

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 563 852**

51 Int. Cl.:

**A01G 33/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.11.2013** **E 13382470 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.01.2016** **EP 2875724**

54 Título: **Reactor abierto para cultivo de microalgas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**16.03.2016**

73 Titular/es:

**FCC AQUALIA, S.A. (100.0%)  
Federico Salmón, 13  
28016 Madrid, ES**

72 Inventor/es:

**LARA CORONA, ENRIQUE y  
ROGALLA, FRANK**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 563 852 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Reactor abierto para cultivo de microalgas

5 **Sector de la técnica**

La presente invención se engloba dentro del sector de la producción de microalgas o cultivos mixotróficos de algas-bacterias, para un uso posterior de las mismas, tal como en procesos de depuración de efluentes líquidos mediante su cultivo. En concreto la invención se enmarca en el área de cultivo en sistemas de reactores abiertos de carrusel o lagunas algales de alta tasa (HRAP).

**Estado de la técnica**

Las microalgas son microorganismos de gran utilidad ya que presentan aplicaciones beneficiosas en áreas tan diferentes como el tratamiento de aguas residuales, la producción de biocombustibles, biofertilizantes, la alimentación humana y animal, la reducción de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>), o la obtención de productos químicos de alto valor. Los cultivos de microalgas pueden alcanzar niveles de productividad mucho más elevados que los cultivos de plantas superiores, dando como resultado niveles más elevados de fijación de CO<sub>2</sub> y una mayor cantidad de biomasa producida. Además, los cultivos de microalgas tienen menores necesidades de agua y no compiten con los cultivos tradicionales, puesto que no necesitan terrenos fértiles y pueden usar aguas con bajos parámetros de calidad, como aguas residuales y salmueras.

En el caso del tratamiento de aguas residuales, los cultivos de microalgas pueden desempeñar un papel fundamental en el futuro. Los cultivos mixotróficos de algas-bacterias permiten reducir el consumo de energía de los tradicionales sistemas de fangos activos, entre 0,2 y 0,4 kw/m<sup>3</sup>, dado que las microalgas producen el oxígeno necesario para que las bacterias degraden la materia orgánica y realicen el proceso de nitrificación. Además, las microalgas incorporan el N y el P de las aguas residuales durante su crecimiento fotosintético, transformándolo en biomasa que puede ser recuperada en el proceso de cosechado y evitando por tanto su vertido y los problemas medioambientales derivados de dicho vertido, como la eutrofización de los cauces receptores. También proporcionan el mayor nivel de eliminación de patógenos de todos los sistemas empleados para el tratamiento biológico de aguas residuales.

Dentro de los sistemas de producción de microalgas existen principalmente dos clases diferenciadas: sistemas cerrados y abiertos. Los sistemas cerrados se caracterizan por aislar el fluido del ambiente exterior y estar menos expuestos a sus perturbaciones, mientras que los sistemas abiertos se caracterizan por tener una mayor interacción o exposición con el ambiente y depender en mayor medida de las condiciones del mismo. Los sistemas abiertos (Oswald y Golueke, 1960) son los que han tenido un mayor éxito a nivel industrial por su menor coste, aunque su uso se ha limitado a determinadas especies extremófilas debido a problemas de contaminación. Sin embargo, en su aplicación para el tratamiento de aguas residuales, el control de la especie en cultivo no es tan determinante por lo que este tipo de reactores ha sido el más utilizado. Estos reactores abiertos se conocen como reactores de carrusel o HRAP (siglas en inglés de *High Rate Algae Pond* "lagunas algales de alta tasa"). Este tipo de reactores, aunque se ha descrito su empleo en el tratamiento de aguas residuales con microalgas, no han sido adecuadamente optimizados, lo que se plantea como un reto fundamental.

Estos reactores abiertos, en adelante HRAP, son lagunas abiertas de escasa profundidad, con un nivel de lámina de agua que varía entre 0,2 y 0,6 m, con forma de carrusel alrededor de una pared intermedia (dos tramos rectos separados por un tabique y unidos entre sí por sus extremos mediante curvas). En estas lagunas el agua se hace circular a velocidades horizontales medias que varían entre 0,2 y 0,4 m/s con la ayuda de un sistema de agitación o acelerador de flujo del tipo *paddlewheel* o rueda de paletas. Las lagunas se pueden construir con láminas impermeabilizantes o sin ellas, dependiendo de las condiciones del suelo y la normativa local. El CO<sub>2</sub> suele añadirse a la laguna mediante un sistema de inyección contracorriente situado en un foso con deflector de aproximadamente 1,5 m de profundidad. Las curvas se construyen con la misma anchura que los tramos rectos del canal, o ligeramente más estrechas en la zona de la rueda de paletas y con varios deflectores curvos para evitar el desprendimiento del flujo y la formación de zonas muertas (Figura 1, estado de la técnica).

El diseño de los HRAP para el cultivo de algas no ha sido modificado y apenas se ha mejorado desde los años 50. Además, adolece de dos problemas principales que reducen su eficiencia y que se solucionan mediante la presente invención:

- 1) elevada cantidad de energía consumida en el proceso de agitación
- 2) baja productividad por sedimentación de biomasa.

Con respecto a la elevada energía consumida en la agitación del cultivo, este consumo de energía se debe principalmente a:

- problemas hidráulicos en sistema de carbonatación

- problemas hidráulicos en las curvas
- bajo rendimiento hidráulico en el sistema de agitación empleado.

Problemas hidráulicos en el sistema de carbonatación

5 Habitualmente el sistema de carbonatación empleado consiste en un foso con deflector vertical, donde el gas es burbujeado con CO<sub>2</sub> desde el fondo, en sentido contrario al flujo. Este tipo de deflectores representa un obstáculo brusco para el flujo horizontal en el reactor HRAP, originando una pérdida de carga importante, que es la pérdida principal en un HRAP convencional, y que se estima en valores del coeficiente K de pérdida localizada (ver más abajo) próximos a 4. Recientemente se ha conseguido mejorar la configuración de los sistemas de carbonatación mediante la eliminación del tabique y la reubicación del dispositivo de inyección de gas con suficiente éxito como para reducir significativamente estas pérdidas (solicitud de patente española P201231485).

Problemas hidráulicos en las curvas

15 Las curvas de 180° utilizadas habitualmente, como las mostradas en la Figura 1 (estado de la técnica), tienen una anchura media de radio/canal curvo= 0,5, que es muy reducida, lo que origina pérdidas de carga importantes. Las pérdidas de carga h se pueden estimar a partir del coeficiente K de pérdida localizada, según la siguiente ecuación:

$$h = K \times \frac{v^2}{2g}$$

20 El coeficiente K puede tener unos valores muy elevados en las curvas convencionales. Para la reducción de estas pérdidas, los diseños más utilizados hasta la fecha (Sompech, Chisti *et al.* 2012) incluyen la división de la curva en varios canales mediante deflectores circulares para minimizar las zonas de separación del flujo (ver Figura 1, estado de la técnica). Estos deflectores reducen las zonas muertas y las pérdidas de carga asociadas, no obstante, al dividir la curva hasta en cuatro canales, se originan pérdidas de carga por fricción con valores de K de aproximadamente 2, como se refleja en Lundquist T.J. (2010). Este valor sigue siendo muy elevado y debe minimizarse para que estos sistemas sean más rentables. Otro intento reciente de reducción del consumo energético en las curvas, aparece en el artículo Liffman, Paterson *et al.* (2013), quienes realizaron una simulación fluido-dinámica mediante técnicas CFD con el programa *Ansys Fluent*, poniendo de manifiesto la posibilidad de reducción energética en las curvas convencionales de hasta un 87 %, gracias a un diseño de profundidad variable y sección constante, con un estrechamiento desde el tramo recto del canal hasta la curva en forma de gota (Figura 2, estado de la técnica). Sin embargo este diseño tiene varios problemas:

- el estrechamiento se realiza asimétricamente con respecto al eje central del canal recto, por lo que el flujo F sale de la curva descentrado con respecto a dicho eje. Lo anterior origina una distribución de velocidades no uniformes, con mayores velocidades en la cara externa del canal recto. Asimismo este sistema requiere equipos de agitación convencionales de tipo rueda de paletas, ya que es difícilmente adaptable a agitadores sumergibles.
- la costosa construcción de los muros laterales y el fondo del canal de las transiciones debido a la complejidad de las funciones cos(X), necesarias para una transición suave.
- no incluye ningún sistema de carbonatación ni eliminación de sólidos sedimentables.

