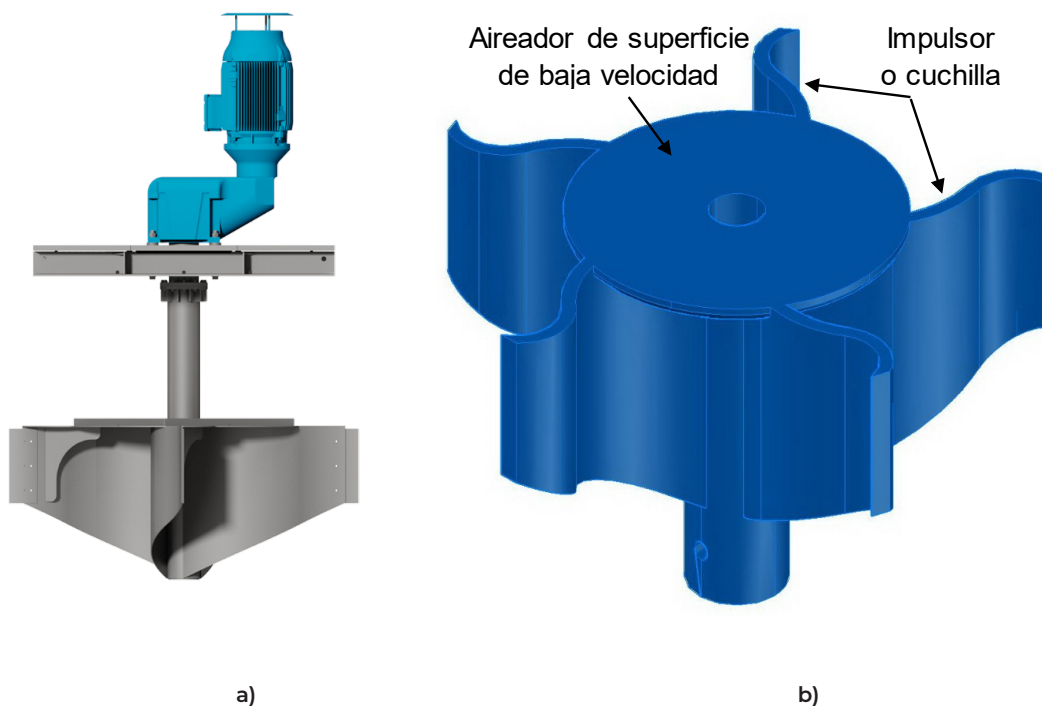
Por lo general, la implementación de un LSSA permite que se introduzca OD al agua por los vórtices que generan los impulsores, debido a la rotación formada cerca de la superficie. Las burbujas de aire atrapadas son rápidamente dispersadas por los impulsores dentro de la fase líquida [11]. La eficiencia de estos aireadores se evalúa a partir del coeficiente de transferencia másico de oxígeno (kLa), cuyo valor oscila entre 3.5 y 10 h^{-1} , lo que corresponde a una capacidad estándar de aireación de 30 a 90 g/m^3h , y una potencia consumida entre 20 a 60 W/m^3 ; no obstante, la eficiencia también depende de variables como la profundidad de inmersión, el tipo de turbina, temperatura del agua (que puede variar por las estaciones del año, por ejemplo), presión atmosférica; entre otros [12].

Teniendo en cuenta lo descrito, algunos autores han evaluado la SAE para diferentes aireadores de superficie, encontrando valores de 1.5 kgO_2/kWh [11], 1.9 a 2.2 kgO_2/kWh [13], 1.805 kgO_2/kWh [14, 15], y 2.269 kgO_2/kWh con un coeficiente kLa de 10,33 h^{-1} [7]. En este sentido, este trabajo pretende evaluar la capacidad de transferencia de OD de un LSSA a escala de laboratorio; además, investiga cómo una variación geométrica de los impulsores podría mejorar significativamente, la SAE. Así mismo, del análisis de trabajos análogos, se prevé que los avances de esta investigación representen un potencial de patente, por lo que no se revela de manera precisa o específica, la modificación geométrica realizada al aireador de superficie.

Metodología

Basado en un diseño preestablecido de un LSSA, propiedad de la empresa Aeris.global®, se modeló, mediante software CAD, un LSSA adaptado, respetando las dimensiones geométricas, para desarrollar la investigación, este se presenta mediante la figura 1 (a), mientras que el propulsor de este LSSA se muestra en la figura 1 (b). El LSSA está conformado por 5 impulsores (cuchillas), con un diámetro externo de 110.7mm y un diámetro interno de 9.9mm. Cada impulsor está diseñado a partir de dos radios equivalentes de 8.21mm y 20.61mm, una altura inicial de 22.96 mm del borde externo y 45mm del borde interno (unión al eje). Así mismo, todos los impulsores están acoplados al eje central y a un disco en la parte superior, que tiene un diámetro externo de 60mm y 2mm de espesor. Esta pieza fue adaptada del modelo original para favorecer la rigidez, evitando un posible colapso de los impulsores producto de la rotación que se ejerce dentro del agua. Fue necesario hacer una modificación al diseño para acoplar el LSSA por la parte inferior al eje propulsor; asumiendo que esta configuración no presentaría ningún efecto sobre los procesos de transferencia de OD.