Bajo rendimiento hidráulico en el sistema de agitación

45 El sistema de agitación habitualmente utilizado es, por ejemplo, el referido en las patentes estadounidenses US 3.855.370 y US 8.142.167. Este sistema consiste en una rueda de paletas que impulsa el agua al girar sobre su eje, según se describe en la Figura 3 (estado de la técnica). La ventaja de este sistema es que permite trabajar con niveles bajos de lámina de agua, como los utilizados habitualmente en los HRAP, entre 0,2 y 0,6 m. El problema es que este dispositivo tiene una eficiencia hidráulica y global (hidráulica y mecánica) muy baja.

- Rendimiento hidráulico = energía hidráulica de agitación/energía en el eje de giro.
- Rendimiento energético global del sistema = energía hidráulica de agitación/electricidad consumida

55 Se han comunicado valores de rendimiento hidráulico tan bajos como un 17 % (Borowitzka, 2005) y 10 % (Chiaromonti, Prussi *et al.*, 2013), y del rendimiento energético global del sistema tan bajos como un 4 % (Richmond, 2003) o 5 % (Chiaromonti, Prussi *et al.*, 2013), aunque algunos estudios hablan de valores superiores, 40 % aproximadamente (Weissman JC, 1989). El motivo es que las paletas pierden gran parte de la energía en empujar hacia abajo el flujo durante la entrada de la paleta en el agua, y en bombear y extraer el agua verticalmente durante la salida de la paleta.

60 Se han producido algunos intentos por sustituir la rueda de paletas por otros dispositivos energéticamente más eficientes. En concreto, se han utilizado agitadores sumergibles de alta velocidad o bombas axiales (las bombas axiales son, en realidad agitadores sumergibles de alta velocidad con flujo guiado). Por ejemplo, estos agitadores de alta velocidad fueron los utilizados en los HRAP de cultivo de microalgas en la planta de tratamiento de aguas residuales de Riudecanyes, Tarragona (1.500 habitantes; García, J., y Mujeriego, R. (1999)), o en un reciente

estudio emprendido por Chiaramonti, Prussi *et al.* (2013). En este artículo los agitadores sumergibles son de alta velocidad de rotación (normalmente > 700 rpm) y pequeño diámetro (normalmente entre 100 y 400 mm) y se colocan en un estrechamiento del canal principal, a modo de *venturi*. Mediante este sistema de agitadores de alta velocidad, en la referencia propuesta, se reivindica un ahorro energético del 60,5 % en una laguna de 500 m<sup>2</sup> y del 65 % en una laguna de 5 m<sup>2</sup>, con respecto al sistema convencional de rueda de paletas. Sin embargo, este sistema propuesto tiene algunos problemas importantes:

a) Bajo rendimiento hidráulico: El rendimiento energético asociado a la hidráulica en un agitador sumergible depende del factor de potencia  $e_p$  (N/kw), o cociente entre el empuje de la  $F_{hélice}$  (Newtons) y la potencia absorbida  $P_1$  (kw) en el punto de trabajo.

$$e_p = \frac{F_{hélice}}{P_1}$$

Cuanto mayor es el factor de potencia, mayor eficiencia tendrá el agitador, ya que es capaz de impulsar una mayor corriente con menor energía consumida. El factor de potencia de los agitadores sumergibles de velocidad elevada y pequeño diámetro es un valor bajo, comprendido entre 100 y 300 N/kw, lo que resulta en bajos rendimientos energéticos.

b) Pérdida de carga elevada en el sistema *venturi*: Los agitadores sumergibles de alta velocidad de rotación también tienen una velocidad de flujo elevada, a menudo superiores a 10 m/s. Estas velocidades de flujo generan una contracción y expansión desde esa velocidad hasta alcanzar 0,2-0,3 m/s en el canal recto y por tanto, turbulencias e importantes pérdidas de carga asociadas.

c) Estrés celular: Las velocidades de rotación elevadas, superiores a 100 rpm y normalmente superiores a 700 rpm, pueden afectar a algunos tipos de algas, especialmente a las filamentosas y flageladas, aunque demuestran en su artículo que no se produjeron daños en el cultivo específico que ellos estaban desarrollando.

d) Necesita una elevada sumergencia o lámina de agua sobre la hélice para evitar el efecto vórtice y la cavitación, debido a la succión generada por la velocidad del flujo en la bomba.

e) Bajo rendimiento volumétrico (medido como el ratio entre el caudal efectivo real en el HRAP y el caudal de flujo impulsado por la hélice): El agitador del artículo referenciado se coloca en un sistema *venturi* en canal abierto, lo que provoca un reflujo desde la mayor presión de impulsión a la menor presión de aspiración, a través de las holguras entre la hélice y el canal. Estos reflujos producen una disminución del rendimiento volumétrico, de forma que el caudal efectivo real en el HRAP es inferior al caudal efectivo impulsado por la hélice, a veces incluso un 50 % menos en algunas simulaciones fluido-dinámicas realizadas para la presente patente. Otra solución para evitar estos reflujos es colocar un muro donde alojar el agitador, utilizando en este caso uno en forma de bomba axial, como se hizo en la planta de tratamiento de Riudecanyes (Tarragona). El problema son las elevadas pérdidas de carga provocadas en el estrechamiento del orificio resultante y una hidráulica muy defectuosa, con zonas muertas. En esta planta de tratamiento, de hecho, se produjeron importantes zonas de sedimentación de sólidos que impidieron el correcto funcionamiento del sistema.

En términos de baja productividad por sedimentación de biomasa, éste es otro de los problemas habituales en las HRAP, debido a la acumulación incontrolada de biomasa en zonas muertas como consecuencia de los defectos en el diseño hidráulico comentados antes, principalmente en las curvas y en el fondo. En las curvas convencionales se producen estas zonas muertas en las caras externas de los deflectores y en la pared divisoria central del HRAP a la salida de la curva. Esta acumulación de la biomasa reduce la productividad de las algas, y por tanto su valor asociado. También se produce una sedimentación incontrolada en el fondo debido a la defectuosa agitación del sistema convencional de rueda de paletas. Por ello se han desarrollado sistemas complejos para extraer la gran cantidad de biomasa que este sistema no es capaz de mantener en suspensión, como el presentado en la patente US 3.969.249. Este elevado nivel de sedimentación también se produjo en la planta de tratamiento de Riudecanyes, donde se utilizaron agitadores rápidos con hidráulica defectuosa.

A la vista de los problemas de eficiencia energética y productividad detectados en los sistemas de reactor de carrusel abierto o lagunas algales de alta tasa, incluso cuando se ha mejorado el diseño hidráulico del canal (sobre todo en las curvas del mismo), la presente invención tiene por objeto mejorar el diseño de dispositivos de carrusel que se usan habitualmente, de tal forma que de forma conjunta y sinérgica, se mejore la hidrodinámica de todo el sistema.

## 55 Referencias bibliográficas

Borowitzka, M. (2005). "Culturing microalgae in outdoor ponds." *Algal Culturing Techniques*. Andersen RA (Ed). Elsevier Academic Press, CA, EE.UU.: 204-218.

Chiaramonti, D., M. Prussi, *et al.* (2013). "Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible." *Applied Energy* 102(0): 101-111.

Hager, W. H. (2010). "Wastewater Hydraulics, Theory and practice." (Capítulo 2): 33.

García, J., y Mujeriego, R. (1999). Oxigenación fotosintética en lagunas para la depuración de aguas residuales. *Tecnología del Agua* 195, 57-64.

Liffman, K., D. A. Paterson, *et al.* (2013). "Comparing the energy efficiency of different high rate algal raceway

pond designs using computational fluid dynamics." Chemical Engineering Research and Design 91(2): 221-226.  
 Lundquist TJ, W. I., Quinn NWT, Benemann JR (2010). "A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production." Energy Biosciences Institute.  
 Richmond, A. (2003). "Handbook of microalgal mass culture. Blackwell science Ltd."  
 5 Sompech, K., Y. Chisti, *et al.* (2012). "Design of raceway ponds for producing microalgae." Biofuels 3(4): 387-397.  
 Weissman JC, T. D., Goebel RP (1989). "Design and operation of an outdoor microalgae test facility, Final Subcontract Report." Microbial Products Inc. Vacafille, California 95688.  
 Solicitud de patente española P201231485: Sistema de carbonatación para cultivos de microalgas en reactores abiertos.  
 10 US 8.142.167: Paddlewheel apparatus  
 EP 2524962 A1: Algae Culture System  
 MX 2012013346A: Microalgae growth pond design  
 US 3.855.370: Mixer for algae ponds  
 US 3.969.249: Solid Remover for High Rate Algae Ponds

**Breve descripción de la invención**

La presente invención se refiere a un reactor abierto de carrusel o lagunas algales de alta tasa (HRAP) para el cultivo de microalgas o el cultivo mixotrófico de microalgas-bacterias, donde se reduce el consumo de energía del dispositivo de agitación entre un 80 y un 90 % con respecto a los sistemas convencionales actualmente utilizados, y se toma en cuenta que la productividad de la biomasa algal también se optimiza gracias a la configuración de los tramos principales que componen el canal. La reducción del consumo de energía se ha realizado gracias a un nuevo diseño de HRAP con mejoras hidráulicas y mejoras en el sistema de agitación. Por consiguiente, la presente invención proporciona un reactor de laguna algal de alta tasa (HRAP) como el descrito en la reivindicación 1.

El reactor abierto HRA objeto de la patente, presenta un canal de flujo por el que discurre la lámina de agua de cultivo con un nivel de agua que varía entre 0,2 y 0,6 m, en forma de rectángulo redondeado de cuatro secciones: dos tramos rectos paralelos separados por un tabique intermedio y unidos en sus extremos por curvas (dos) de 180° en forma de semicírculos, cada una de ellas dotada de una entrada y una salida en función de la dirección en la que discurre la lámina de agua; y que comprende al menos un sistema de agitación del flujo de agua, también denominado en la presente memoria, acelerador de flujo, situado a la salida de una de las curvas hacia el tramo recto contiguo del canal.

Siguiendo las enseñanzas de la técnica anterior para lograr mejoras hidráulicas, al menos una de las dos curvas y en concreto, la curva contigua al acelerador de flujo, es 2 a 4 veces más estrecha que el tramo recto del canal (B) y tiene un radio de curvatura medio (R) 1 a 2 veces mayor que la anchura de la propia curva y se une al extremo del tramo recto situado a su entrada mediante una zona de transición, que es un estrechamiento de paredes planas con forma de trapecio isósceles, donde de los dos lados paralelos, el más largo corresponde a la anchura del tramo recto y el más corto a la anchura de la entrada de la curva, que presenta un incremento de la profundidad en la misma proporción en la que se estrecha su anchura con respecto al tramo recto, y una longitud tal que el ratio entre dicha longitud y la anchura del tramo recto del canal está comprendido entre 1 y 3.

De esta forma, el área de la sección transversal de la zona de transición (también llamada en la presente memoria descriptiva zona de estrechamiento) y el área de la propia curva se mantienen en todo momento constantes e iguales al área de los tramos rectos del canal, de tal forma que se consigue que la velocidad de flujo también se mantenga constante y en valores típicos comprendidos entre 0,2 y 0,4 m/s. Es decir, la configuración del canal de flujo tanto en lo relativo a la curva como a la introducción de una zona de transición entre la curva y el tramo recto significa que no habrá grandes variaciones en las diferentes secciones del mismo y como consecuencia, en las velocidades de flujo, de tal forma que no se altera la hidrodinámica del sistema. Además, al presentar planos rectos en paredes y fondo, se facilita el proceso de construcción. Este diseño permite minimizar la pérdida de carga y las zonas muertas. Además la profundidad de la curva propuesta permite una sencilla transición al sistema de agitación. Asimismo, a la salida del sistema de agitación hacia el tramo recto se incluye una segunda zona de transición como la anteriormente descrita, entre la curva y la entrada del sistema de agitación.

De acuerdo con la técnica anterior, este diseño de reactor HRAP con curva mejorada y transiciones entre tramos presenta la siguiente configuración: una primera curva, convencional; un primer tramo recto del canal; una primera zona de transición; una segunda curva, mejorada; un sistema acelerador de flujo; una segunda zona de transición; y un segundo tramo recto del canal hasta la primera curva, convencional. Esta configuración reduce la energía de agitación al utilizar al menos una curva mejorada, además del nuevo sistema acelerador de flujo. Presenta la característica fundamental de que aprovecha la profundidad que se consigue en las zonas de transición y que son requeridas por el sistema acelerador de flujo propuesto, para insertar la curva, ya que ésta tiene unas características geométricas similares en términos de profundidad y anchura al sistema acelerador de flujo. Se puede decir, por tanto, que la principal mejora de esta invención (nuevo sistema agitador), se acopla geométrica e hidráulicamente a la configuración del canal, y por tanto, la misma transición necesaria para uno de los elementos también se puede utilizar para la otra, con la consiguiente reducción en los costes de construcción.

En definitiva, para optimizar la productividad de la biomasa algal la nueva configuración de la curva mencionada anteriormente minimizó las zonas muertas con respecto a una curva convencional, y por tanto la pérdida de biomasa algal en el proceso de sedimentación de sólidos asociada.

5 De acuerdo con la presente invención, para alcanzar las ventajas pretendidas en cuanto a la mejora en la agitación del flujo de agua, el sistema de agitación que comprende el reactor está situado entre dos zonas de transición, una a su entrada y contigua a la curva y otra a su salida y contigua a uno de los tramos rectos del canal, consistiendo en un dispositivo acelerador de flujo de hélices (comercial, ampliamente utilizado en plantas de tratamiento de aguas residuales), con una producción de flujo axial a una velocidad de rotación igual o inferior a 100 rpm. El diseño de los  
10 álabes de estas hélices permite dirigir un caudal elevado en dirección axial a partir de un bajo consumo energético, obteniéndose así un rendimiento global de agitación entre un 70 % y un 80 %. La hélice se inserta en un conducto cerrado de paredes tubulares con dos extremos abiertos que permiten el paso de toda la lámina de agua por su interior, que se sitúa por debajo del nivel de la lámina de agua (es decir, que su parte o punto más elevados se encuentran a una cota inferior al nivel de agua en el canal, y que consigue evitar el efecto vórtice y también  
15 minimizar los reflujos de la impulsión a la salida de uno de los extremos del conducto a la aspiración en el extremo opuesto del conducto gracias a un diámetro interior del conducto tubular que permite pequeñas holguras con respecto a la hélice, entre 2 y 20 mm entre el extremo de las hélices y la superficie interior de la pared del conducto (o dicho de otro modo: la diferencia entre el diámetro interior del conducto tubular y el diámetro de las hélices está comprendida entre 4 y 40 mm, es decir, el doble del hueco). Este punto es clave, ya que se comprobó que si dicha  
20 holgura era mayor, se produciría una pérdida hidráulica considerable por reflujos en la sección anular.

El diseño del conducto tubular que contiene el dispositivo agitador de flujo se define por una pérdida de carga mínima, gracias a transiciones sin zonas muertas o desprendimiento de flujo en las paredes desde la salida de la curva y manteniendo el área de la sección transversal aproximadamente constante y con un valor próximo al del  
25 resto del HRAP. Con este criterio de diseño en mente, las velocidades de flujo medias en todos los elementos del HRAP (sistema de agitación, transiciones, curvas y canal recto) se mantienen aproximadamente constantes y con valores entre 0,2 y 0,4 m/s, según el valor de diseño seleccionado.

El reactor abierto HRAP, objeto de la presente invención, consiguió una reducción del consumo de energía de agitación y una optimización de la productividad de la biomasa algal. Concretamente, se logró reducir el consumo de energía de agitación entre un 80 y un 90 % con respecto a los sistemas convencionales de rueda de paletas. Asimismo, como ya se ha afirmado antes, la configuración de la curva minimiza las zonas muertas con sedimentación incontrolada y por tanto la pérdida de biomasa algal asociada. El sistema de agitación, más eficiente, genera un flujo uniforme en todo el canal, evitándose también sedimentaciones incontroladas en el fondo del HRAP,  
30 habitual en los sistemas convencionales.

En definitiva, son múltiples las ventajas derivadas de la presente invención. Concretamente, las ventajas conocidas que aporta el diseño de la curva de acuerdo con la técnica anterior a la eficiencia energética y la productividad del reactor son las siguientes:

- 40
- El diseño de curva propuesto presentó unos coeficientes de pérdida de carga entre 0,3 y 0,45, inferiores a los proporcionados por las curvas con deflectores convencionales K~2 (Lundquist, T.J., 2010). Por lo tanto se obtuvo una reducción de energía superior al 75 %. Esta reducción se debe a una hidráulica mejorada, con un ratio entre el radio de curvatura medio R y la anchura de canal B entre 1 y 2. Por otro lado, la mayor profundidad del diseño  
45 de curva, comparada con las curvas convencionales, permitió una fácil adaptación al nuevo sistema agitador o acelerador de flujo, al tener que salvar una inclinación menor con respecto al fondo del sistema acelerador de flujo, simplificándose así las transiciones hasta el acelerador de flujo.
  - Por último, se ha podido comprobar que los estrechamientos y ensanches previos a la curva tuvieron una pérdida de carga inferior a la del tramo recto del canal equivalente de la misma longitud, lo que supone un ahorro energético adicional estimado en un 6,3 % para longitudes de transición importantes, como la longitud del  
50 Ejemplo 2.