Figura 1. Vista del propulsor LSSA (a) y del propulsor modelado (b)



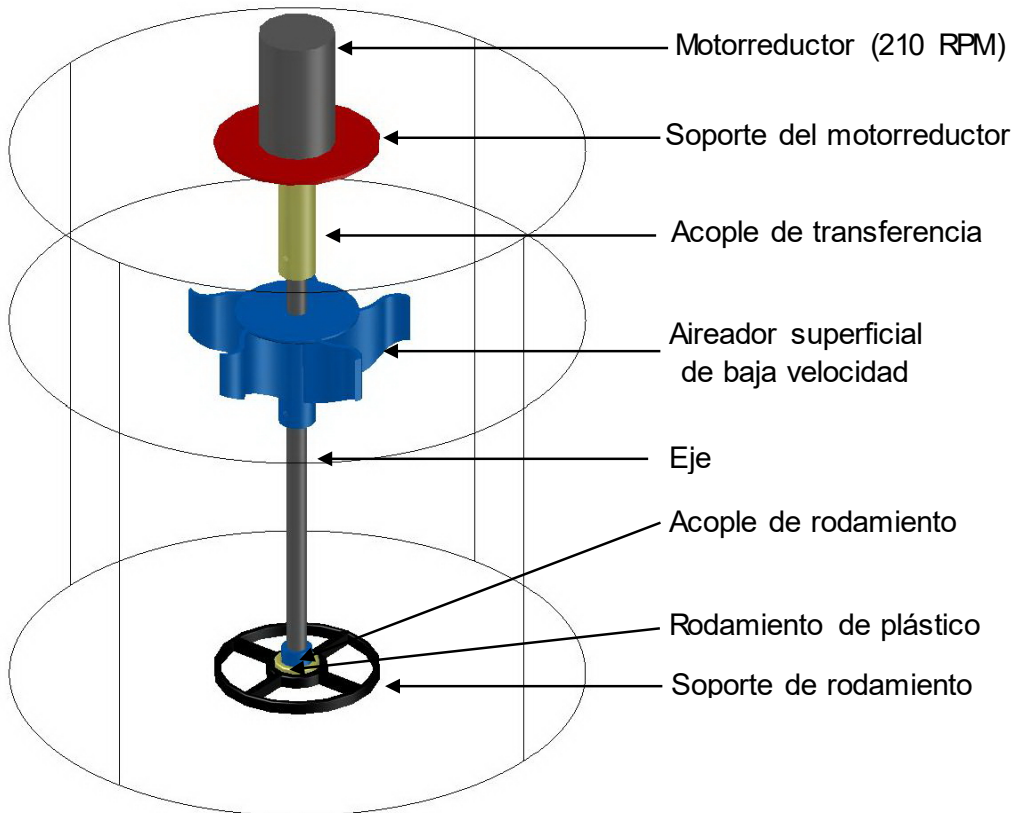
Fuente: Elaboración propia

Usando el método de impresión 3D, se construyeron tres tipos de LSSA, utilizando como material base tereftalato de polietileno glicol (PETG). Para estos LSSA, se respetó el número de impulsores (cuchillas), el diámetro externo, el diámetro interno, y la altura de los impulsores en el borde interno. Igualmente, se modificó el área del impulsor, así como su geometría, información que no se describe en detalle en el presente documento, pues es confidencial y representa un potencial de patente.

Por su parte, la profundidad de inmersión dispuesta para cada LSSA fue constante, de 45mm con respecto a la superficie del agua. Estos LSSA fueron acoplados por medio de un eje de aluminio de 9.9mm a un motorreductor, capaz de generar 210 RPM a 12 voltios, sin carga hidráulica. El sistema de propulsión fue acondicionado en un recipiente de plástico transparente con capacidad de 16L. El área del recipiente

establecida, fue de 594cm² y la profundidad de llenado de 20 cm. Con el fin de reducir la fricción del sistema, se adaptó un rodamiento plástico en el fondo del recipiente, garantizando la estabilidad del prototipo durante la rotación. Es posible que esta configuración haya consumido algo de potencia, situación que no se tuvo en cuenta durante el proyecto. La figura 2, presenta un esquema del sistema usado. Para garantizar la replicabilidad en los datos, se trabajó con dos sistemas simultáneamente.

Figura 2. Montaje del sistema del LSSA.



Fuente: Elaboración propia

Para cada ensayo se utilizaron 10.5 L de agua potable, retirando el OD mediante el uso de 0.9g de sulfito de sodio (Na_2SO_3) y 0.005g de cloruro de cobalto (CoCl_2), que cataliza la reacción. El sulfito de sodio agregado al agua reacciona con el OD formando sulfato de sodio (Na_2SO_4), removiendo el oxígeno presente. La concentración de saturación inicial de OD se estableció en 7.2 mgO₂/L (determinado mediante oxímetro electrónico Hach-flexi HQ30d US), con una temperatura promedio de 17°C, y una presión atmosférica de 738 hPa, que corresponde a la altitud de 2800 msnm.