Aparte de lo anterior, se muestran algunas mejoras con respecto a la referencia Liffman, Paterson *et al.* (2013), que pueden servir de referencia, son las siguientes:

- 55
- La zona de transición entre el tramo recto del canal y la entrada de la curva se realiza con un menor coste de construcción, ya que las paredes y fondo en la presente invención son planos rectos inclinados, y no curvos, por lo que no están definidos por la función coseno propuesta en dicho artículo de Liffman, Paterson *et al.*
  - Dicha zona de transición (o estrechamiento) tiene forma de trapecio isósceles y es simétrico con respecto al eje central del canal recto principal del HRAP. Esta simetría permite centrar el nuevo sistema de agitación o de aceleración de flujo con respecto al eje del tramo recto del canal y no en su parte exterior, permitiendo una  
60 distribución uniforme del flujo por toda su anchura.

El sistema de agitación de acuerdo con la presente invención utiliza agitadores sumergibles de baja velocidad de rotación (<100 rpm). Estos agitadores o aceleradores de flujo están constituidos por motorreductores y hélices axiales de dos o tres paletas y están optimizados energéticamente para dirigir axialmente un gran flujo de agua.

Estos aceleradores de flujo han sido utilizados en instalaciones de tratamiento de aguas residuales, principalmente en carruseles o canales de oxidación de plantas de tratamiento de aguas residuales. En estos canales ovalados en forma de rectángulo circular, el agua se suele hacer circular en el canal de flujo abierto a una velocidad horizontal entre 0,2 y 0,4 m/s, similar a la velocidad de un reactor HRAP convencional para el cultivo de microalgas. Sin embargo, hay una importante diferencia que consiste en el hecho de que los carruseles o canales de oxidación de las plantas de tratamiento de aguas residuales suelen tener profundidades de lámina de agua superiores a 3 m y el presente caso está diseñado para tener profundidades de 0,2-0,4 metros (que es la profundidad empleada en los canales rectos principales de los reactores HRAP convencionales, porque es la profundidad adecuada para el crecimiento de algas en este tipo de reactores), insuficientes para el funcionamiento del equipo. Adaptar estos agitadores para funcionar con tan poca profundidad entre 0,2 y 0,4 m ha sido el principal reto tecnológico de la presente invención y su principal novedad, ya que estos equipos nunca han sido utilizados en estas condiciones de trabajo y menos aún en este tipo de reactores.

Por otra parte, de acuerdo con la presente invención tal y como se define en la reivindicación 1, el diseño optimizado del sistema de agitación consiste en insertar el dispositivo agitador en un conducto cerrado de pared tubular, abierto por sus extremos para permitir el paso axial de toda la lámina de agua por su interior, situado entre dos secciones de transición (que se pueden construir con distintos materiales, como de calderería o poliéster PRFV), uniendo la primera, la sección circular del conducto con la sección rectangular de la curva por un extremo y uniendo la segunda sección de transición, la sección circular del conducto con la sección de una segunda sección de transición del canal al otro extremo, con la misma configuración que la primera., que también está unida al tramo recto contiguo del canal. Como se ha explicado antes, el sistema acelerador de flujo se dimensiona con un área de la sección transversal del mismo orden de magnitud que el resto del recorrido del reactor HRAP (canal recto, transición y curvas). Así, el agitador funciona como un “acelerador de flujo”, con velocidades de flujo comprendidas entre 0,2 y 0,4 m/s, velocidades que se mantienen por todo el HRAP. Los aceleradores de flujo tienen a su vez las siguientes ventajas frente a los sistemas de agitación convencionales de rueda de paletas:

a) Se trata de equipos comerciales optimizados, existentes en el mercado, con una red comercial y postventa ampliamente extendida a nivel internacional con numerosos fabricantes, frente a los dispositivos de rueda de paletas que se hacen a medida para cada ocasión, sin una red comercial y postventa de los mismos, lo que encarece la inversión inicial y los costes de mantenimiento, así como la calidad del equipamiento, que es más caro.

b) Mejor rendimiento energético hidráulico y global. Los fabricantes aportan valores de rendimiento energético hidráulico superiores al 95 %, y entre el 75 % y 80 % del rendimiento energético global del sistema. En la rueda de paletas hay una dispersión de datos importante. Si estimamos una media de los valores comunicados en un 20 %, con el acelerador de flujo se obtuvo una reducción de consumo de aproximadamente un 75 %, tan solo por este concepto, sin contar las otras mejoras hidráulicas y energéticas de la invención.

Frente a los agitadores sumergibles de alta velocidad, que han sido utilizados en alguna ocasión como alternativa de mejora a la rueda de paletas, cabe resaltar que los agitadores de baja velocidad propuestos en la presente invención tienen un diámetro muy superior al de los agitadores de alta velocidad (entre 900-4.000 mm frente a 100-400 mm), para el mismo caudal, ya que trabajan a menos vueltas (< 100 rpm frente a > 700 rpm). Las ventajas de utilizar agitadores de baja velocidad (<100 rpm) de gran diámetro son las siguientes:

a) Mayor eficiencia hidráulica: Los aceleradores de corriente, de gran diámetro y bajas revoluciones (<100 rpm) son equipos mucho más eficientes energéticamente que los agitadores de alta velocidad de pequeño diámetro (>700 rpm), para un mismo caudal suministrado. Esta eficiencia energética se comprueba con un factor de potencia de estos agitadores de baja velocidad que presenta un valor entre 600 y 1.200 N/kw, que son valores 4 veces superiores a los 100-300 N/kw de los agitadores de alta velocidad. Este hecho se puede comprender con la gráfica de la Figura 4 (estado de la técnica), correspondiente a un fabricante de aceleradores comerciales (WILO-EMU), donde se comparan dos agitadores de distinto diámetro y velocidad de rotación. La figura muestra que el consumo energético del agitador de mayor diámetro (2.500 mm frente a 2.100 mm) y revoluciones más bajas (29 rpm frente a 53 rpm), es un 30 % inferior para la misma velocidad de flujo, lo que indica la mayor eficiencia energética del equipo de mayor diámetro.

b) Menor pérdida de carga. En la presente invención, el conducto cerrado donde se sitúa el acelerador de flujo se diseñó con un área de sección transversal constante y con un valor próximo al del resto del HRAP (canal recto, transiciones y curvas), de forma que la velocidad se mantiene baja y con los mismos valores entre 0,2 y 0,4 m/s. Lo anterior es posible porque los agitadores de baja velocidad pueden trabajar a estas velocidades de flujo, inferiores a 1 m/s. Además, al diseñar el conducto de esta forma, se evitaron las contracciones, expansiones y turbulencias del flujo de los agitadores sumergibles de alta velocidad, así como sus pérdidas de carga asociadas.

c) Menor estrés celular: Al trabajar a revoluciones más bajas (<100 rpm), las células algales se tratan con más suavidad, frente al estrés producido por los agitadores de alta velocidad, especialmente en algunas especies de algas flageladas o filamentosas.

d) Se evita el efecto vórtice y la cavitación, al estar insertado el dispositivo acelerador dentro de un conducto tubular cerrado (de sección circular) y no en un canal rectangular abierto. Esta última opción requiere una elevada sumergencia (lámina de agua sobre el agitador) para evitar este problema.

e) Aumento del rendimiento volumétrico (medido como el ratio entre el caudal efectivo real en el HRAP y el

caudal impulsado por la hélice) a valores superiores al 95 %, con respecto a valores del 50 % que se producen en un canal rectangular abierto. Dicho de otro modo, en el diseño propuesto en la invención, el caudal efectivo real en el HRAP presenta valores próximos a los valores impulsados por la hélice. Esto es debido a que el diseño propuesto conduce el flujo dentro de un conducto tubular o circular, con pequeñas holguras entre la hélice y el tubo (aproximadamente comprendidas entre 2 y 20 mm). En canales rectangulares abiertos, sin embargo, se producen corrientes parásitas o reflujos entre la presión mayor de impulsión y la presión menor de aspiración, a través de una amplia holgura existente entre la hélice y el canal, reduciéndose así el caudal efectivo real en el HRAP.

El efecto más importante a considerar en cuanto a la configuración del reactor presentado en este documento, constituido por el sistema de agitación diseñado, es la sinergia entre dicho sistema y la curva en el mismo reactor y sobre todo al tener la disposición contigua que se define en este documento. Así, las principales ventajas que presentan ambos elementos del reactor son el menor consumo de energía hidráulica (ver Tablas 3 y 8 más adelante), como la pérdida de carga de las curvas y la reducción del consumo de energía de agitación. Sin embargo, no debe olvidarse que la configuración de la curva y del sistema acelerador de flujo sobre todo en cuanto a su profundidad que permite mantener el área de todas las secciones constante produce efectos sinérgicos que potencian esta reducción de consumo de energía y una mayor producción de biomasa: el agitador necesita una profundidad determinada debido a su diámetro (en el Ejemplo 1 que se presenta en este documento, esta profundidad alcanza aproximadamente 900 mm, siendo el doble, 1.800 mm en el Ejemplo 2), siendo esta profundidad *a priori* bastante superior a los tramos del canal recto principal, que realmente hacen las veces de reactor y que habitualmente presenta una profundidad de 300 mm, ya que las algas precisan de poca profundidad para así poder permitir la penetración de luz en la lámina de agua donde se cultivan. El desarrollo del sistema de agitación óptimo, como se describe en este documento, requirió la reconfiguración de las demás secciones transversales, como las curvas, y se observó que la existencia de dos secciones de transición a la entrada y a la salida de dicho sistema de agitación permiten cambiar la profundidad entre secciones sin alterar la velocidad de flujo porque el área se mantiene constante, lo que se ve además potenciado por la configuración de la curva contigua. De acuerdo con la invención tal y como se define en la reivindicación 1, la primera sección de transición descrita está situada a la entrada del sistema de agitación, antes del conducto tubular y la segunda sección está situada a la salida del conducto tubular, donde el acelerador de flujo impulsa el flujo de agua.

Antes de definir la configuración final del reactor abierto, objeto de la presente invención, se realizaron simulaciones fluido-dinámicas con técnicas FCD donde se pudo comprobar comparativamente las líneas de velocidad de un dispositivo agitador en un conducto abierto, además del flujo perfectamente guiado del conducto tubular de la invención. De esta forma, el caudal efectivo real o neto en el HRAP pasa de un 50 % del caudal impulsado por la hélice en el canal abierto a un valor superior al 95 % en la invención (Figura 5).

#### Descripción detallada de la invención

Las realizaciones preferentes del reactor de laguna algal de alta tasa están definidas en las reivindicaciones dependientes 2 a 13 así como en la descripción, la anchura de los dos tramos rectos (B1) está comprendida entre 0,5 y 25 m, y la profundidad de la lámina de agua está comprendida entre 0,2 y 0,6 m. Esto es importante en la medida en que su sección se mantiene constante a lo largo de todo el recorrido, como se exige para la presente invención.

En un caso preferente de la invención, el reactor solo contiene un sistema de agitación, pero las dos curvas del reactor abierto HRPA presentan la configuración definida anteriormente y se unen ambas en sus dos extremos a los tramos rectos mediante dos zonas de transición, de tal forma que el reactor comprende cuatro zonas de transición, dos por cada curva. Esta realización es la que se muestra en la Figura 6 (vista en planta) y se define en la reivindicación 3. En este caso, la configuración del canal es la siguiente: primera curva mejorada; primera zona de transición; primer tramo recto; segunda zona de transición; segunda curva mejorada; sistema acelerador de flujo; tercera zona de transición; segundo tramo recto del canal; cuarta zona de transición hasta la primera curva mejorada. En este caso se cuenta con las ventajas derivadas de la nueva configuración de la curva contigua al sistema de agitación, más las mejoras hidráulicas derivadas de la sustitución de la otra curva convencional por la curva mejorada según las enseñanzas de la técnica anterior.

También de manera preferente al menos una de las curvas, aunque también pueden ser las dos, comprende un deflector, con el mismo radio de curvatura que la propia curva, que permite mejorar las condiciones laminares del flujo. Estas condiciones son importantes de cara a minimizar las pérdidas de carga y al correcto funcionamiento del sistema acelerador de flujo.

En otro caso más preferente aún, como se define en la reivindicación 4, el reactor HRAP no solo presenta dos curvas de configuración mejorada, de acuerdo con las enseñanzas de la técnica anterior, sino también dos sistemas de aceleración de flujo como el descrito anteriormente, uno a la salida de cada una de las dos curvas del canal. Así, en el caso en que la longitud del reactor lo requiera (determinada por la longitud de sus tramos rectos), se pueden instalar dos sistemas aceleradores de flujo, uno junto a cada curva, que además presentan la nueva configuración definida en la presente invención.

- El sistema de agitación (ilustrado en las Figuras 6 y 7) contiene un tubo circular donde se aloja concéntricamente el acelerador de flujo. Preferentemente, la longitud del tubo o conducto de pared circular es suficiente para normalizar el flujo horizontal (axial) antes y después del acelerador de flujo y para facilitar las labores de mantenimiento del mismo. Más preferentemente todavía, dicha longitud está comprendida entre 1 m y 5 m, suficiente para normalizar el
- 5 flujo horizontal (axial). Esta longitud permite la colocación de bocas de acceso para poder acceder al conducto. El tubo circular presenta un diámetro D1 que se ajusta al diámetro del agitador que se aloja en su interior, preferentemente con una holgura de 10 mm, entendida como la distancia entre el extremo de la paleta/hélice del dispositivo acelerador y la pared interior del conducto circular.
- 10 El conducto circular debe estar totalmente lleno de agua, sin bolsas de aire, por lo que la parte superior de dicho conducto (que debe entenderse como el punto más elevado de la pared externa del conducto tubular) siempre se sitúa a una cota (H4) por debajo del nivel inferior de la lámina de agua en el canal (por nivel inferior debe entenderse la mayor profundidad de la lámina en el canal, que en este punto corresponde a la profundidad de 0 m a la entrada del sistema de agitación). Dicha cota puede estar preferentemente, pero sin limitarse a ello, comprendida entre 100 y
- 15 400 mm por debajo del nivel de la lámina de agua.
- El dispositivo acelerador de flujo es un agitador convencional como el que ofrecen varios fabricantes, de diámetro de hélices/paletas variable, que puede ser por ejemplo en el presente caso, pero sin limitarse a ello, de 900 mm, como en el Ejemplo 1, o más preferentemente de 1,8 m, como se ilustra en el Ejemplo 2. También preferentemente, la
- 20 velocidad de rotación está comprendida entre 30 y 80 rpm. Un análisis CFD, como los realizados para el diseño de la invención, permitió calcular las pérdidas de carga en todo el reactor HRAP a fin de seleccionar la potencia requerida para el agitador.
- De forma opcional, pero que mejora significativamente el rendimiento de todo el reactor, el sistema de agitación puede comprender además a su entrada un pozo de sedimentación (de sólidos), que evita la acumulación de sólidos a lo largo de todo el reactor, pero además es muy conveniente en cultivos con presencia de arenas y otros sólidos sedimentables a las velocidades comunes del reactor (entre 0,2 y 0,4 m/s). Es conveniente situar el pozo de sedimentación justo antes del conducto acelerador para evitar la entrada de sólidos en el mismo y la acumulación de dichos sólidos en la cota más baja, donde se sitúa la hélice, lo que podría provocar problemas de funcionamiento.
- 25 De esta forma, se evitan sedimentaciones incontroladas en el fondo del canal del HRAP, un problema habitual en los sistemas convencionales, gracias al diseño del pozo de sedimentación de sólidos sedimentables que puede situarse a la entrada del sistema de agitación o acelerador de flujo. Este pozo de sedimentación de sólidos sedimentables que se puede situar a la salida de la curva y a la entrada del sistema de agitación o de acelerador de flujo evita la acumulación de los mismos en el HRAP mediante una sedimentación controlada de sólidos y su extracción,
- 30 manteniendo así un cultivo más estable en el tiempo.
- El pozo de sedimentación del sistema de agitación está situado entre la curva contigua a la que está unida dicho sistema (es decir, a su entrada) y la entrada del conducto tubular situado en el interior del propio sistema de agitación. Preferentemente, esta zona de sedimentación controlada de sólidos (denominada L4 en las Figuras) tiene una planta rectangular en la parte superior con una longitud L4 (por ejemplo, entre 0,5 y 1 m) y una anchura B2 (igual a la de la curva), y fondo plano horizontal de sección rectangular con una longitud L4 (igual a la zona superior) y una anchura B3 (por ejemplo, entre 0,4 y 0,6 m) en la parte inferior que coincide con la parte inferior del conducto tubular, estando ambas secciones unidas por planos inclinados para facilitar el desplazamiento descendente de los sólidos. En el fondo plano y horizontal se puede colocar preferentemente una bomba sumergible para la extracción
- 35 de sólidos sedimentados. El fondo plano horizontal se hace coincidir con el nivel mínimo del conducto tubular (denominado en las Figuras Z6), para facilitar la construcción y apoyo de todo el sistema durante la instalación de la misma durante la obra.
- A continuación del pozo de sedimentación de sólidos descrito anteriormente, está situada la primera sección de transición del sistema de agitación descrito anteriormente, concretamente entre dicha zona de sedimentación y la entrada del conducto circular en el que se sitúa el acelerador de flujo. En la realización preferente, la primera sección de transición consiste en un conducto cerrado (preferentemente constituido por una tolva) para la transición entre un rectángulo de altura H2 y anchura B2 que corresponde a la sección de la curva y un círculo de diámetro D1 que
- 40 corresponde a la sección del conducto tubular, formada por 4 triángulos y cuatro tramos curvos. Esta primera sección de transición presenta pendientes de bajada comprendidas entre 1:4 y 1:6, y de nuevo mantiene constante la sección transversal del canal de flujo. Para ello, el diámetro D1 del círculo se calcula inicialmente de forma que su área circular sea la misma que la sección transversal en las curvas y ajustándolo en función de los aceleradores de corriente comerciales disponibles en base a ese valor, y teniendo en cuenta la holgura que debe presentar la superficie interior del conducto tubular con respecto al extremo de las hélices/paletas del dispositivo acelerador.
- 45 50 55 60
- Por otra parte, en esta realización preferente, la segunda sección de transición, situada entre la salida del conducto tubular (central) y la zona de transición contigua situada a la salida del sistema de agitación hacia el tramo recto contiguo es igual a la primera.
- 65 También preferentemente, con o sin pozo de sedimentación, el sistema de agitación puede comprender también un sistema de carbonatación. En las Figuras 7 y 8 dicho sistema de agitación, que tiene una longitud L2, incluye el