La velocidad de rotación del motorreductor fue controlada mediante el uso de una fuente de voltaje regulada para corriente directa (DC). La potencia consumida del sistema (vatios - W), fue obtenida directamente en la fuente regulada, que depende del voltaje suministrado al motorreductor, así como del amperaje producto de la rotación del sistema, con carga hidráulica. Durante la investigación, se midió la potencia antes y después de someter el sistema aireador a la rotación con la carga de agua, y así evaluar la

verdadera potencia consumida durante la transferencia de oxígeno. Este procedimiento trata de comparar la potencia consumida del motorreductor, al girar libremente sin carga de agua, pues esta variable puede influenciar drásticamente los resultados obtenidos.

La configuración de todo el sistema permitió reducir las salpicaduras generadas por el LSSA, evitando derrames y pérdidas del fluido que pueden influir en el proceso de transferencia de oxígeno [16]. A partir de la generación de condición anóxica en el agua, el sistema aireador fue sometido a 8, 10 y 12 voltios, generando diferentes velocidades de rotación y tasas de transferencia de OD. El oxígeno transferido al agua fue medido de manera ininterrumpida a una profundidad de 6cm en intervalos de 10 minutos, hasta alcanzar un 98% de la concentración de saturación inicial [17]; que para este caso fue de 7.06 mgO₂/L.

Por último, se aplicó el modelo matemático de regresión no lineal descrito por [18, 19], para determinar la tasa de transferencia estándar de oxígeno (SOTR), el coeficiente de transferencia de oxígeno (kLa), y la eficiencia estándar de aireación (SAE). A continuación, se describen las ecuaciones implícitas en el modelo.

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

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). Debido a las variaciones de temperatura que se pueden presentar durante los experimentos, el coeficiente KLa se debe convertir a una temperatura estándar (T=20°C) usando la ecuación 2, así:

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

La tasa de transferencia estándar de oxígeno (SOTR₂₀), es determinada a partir de la ecuación 3, de la siguiente manera:

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

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.

Al mismo tiempo, la SOTR permite determinar la SAE teniendo en cuenta la potencia consumida durante el proceso de agitación del agua, y es calculada a partir de la ecuación 4, descrita a continuación:

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

Finalmente, la potencia consumida por el sistema, es el resultado del producto del voltaje (V) y el amperaje (A), tal y como se presenta en la ecuación 5:

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

Donde:

P = Potencia consumida en vatios (W).