sistema de carbonatación. Este sistema de carbonatación, denominado L8 en las figuras 7 y 8, se aloja dentro del sistema de agitación, concretamente entre la salida del conducto tubular que aloja el dispositivo agitador y la zona de transición que se encuentra a la salida del sistema de agitación y que lo conecta con el tramo recto contiguo. Dicho sistema de carbonatación es, en la realización más preferente, un sistema como el descrito en la solicitud de patente de invención española P201231485 (HIDROTEC TECNOLOGÍA DEL AGUA, S.A.), que elimina los deflectores verticales convencionales y por tanto el elevado consumo energético asociado al deflector vertical, que es la principal pérdida de carga en un reactor HRAP convencional (K~4). La configuración de este sistema de carbonatación se caracteriza fundamentalmente porque tiene un pozo con una anchura equivalente a la anchura del canal de flujo y una longitud comprendida entre la mitad y el doble de la anchura del canal, y por que comprende al menos un dispositivo inyector de gas dentro del foso, situado en la base del mismo y junto a la pared contraria a la dirección de entrada de flujo de agua, con una distancia desde la cara superior del dispositivo por la que se inyecta el gas hasta el fondo del canal de flujo comprendida entre 0,5 y 1,5 m, ambos límites incluidos. Debe tenerse en cuenta que aunque el sistema de carbonatación esté diseñado según los criterios reflejados en la solicitud de patente española P201231485, al tratarse de un canal más estrecho que el tramo recto del canal del HRAP (en el Ejemplo 2, son 3 m en vez de 9 m), se debe mantener el área de la sección horizontal del foso de carbonatación, alargando la longitud del mismo proporcionalmente, pasando por tanto de 60 cm a 180 cm.

Debe indicarse que la sección del canal se mantiene constante a lo largo de todas sus secciones para que el agua no sufra aceleraciones o desaceleraciones que aumenten el consumo energético, a excepción del pozo de sedimentación de sólidos y del sistema de carbonatación contenidos en el sistema de agitación. Estos elementos tienen una mayor área trasversal que el resto para posibilitar ambos procesos, sedimentación y carbonatación.

En el caso más preferente de todos, el reactor HRAP se compone de los siguientes elementos, de acuerdo con el ejemplo mostrado en las Figuras 6, 7 y 8:

a) dos tramos rectos de canal (3, 3'), de anchura B1 (2'), comprendida entre 0,5 y 25 m y con profundidad de lámina de agua H1 entre 0,2 y 0,6 m. La sección transversal del tramo recto, que se mantiene constante en las demás secciones para tener un flujo constante, se define como  $S = B1 \times H1$ . En el canal del Ejemplo 2,  $B = 9$  m y  $H1 = 0,3$  m, el área de la sección transversal sería  $S = 9 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} = 2,7 \text{ m}^2$ ;

b) dos curvas (4, 4') a los extremos de los tramos rectos del canal (3, 3'), de radio de curvatura medio R y anchura de canal B2. El ratio  $R/B2$  está entre 1 y 2. La sección transversal de las curvas (4, 4') también se mantiene constante. En el Ejemplo 2 la sección transversal sería equivalente a  $S = B2 \times H2 = 3 \text{ m} \times 0,9 \text{ m} = 2,7 \text{ m}^2$ , igual por tanto a la sección de los dos tramos rectos (3, 3'). En un caso preferente, las curvas (4, 4') con  $R/B2 < 1,5$  contarán con un deflector de radio R;

c) cuatro zonas de transición o estrechamientos (1'), de forma trapezoidal isósceles, entre el tramo recto del canal (3, 3') con anchura B1 y la curva (4, 4') de anchura B2, en longitudes L1e (zona de ensanchamiento o salida del flujo de agua de la curva) y L1c (zona de contracción o entrada del flujo de agua de la curva). Este estrechamiento (1') mantiene una sección transversal S constante, como la sección transversal del tramo recto (3, 3'), disminuyendo de este modo la anchura en la misma proporción que aumenta la profundidad H, a lo largo de la longitud L de los estrechamientos (1'). El ratio  $B1/B2$  presenta unos valores entre 2 y 4. Por tanto, la profundidad H se incrementa al mismo valor a lo largo de la longitud L1. En el Ejemplo 2, para un tramo recto de canal (3, 3') de anchura  $B1 = 9$  m y para una curva (4, 4') de anchura  $B2 = 3$  m ( $B1/B2 = 3$ ), la profundidad de lámina de agua pasará de  $H1 = 0,3$  m en el canal principal (3, 3'), hasta  $H2 = 0,3 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 0,9$  m en la curva (4, 4').

La longitud L1 de la zona de transición (1') se calcula con respecto a la anchura del tramo recto del canal (3, 3') de anchura B1, de tal modo que el ratio  $L1/B1$  oscila entre 1 y 3. Estas transiciones (1') tienen menor pérdida de carga que el canal recto (3, 3') equivalente, por lo que, en el Ejemplo 2 se ha optado por un ratio próximo al valor superior, siendo  $L1 = 24$  m y  $L1/B1 = 2,66$ .

d) un sistema de agitación (5), con un acelerador de flujo (16) situado en el interior de un conducto tubular (14) con dos extremos abiertos para el paso del flujo de agua, que se encuentra en la parte central del sistema de agitación (5) de longitud L2, que incluye un pozo de sedimentación (12) o eliminación de sólidos sedimentados y preferentemente también un sistema de carbonatación (6). El sistema de agitación (5) o acelerador de flujo de la Figura 8 muestra las distintas zonas que presenta de forma más detallada, con objeto de ilustrar la invención en una de sus realizaciones. Sin embargo, no debe considerarse una realización limitante de la misma:

- Una zona o pozo de sedimentación controlada de sólidos (12), de longitud L4 (entre 0,5 y 1 m) y una anchura B2 en la parte superior y fondo plano horizontal de anchura B3 (de 40 a 60 cm) en la parte inferior, unidas ambas por planos inclinados para facilitar el desplazamiento descendente de los sólidos. En el fondo plano horizontal se puede colocar una bomba sumergible para la extracción de los sólidos sedimentados. El fondo plano horizontal coincide con el nivel mínimo del conducto tubular, para facilitar la construcción y soporte de todo el sistema durante la instalación del mismo durante las obras.
- Una sección de transición (13) entre la zona de sedimentación (12) y el conducto circular (14) donde está situado el acelerador de flujo (15). Se trata de un conducto cerrado constituido por la típica tolva fabricada con técnicas de calderería para la transición entre un rectángulo ( $H2 \times B2$ ) y un círculo (diámetro D1), formada por 4 triángulos y cuatro tramos curvos. De nuevo, esta zona mantiene su sección transversal sustancialmente constante. Para ello el diámetro D1 se calcula inicialmente de forma que su área circular sea

la misma que la sección transversal en las curvas. En el Ejemplo 2:

$$S = H2 \times B2 = 3 \text{ m} \times 0,9 \text{ m} = 2,7 \text{ m}^2$$

5 El diámetro D1 obtenido tal y como se provisto, sería  $\sqrt{5 \times \frac{4}{\pi}} = 1,85 \text{ m}$ . De todas formas este diámetro debe ajustarse en función de los aceleradores de corriente comerciales disponibles, próximos a ese valor. Para el Ejemplo 2, se seleccionó un agitador comercial con un diámetro = 1,8 m y el valor de D1 (sección circular del conducto) es = 1,82 m, con una holgura de 10 mm entre el extremo de la hélice y el conducto. La longitud L5 se calcula con

- 10
- Un conducto tubular (14), que es un tubo circular de diámetro D1 donde se sitúa concéntricamente el acelerador de flujo (15), preferentemente, con una holgura comprendida entre 2 y 20 mm entre el extremo de la paleta/hélice del dispositivo agitador y la pared interior del conducto circular. La longitud L6 tiene un valor entre 1 m y 5 m, suficiente para normalizar el flujo horizontal antes y después del acelerador de flujo (15) y por motivos de
  - 15 mantenimiento. Para ello se pueden colocar bocas de acceso (17) que permitan acceder al conducto (14). El conducto circular está totalmente lleno de agua, sin bolsas de aire.
  - una segunda sección de transición (15), entre la salida del conducto tubular (14) y el sistema de carbonatación (6). Consiste en una tolva similar a la primera sección de transición (13) de longitud L5; y
  - 20 - un sistema de carbonatación (6). Este sistema está diseñado según los criterios reflejados en la solicitud de patente P201231485. Sin embargo, aunque se trata de un canal que es más estrecho que el tramo recto del canal principal del HRAP (en el Ejemplo 2 son 3 m en vez de 9 m), se mantiene el área de la sección horizontal del foso de carbonatación (6), alargando la longitud del mismo proporcionalmente, pasando por tanto de 60 cm a 180 cm.

## 25 Breve descripción de las Figuras

Figura 1 (Estado de la técnica). Diseño convencional de una instalación HRAP de cultivo de algas que incluye los principales elementos de consumo de energía (estado de la técnica):

- 30
1. Longitud total de la instalación HRAP.
  2. Anchura total de la instalación HRAP.
  3. Primer tramo recto principal.
  - 3' Segundo tramo recto principal.
  4. Primera curva (con deflectores).
  - 35 4'. Segunda curva (con deflectores).
  5. Sistema de agitación (rueda de paletas).
  6. Sistemas de carbonatación (uno en cada tramo recto).

40 Figura 2 (Estado de la técnica). Diseño de instalación HRAP propuesto por Liffman (2013) con curvas en forma de gota:

- 1'. Longitud de la salida de la curva.
- 2'. Anchura del tramo de canal recto de la instalación HRPA.
5. Sistema de agitación (rueda de paletas).
- 45 7. Flujo de agua de cultivo.
8. Estrechamiento del canal de flujo a la salida de la curva definido por la función  $\cos(X)$ .

Figura 3 (Estado de la técnica). Vista en sección transversal de un sistema de agitación por rueda de paletas.

- 50
5. Sistema de agitación por rueda de paletas.
  9. Dirección de giro del sistema de agitación por rueda de paletas.
  10. Lámina de agua.

55 Figura 4. Relación entre la velocidad de flujo en m/s (eje de abscisas) y la potencia consumida en kw (eje de ordenadas) de dos agitadores comerciales (gama WILO-EMU) comparados. La variable  $\Delta P_c$  representa el incremento (o diferencia) de potencia consumida entre agitadores. La línea de color claro representa un modelo de agitador comercial TR221, de diámetro de 2.100 mm, mientras que la línea de color oscuro representa un modelo de agitador comercial TR225 de diámetro 2.500 mm.

60 Figura 5. Trazas y perfil de velocidades (representadas por la gradación de grises, donde disminuye la velocidad cuanto más oscuro es el color) de una simulación fluido-dinámica comparativa realizada entre un dispositivo agitador situado en canal abierto rectangular (imagen de la izquierda) y un dispositivo de agitación situado en un conducto tubular cerrado de la presente invención (imagen de la derecha).

Figura 6. Vista en planta de una realización preferente del reactor abierto para el cultivo de algas objeto de la presente invención, donde las dos curvas presentan la misma configuración definida y en los dos extremos de

cada curva se incluye una zona de transición hacia la región recta. En una de las curvas, tal como se define en la invención, se incluye el nuevo sistema de agitación entre la salida de la curva y la zona de transición.

1. Instalación HRAP o de carrusel, de longitud total L3.
- 5 1'. Zona de transición entre el extremo de la curva 4 y 4' y el tramo recto contiguo del canal 3 y 3', de longitud L1c en la zonas de transición de estrechamiento del canal de flujo, y L1e en las zonas de transición de ensanchamiento del canal de flujo.
2. Anchura total de la curva.
3. Primer tramo recto principal, de anchura 2' (B1).
- 10 3'. Segundo tramo recto principal, de anchura 2' (B1).
4. Primera curva, de anchura B2 y radio de curvatura R.
- 4'. Segunda curva, de anchura B2 y radio de curvatura R.
5. Sistema de agitación con acelerador de flujo, de longitud L2.
6. Sistemas de carbonatación incluidos a la salida del sistema de agitación 5.
- 15 7. Flujo de agua de cultivo.

Figura 7. Vista en alzado del sistema de agitación o aceleración de corriente (5) comprendido en el reactor de uno de los casos preferentes de la presente invención, que presenta una zona de sedimentación de sólidos y un sistema de carbonatación

- 20 6. Sistema de carbonatación.
11. Entrada del flujo de agua desde la curva contigua al sistema de agitación, de altura H2.
12. Zona o pozo de sedimentación controlada de sólidos, de longitud L4.
- 25 13. Primera sección de transición, entre la zona de sedimentación 12 y el conducto tubular 14 donde se aloja el acelerador de flujo 15, de longitud L5.
14. Conducto tubular, de longitud L6, donde se aloja el acelerador de flujo 16.
15. Segunda sección de transición, entre la salida del conducto tubular 14 donde se aloja el acelerador de flujo 16 y el sistema de carbonatación 6, de longitud L7.
- 30 16. Agitador o acelerador de corriente.
17. Boca de acceso, para acceder al conducto tubular 14.
18. Inyector/es de gas de carbonatación.

Figura 8. Vista en planta del sistema de agitación o aceleración de flujo comprendido en el reactor de la presente invención y mostrado en la Figura 7, que presenta una zona de sedimentación de sólidos y un sistema de carbonatación.

- 35 6. Sistema de carbonatación.
11. Entrada del flujo de agua desde la curva 4 contigua al sistema de agitación 5, de anchura B2.
- 40 11'. Salida del flujo de agua desde el sistema de agitación 5 a la zona de transición 1', de anchura B2.
12. Zona o pozo de sedimentación controlada de sólidos, de fondo plano horizontal de anchura B3 (12').
13. Primera sección de transición, entre la zona de sedimentación 12 y el conducto tubular 14 en el que se aloja el acelerador de flujo 15.
- 45 14. Conducto tubular, de anchura D1, en el que se aloja el acelerador de flujo 15.
15. Agitador o acelerador de flujo.
16. Segunda sección de transición, entre la salida del conducto tubular 14 donde se aloja el acelerador de flujo 15 y el sistema de carbonatación 6.
17. Boca de acceso, para acceder al conducto tubular 14.
18. Inyector/es de gas de carbonatación.

Figura 9. Pérdidas de carga del reactor HRAP objeto de la invención, correspondientes al Ejemplo 1. Las líneas rectas clara y oscura representan la presión estática a lo largo de los dos tramos rectos principales, siendo  $\Delta h_{\text{canal recto}}$  la pérdida de carga a lo largo del tramo recto y calculada como la diferencia entre los puntos extremos.  $\Delta h_{\text{expansión}}$  representa la pérdida de carga en una de las transiciones unidas a un tramo recto.

Figura 10. Pérdidas de carga del reactor HRAP objeto de la invención, correspondientes al Ejemplo 2. Las líneas rectas clara y oscura representan la presión estática a lo largo de los dos tramos rectos principales del canal de flujo, siendo  $\Delta h_{\text{canal recto}}$  la pérdida de carga a lo largo del tramo recto y calculada como la diferencia entre los puntos extremos.  $\Delta h_{\text{expansión}}$  representa la pérdida de carga en una de las transiciones unidas a un tramo recto.