V = Voltaje

A = Amperaje

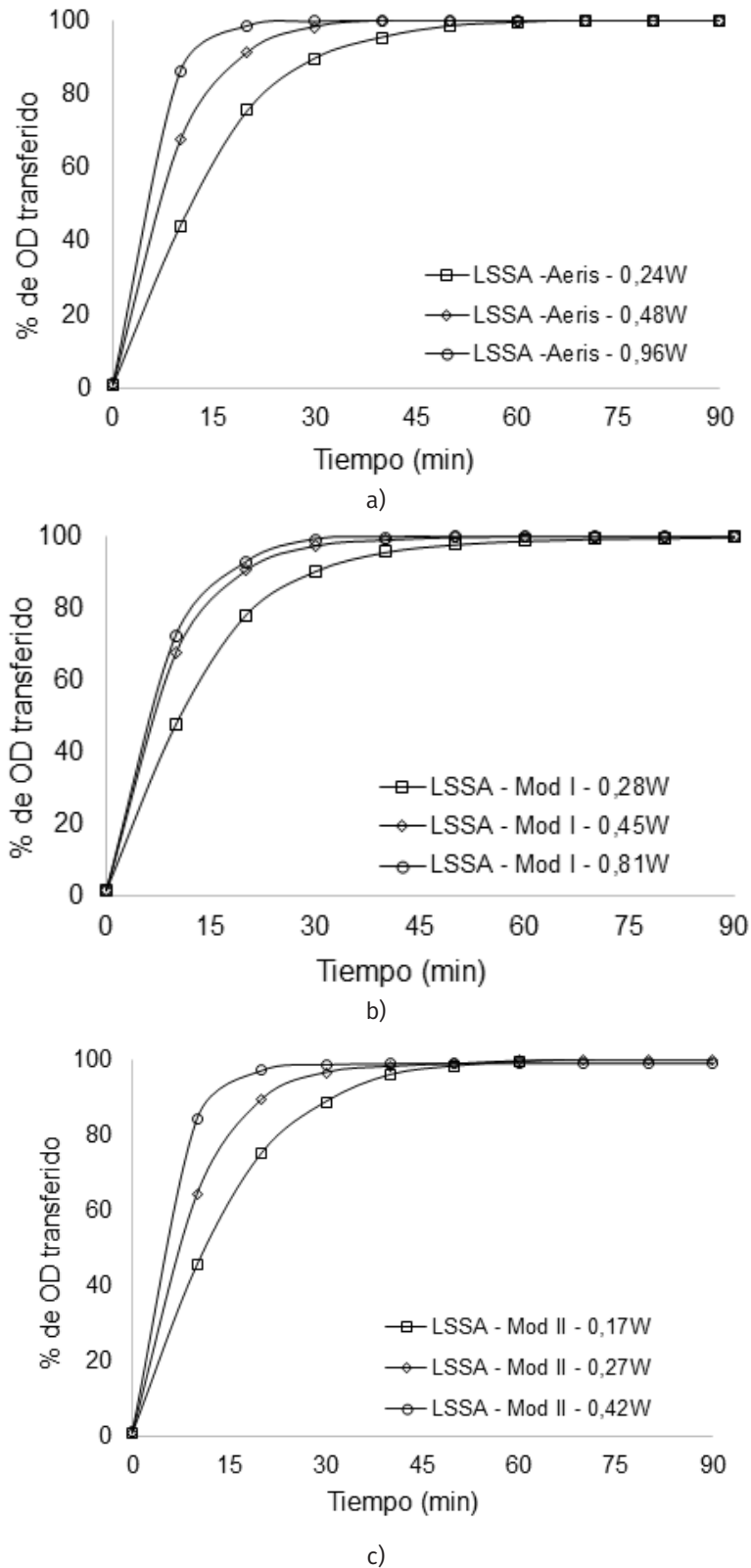
Resultados

La figura 3 presenta la variación del porcentaje transferido de OD durante el proceso de reoxigenación del agua, utilizando tres tipos de aireadores superficiales. En la figura 3 (a), se observa la tendencia para el LSSA de la marca Aeris.global®. Se evidenció un incremento de la potencia suministrada, que conllevó a una reducción en el tiempo requerido para alcanzar el estado de saturación del agua. En general, fueron necesarios 30 minutos de agitación para sobrepasar un 80% de transferencia de OD. La figura 3 (b), presenta el porcentaje de transferencia de OD para el LSSA modificado I. Se observó que la tendencia de transferencia es similar a la presentada por el LSSA Aeris.global®; no obstante, se reduce la potencia consumida cuando el sistema es sometido a 10 y 12V. Bajo estas circunstancias, se cree que un aumento en la potencia, así como en la velocidad de rotación del LSSA, no tiene un impacto significativo en la transferencia de OD. De hecho, Si los valores de potencia se comparan con el sistema LSSA Aeris.global®, se evidencia una reducción de 15.65 y 6.25%; pero aumenta en un 14.28% en el valor más bajo obtenido. Esta diferencia en la potencia consumida puede representar una mejor eficiencia energética a la hora de transferir OD utilizando este LSSA.

La figura 3 (c), muestra el comportamiento de transferencia de OD para el LSSA modificado II. En este caso, la tendencia es igual a la de los otros dos LSSA, pero el consumo de potencia se ha reducido aún más. Al comparar los valores obtenidos, con el LSSA de Aeris.global®, se aprecia una reducción de 56.25, 43,75 y 29.16%. Es indispensable entonces, indicar que los valores de potencia fueron obtenidos a partir de los voltajes suministrados al motorreductor (8, 10 y 12V). En este sentido, una disminución en la potencia indica que el LSSA presenta una menor resistencia a la rotación, desplazamiento y avance al momento de estar sumergido; y se debe principalmente a la geometría de los impulsores.

Bajo este contexto, se logró establecer que los mayores valores de transferencia de OD tienen lugar en los primeros 15 minutos de operación del sistema aireador, debido a que en ese período de tiempo, hay una mayor diferencia entre la presión parcial del oxígeno atmosférico con respecto al oxígeno presente en el líquido [20]. De este modo, cuando el agua alcanza un estado de saturación, se reduce la transferencia de OD, pues las presiones parciales tienden a igualarse.

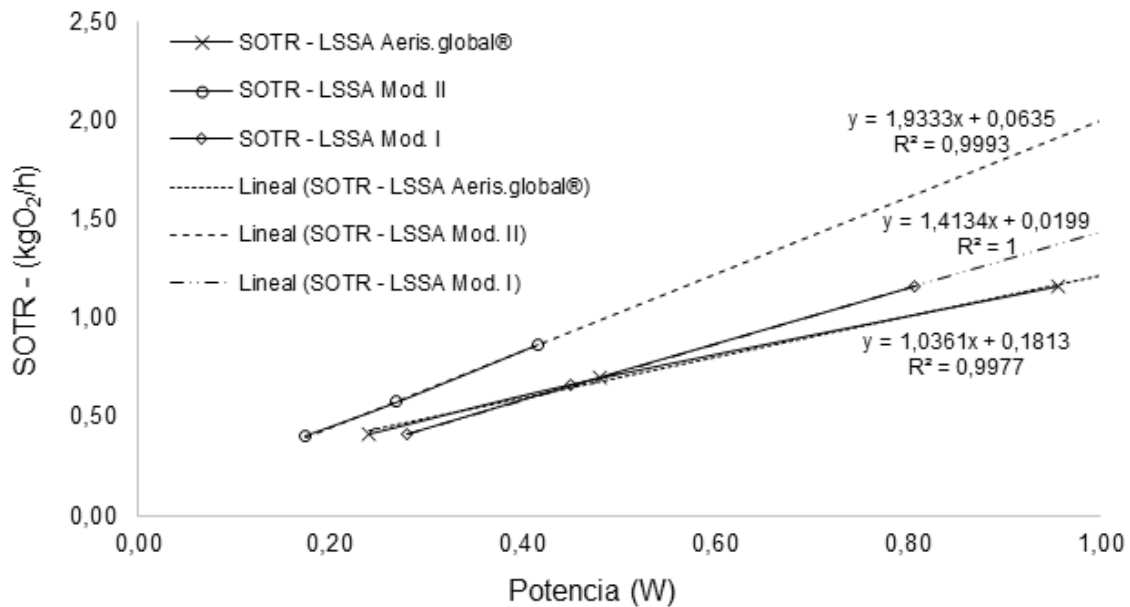
Figura 3. Comportamiento de la transferencia de OD para los LSSA Aeris.lobal® (a), modificación I (b), y modificación II (c)



Fuente: Elaboración propia

Con base en la transferencia de OD y la potencia consumida por el sistema aireador, se logró determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno (kLa), expresado en h⁻¹. A partir de este coeficiente fue posible establecer la SOTR, expresada como la cantidad de kg de OD transferido por unidad de tiempo (h). La figura 4 presenta el comportamiento de la SOTR en función de la potencia para cada sistema aireador analizado. Si bien los valores finales de la SOTR son más altos para los sistemas LSSA Aeris.global® y LSSA modificado I, el análisis matemático revela que el sistema LSSA modificado II, presenta la mejor proyección frente a la transferencia de OD, si este se compara con los demás sistemas. A partir de las ecuaciones se logró establecer que este sistema aireador tendría una mayor eficiencia a la de los sistemas LSSA modificado I, y LSSA Aeris.global®, superándolas con alrededor de 36.9 y 63.9%, respectivamente.

Figura 4. SOTR y proyecciones para cada sistema aireador analizado.



Fuente: Elaboración propia

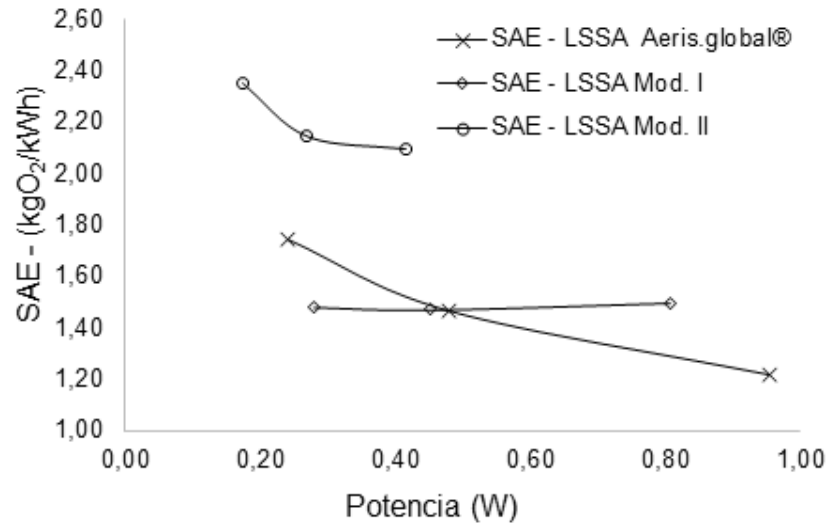
El comportamiento de la SAE y el coeficiente kLa en función de la potencia suministrada al sistema aireador, se muestra mediante la figura 5. Se evidenció que el mejor comportamiento lo presenta el sistema LSSA modificado II, de acuerdo con lo descrito en la figura 5 (a), cuyos valores sobrepasan el rango de 2 kgO₂/kWh. El sistema LSSA Aeris.global® presenta un comportamiento poco eficaz, con un decaimiento de la SAE a medida que aumenta la potencia. El valor máximo obtenido fue de 1.74, sin embargo, este desciende hasta 1.22 kgO₂/kWh. Mientras que el sistema LSSA modificado I, mostró una tendencia estable al aumentar la potencia, presentando un valor promedio de 1.48 kgO₂/kWh.

Por otra parte, la figura 5 (b) presenta los valores del kLa en función de la potencia. Es evidente que al aumentar la potencia que se suministra al sistema aireador, incrementa el número de revoluciones (RPM), lo que trae consigo una mayor agitación y turbulencia del agua y, por ende, valores altos del coeficiente de transferencia de oxígeno. En este caso el sistema LSSA Aeris.global® exhibe el mejor comportamiento, alcanzado valores de 12.05 h⁻¹. Entre tanto, los sistemas LSSA modificado I y LSSA modificado II, presentaron valores de 11.78 y 8.99 h⁻¹.

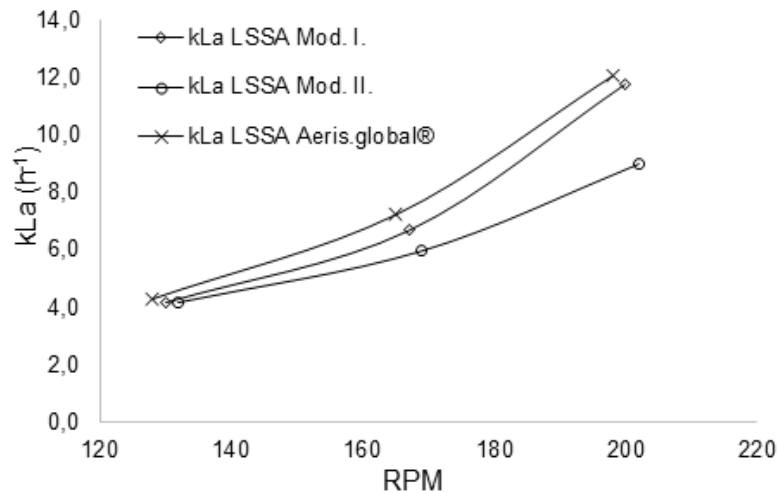
Sumado a lo anterior, se deduce que las RPM generadas con el motorreductor elegido, están en el rango de trabajo de esta tecnología a escala real. Desde esta perspectiva, es necesario señalar que el número de impulsores influye directamente en las diferentes variables calculadas en el presente estudio, ya que, al

reducir su número, consecuentemente, disminuye el arrastre, la agitación del agua, y la potencia consumida [16, 21, 22]. Generalmente, un alto coeficiente kLa , no representa una alta eficiencia en la transferencia de OD, ya que la SAE puede verse reducida dramáticamente, debido al aumento de la potencia consumida [7].

Figura 5. Comportamiento de la SAE (a), y el kLa (b), en función de la potencia, para cada sistema aireador analizado.



a)



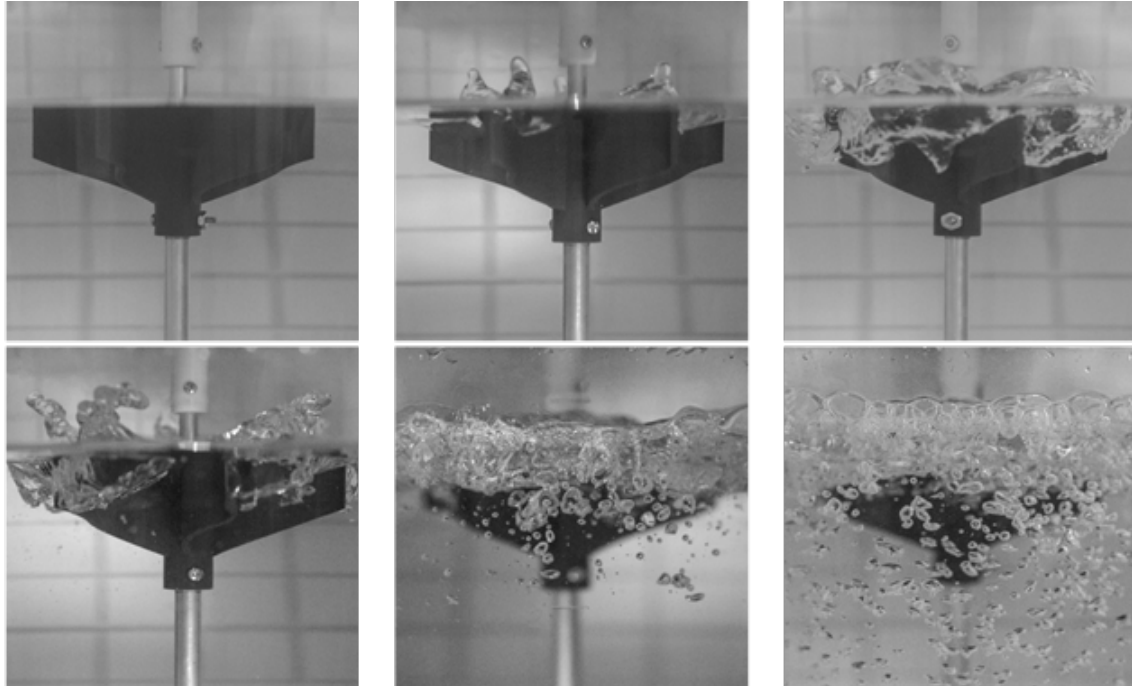
b)

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento secuencial del aire atrapado por el sistema LSSA Aeris.global®, se muestra en las fotografías presentadas en la figura 6. A partir del análisis fotográfico realizado en alta velocidad, se pudo establecer el comportamiento del aireador de superficie y su funcionamiento en la transferencia de oxígeno. En la etapa inicial estacionaria, se comprobó que el nivel del agua, corresponde al nivel de inmersión del aireador. Luego de inducir potencia al sistema aireador, se genera movimiento en los impulsores, que elevan un volumen de agua sobre la superficie y al mismo tiempo generan rotación del fluido. Como consecuencia, el impacto del agua sobre la superficie genera turbulencia y atrapa el aire en forma de burbujas. Luego, la rotación final después del arranque, distribuye las burbujas atrapadas en la fase líquida y genera la continuidad de este proceso.

Al observar detalladamente las fotografías, se puede afirmar, que el radio de acción frente a la generación de turbulencia y atrapamiento de burbujas, sobrepasa el diámetro del recipiente elegido para la experimentación. Es posible entonces, que el radio de expansión y desplazamiento de burbujas, sea mucho mayor el observado, ya que estas golpean continuamente las paredes del recipiente. En este sentido, no es posible descartar, que el desplazamiento de las burbujas atrapadas en el agua también genere turbulencia, a medida que estas ascienden y escapan hacia la superficie [23].

Figura 6. Comportamiento secuencial del aire atrapado por el sistema LSSA Aeris.global®, capturado con cámara de alta velocidad.



Fuente: Elaboración propia

Con el fin de sintetizar los resultados obtenidos, la tabla 1, presenta a continuación, los datos del estudio, calculados para una temperatura del agua de 20°C.

Tabla 1. Síntesis de los resultados obtenidos, para cada sistema aireador analizado.

Parámetro:	LSSA Aeris.global®.			LSSA Modificado I.			LSSA Modificado II.		
	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Voltaje (V)	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Amperaje (A)	0.03	0.048	0.08	0.035	0.045	0,068	0.021	0.027	0.035
Potencia (W)	0.24	0.48	0.96	0.28	0.45	0,81	0.17	0.27	0.42
RPM	128	165	198	130	167	200	132	169	202
KLa (20°C) h-1	4.31	7.24	12.05	4.20	6.70	11,78	4.17	5.97	8.99
dC/dt (g/h.m3)	33.69	66.59	110.8	38.62	61.62	108.3	38.40	54.91	82.73
SOTR (kgO2/h)	0.42	0.70	1.16	0.41	0.66	1,16	0.40	0.58	0.87
SAE (kgO2/kWh)	1.74	1.47	1.22	1.48	1.47	1,50	2.35	2.14	2.09

Fuente: Elaboración propia

Discusión

Los resultados obtenidos indican que la transferencia de OD podría darse por la diferencia de velocidades existente, entre el sistema aireador y el agua. En la medida en que se lleva a cabo la rotación, el agua se desplaza a una menor velocidad, acarreado turbulencia en el fluido y permitiendo que haya atrapamiento de aire dentro de este; que, a su vez, favorece el intercambio de gases entre la atmósfera (fase gaseosa), con el agua (fase líquida). Situación particular que se manifiesta con altos valores en los coeficientes kLa [24], sin constituir una elevada eficiencia en el proceso de aireación.

Otro fenómeno de especial interés, fue la distribución significativa del tamaño de las burbujas desplazadas en el agua. Los tres casos analizados permiten evidenciar la tendencia de las burbujas, a distribuirse a lo largo del volumen del fluido, sumergiéndose hasta la base del recipiente. Este efecto rotacional favorece la retención de burbujas, antes de que logren alcanzar la superficie del agua y escapar hacia la atmósfera. Así, cuando hay un mayor tiempo de contacto entre las burbujas de aire con el agua, mejora la difusión de OD dentro de ésta [23, 25, 26, 27, 28]. También, es relevante señalar que el mayor consumo de potencia se observó durante la etapa inicial o de arranque; no obstante, este consumo de potencia comienza a descender hasta el punto donde logra estabilizarse, debido a la rotación inducida por el agua, que disminuye el gasto energético en el proceso de transferencia de OD.

En este contexto, es indiscutible que existen múltiples procesos y variables que intervienen en la transferencia de OD, entre otros: motor usado, caja de reducción, geometría y material del impulsor, viscosidad del agua, temperatura ambiente, altitud, y presencia de sales disueltas. Para tratar de discernir que tanto contribuye cada uno, debido a su complejidad, se requerirá la realización de innumerables investigaciones, que tomen como base el presente estudio. De este modo, se comprenderán detalladamente estos fenómenos, dando paso al diseño de sistemas de aireación de tipo LSSA, más eficientes respecto al consumo de potencia energética [26].

Conclusiones

Las modificaciones geométricas propuestas para los impulsores, mejoran la eficacia inicial del dispositivo de Aeris.global®. Los resultados muestran que las alteraciones geométricas hechas al sistema LSSA Aeris.global® tienen el potencial teórico, de disminuir el consumo energético asociado a su funcionamiento, sin penalizar la transferencia de OD.

Al analizar el sistema LSSA modificado II, se evidenció que presenta una mayor SAE, con un rango superior a los 2.0 kgO₂/kWh, semejante al reportado por la literatura. Sin embargo, los valores de SOTR fueron inferiores a los del sistema LSSA Aeris.global® (0,87 frente a 1.16 kgO₂/h); pese a esto, al proyectar la tendencia en función de la potencia, se estableció que el sistema LSSA modificado II, tiene un gran potencial de ser implementado a escala real como dispositivo aireador.

La aplicación de tecnologías innovadoras, como la impresión 3D, podría permitir la evaluación de modelos hidráulicos y ambientales a escala piloto, contribuyendo sustancialmente en la mejora de procesos a bajo costo. Paralelo a esto, sería posible favorecer el análisis de sistemas como el tratamiento de agua residual, generando impactos positivos en relación al consumo energético y como consecuencia la reducción de emisiones de GEI.

Agradecimientos

Los autores agradecen al departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC.

Referencias bibliográficas

1. D. Caniani, G. Esposito, R. Gori, and G. Mannina, "Towards A New Decision Support System for Design, Management and Operation of Wastewater Treatment Plants for the Reduction of Greenhouse Gases Emission," *Water*, vol. 7, no. 10, pp. 5599–5616, Oct. 2015, DOI: <http://doi.org/10.3390/w7105599>.
2. G. Mannina, A. Cosenza, R. Gori, M. Garrido-Baserbac, R. Sobhani, and D. Rosso, "Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants on a Plantwide Scale: Sensitivity and Uncertainty Analysis," *J. Environ. Eng.*, vol. 142, no. 6, p. 04016017, Jun. 2016, DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001082](http://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001082).
3. T. Xie and C. Wang, "Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China.," *World Congr. Water, Clim. Energy*, pp. 1–17, 2012, DOI: <http://doi.org/10.13140/2.1.1228.9285>.
4. A. Maślóń, "Analysis of energy consumption at the Rzeszów Wastewater Treatment Plant," *E3S Web Conf.*, vol. 22, p. 00115, Nov. 2017, DOI: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200115>.
5. 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.
6. G. Tchobanoglous, F. Louis Burton, and H. D. Stensel, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, Fourth Edit. Mc Graw Hill.
7. S. B. Thakre, L. B. Bhuyar, and S. J. Deshmukh, "Effect of Different Configurations of Mechanical Aerators on Oxygen Transfer and Aeration Efficiency with respect to Power Consumption," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 170–178, 2008.
8. M. Adel, M. R. Shaalan, R. M. Kamal, and D. S. El Monayeri, "A comparative study of impeller aerators configurations," *Alexandria Eng. J.*, vol. 58, no. 4, pp. 1431–1438, Dec. 2019, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.aej.2019.11.014>.
9. W. Huang, C. Wu, and W. Xia, "Oxygen Transfer in High-Speed Surface Aeration Tank for Wastewater Treatment: Full-Scale Test and Numerical Modeling," *J. Environ. Eng.*, vol. 135, no. 8, pp. 684–691, Aug. 2009, DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000023](http://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000023).
10. H. M. Issa, "Characterization and improvement of a surface aerator for water treatment," Université de Toulouse, 2013.
11. P. Duchène and E. Cotteux, *Insufflation d'air fines bulles : application aux stations d'épuration en boues activées des petites collectivités*. 2002.
12. M. Roustan and J.-C. Charpentier, *Tranferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux*. Paris,--Londres,--New York, 2003.
13. J. Mueller, W. C. Boyle, and H. J. Popel, *Aeration: principles and practice*, 1st ed., vol. 11. Boca Raton, Filadelfia, USA, 2002.
14. B. Cancino, P. Roth, and M. Reuß, "Design of high efficiency surface aerators," *Aquac. Eng.*, vol. 31, no. 1–2, pp. 83–98, Aug. 2004, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.03.002>.
15. B. Cancino, "Design of high efficiency surface aerators," *Aquac. Eng.*, vol. 31, no. 1–2, pp. 99–115, Aug. 2004, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.03.003>.

16. S. Bahri, Jufriadi, and H. Anwar, "The Ineffectiveness of Water Splash on Paddlewheel Aerator," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 268, no. 1, 2019, DOI: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/268/1/012162>.
17. A. S. of C. Engineers, *ASCE Standar: Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water (2-06)*. 2007.
18. L. Uby, "Next steps in clean water oxygen transfer testing – A critical review of current standards," *Water Res.*, 2019, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.063>.
19. 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: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.035>.
20. 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: <http://doi.org/10.1111/are.13674>.
21. S. M. Roy, S. Moulick, and B. C. Mal, "Design Characteristics of Spiral Aerator," *J. World Aquac. Soc.*, vol. 48, no. 6, pp. 898–908, 2017, DOI: <http://doi.org/10.1111/jwas.12410>.
22. 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.
23. 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.
24. 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: <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.06.011>.
25. M. K. Stenstrom, S.-Y. (Ben) Leu, and P. Jiang, "Theory to Practice: Oxygen Transfer and the New ASCE Standard," *Water Environ. Found.*, pp. 4838–4852, 2006.
26. H. Camacho, D. Campos, I. Mercado, N. Cubillán, G. Castellar, "Uso de la cáscara de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la clarificación del agua de la Ciénaga de Malambo," *Investigación e Innovación en Ingenierías.*, vol. 8, no. 1, pp. 100–111, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3572>
27. C. J. Obando Gamboa, "Influencia del agua en el desempeño de los pavimentos: lluvia ácida", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 5, n.º 2, pp. 190-206, 2017. DOI:<https://doi.org/10.17081/invinno.5.2.2761>
28. 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: <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.03.006>.