Figura 11. Vista del sistema de agitación desde el exterior del canal de flujo, constituido por el conducto tubular situado entre dos tolvas fabricadas con técnicas de calderería que constituyen las dos secciones de transición.

Figura 12. Vista frontal del interior del sistema de agitación, que muestran el dispositivo acelerador de flujo dentro del conducto tubular desde la segunda sección de transición.

Figura 13. Vista frontal del sistema de agitación desde la zona de transición entre la salida del mismo y el primer tramo recto principal. Puede apreciarse la forma de trapecio isósceles de la zona de transición y cómo disminuye la profundidad a medida que se incrementa la anchura del canal desde la salida del sistema de agitación hasta el tramo recto contiguo.

**Ejemplos**

**Ejemplo 1. Diseño y configuración de un reactor de acuerdo con la presente invención. Medida de rendimientos y productividad.**

5 Se realizó la simulación fluido-dinámica mediante técnicas CFD en 3D con el programa *ANSY fluent* de un HRAP piloto de 500 m2 según el diseño de la invención, hasta la optimización de los parámetros y posteriormente se realizó un piloto a escala real, para la validación de los resultados.

10 Los parámetros resultantes tras la optimización, según la configuración del reactor mostrado en las Figuras 6, 7 y 8, son los siguientes:

- 15 H1 = 0,3 m (altura/profundidad de la lámina en el tramo recto del canal B1)
- B1 = 3 m (anchura del tramo recto del canal)
- B2 = 1,5 m (anchura de la curva)
- H2 = 0,6 m
- R = 1,5 m (radio de curvatura de la curva)
- L2 = 11 m (longitud del sistema de agitación)
- L1 = 6 m (longitud de la zona de transición entre la curva y el tramo recto)
- 20 L3 = 85,5 m (longitud total del reactor)
- L4 = 0,5 (longitud de la zona de sedimentación dentro del sistema de agitación)
- L5 = 3 m (longitud de la sección de transición entre la zona de sedimentación y el conducto tubular que aloja el acelerador de flujo)
- L6 = 3,5 m (longitud del conducto tubular)
- 25 L7 = 3 (longitud de la segunda sección de transición entre el conducto tubular y el sistema de carbonatación)
- L8 = 1 m (longitud del sistema de carbonatación)
- D1 = 920 mm (diámetro del conducto tubular)
- D = 900 mm (diámetro total del acelerador de flujo)
- H3 = 100 mm

30 El agitador elegido fue un modelo SB900 de la marca ABS, de 900 mm de diámetro y baja velocidad de salida (79 rpm), pero con un elevado rendimiento global del 78 %, según datos aportados por el fabricante.

Otros parámetros de diseño son los recogidos en la Tabla 1.

**Tabla 1. Parámetros de diseño del reactor de laguna agitada de 500 m<sup>2</sup>**

DATOS DE PARTIDA	Diseño de la invención	Convencional
Velocidad (m/s)	0,25	0,25
Densidad (kg/m3)	998,4	998,4
L <sub>contracciones y expan</sub> L1 (m)	6	
Rugosidad (mm)	0,003	0,003
Área (m2)	500	500

40 Basándose en los parámetros de diseño anteriores, la simulación fluido-dinámica permite obtener las pérdidas de carga h a lo largo del sistema como se presenta en la Figura 9. Basándose en las pérdidas de carga h calculadas con la simulación matemática, es posible obtener los coeficientes de pérdida localizada K, según la siguiente fórmula:

$$h = K \times \frac{v^2}{2g}$$

45 Estos valores se presentan en la Tabla 2, que se completó con los valores de los coeficientes de pérdida bibliográficos que se han referenciado más arriba para el sistema convencional. A efectos de comparación se calcularon los valores de pérdida de carga del canal recto equivalente de longitud L1 = 6 m, que dio como resultado un valor K<sub>zona de contracción</sub> = K<sub>zona de expansión</sub> = 0,160. Este valor es 25 % mayor que el valor K medio de expansiones y contracciones del nuevo diseño, debido al mayor radio hidráulico. Esto supone una mejora hidráulica adicional en el sistema propuesto.

**Tabla 2. Coeficientes de pérdida de carga**

Coeficientes pérdida	Diseño de la invención	Convencional
K <sub>curvas</sub>	0,44	2
K <sub>zona de expansión (L = 6 m)</sub>	0,18	0,160
K <sub>zona de contracción (L = 6 m)</sub>	0,08	0,160
K <sub>pozo carbonatación</sub>		4

Con los valores de K anteriores es posible estimar las mejoras hidráulicas representadas por la nueva configuración del reactor, estimadas como la reducción de la pérdida de carga en todo el reactor. Las pérdidas de carga para el sistema convencional se calcularon aplicando la ecuación de Darcy previo cálculo del factor de fricción por medio de la ecuación de Colebrook-White, resuelta usando el método de Newton hasta una tolerancia de 1e-16. Fue posible comprobar que este sistema, da los mismos valores que los de la simulación fluido-dinámica. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3. Pérdidas de carga y mejoras hidráulicas del nuevo diseño**

Laguna 500 m <sup>2</sup>	H <sub>rectas+accesorios</sub> (m)	H <sub>curvas</sub> (m)	H <sub>total</sub> (m)
Diseño convencional	0,026650	0,012750	0,039400
Diseño propuesto	0,013500	0,002810	0,016310
MEJORAS HIDRÁULICAS			59 %

Según la Tabla 3 y, dado que el consumo energético P (w) es proporcional a la pérdida de carga h (m) según la fórmula,

$$P = \frac{\rho \times Q \times g \times h}{\eta}$$

se dedujo que el nuevo diseño suponía una reducción de consumo de energía debido a las mejoras hidráulicas del 59 %.

Sin embargo, la presente invención también supone una reducción de energía debido al sistema de agitación. El consumo de energía P en todo el HRAP es inversamente proporcional al rendimiento η del equipo de agitación. El rendimiento energético global del agitador seleccionado es del 78 %, según el fabricante. Por otro lado el rendimiento volumétrico del agitador, medido como el ratio entre el caudal efectivo real (m<sup>3</sup>/s) en el HRAP y el caudal impulsado por la hélice, se ha obtenido de la simulación fluido-dinámica, y es equivalente a 0,225/0,230 = 0,976.

Este elevado rendimiento volumétrico se obtuvo mediante un proceso de optimización de la geometría del sistema acelerador de flujo, hasta minimizar las corrientes de reflujo parásitas, obteniéndose finalmente una holgura de solo 10 cm alrededor de la hélice. Dicho de otro modo, en el diseño propuesto, el caudal efectivo real en el HRAP presentó unos valores del 97,6 % del caudal impulsado por la hélice, con una pérdida hidráulica de solo el 2,4 %. Esto es debido al hecho de que el diseño propuesto conduce el flujo hacia el interior de un conducto circular, con pequeños huecos entre la hélice y el tubo (10 mm). De esta forma el rendimiento total del sistema acelerador de flujo es el siguiente:

$$\text{Rendimiento total del sistema acelerador de flujo} = \text{Rendimiento global del agitador} \times \text{rendimiento volumétrico} = 0,78 \times 0,976 = 0,75$$

Los valores de la rueda de paletas se han obtenido como una media de los valores bibliográficos referenciados anteriormente.

**Tabla 4. Rendimientos de agitación**

RENDIMIENTOS DE AGITACIÓN	Diseño de la invención	Rueda de paletas
Rendimiento hidráulico+mecánico	0,78	0,235
Rendimiento volumétrico	0,976	0,85
Rendimiento global	0,75	0,2

Con estos rendimientos y las pérdidas de carga h de la Tabla 3, se pudo calcular la potencia consumida en ambos sistemas

**Tabla 5. Potencia consumida en ambos sistemas**

Laguna 500 m <sup>2</sup>	Potencia (W)	Potencia (w/m <sup>2</sup> )
Diseño convencional	434,13	0,868265
Diseño propuesto	47,95	0,095902
AHORRO TOTAL DE ENERGIA	89 %	89 %

En la Tabla 5 se puede observar como el ahorro en energía consumida con el diseño propuesto fue del 89 % con respecto al sistema convencional. En este ahorro se tiene en cuenta la mejora del diseño hidráulico (Tabla 3) y la mejora del equipo de agitación.

**Ejemplo 2:** Aplicación del reactor HRAP objeto de la presente invención y descrito en el Ejemplo 1 en una planta de tratamiento de aguas residuales con reactores HRAP de 4.500 m<sup>2</sup>

En el presente ejemplo propuesto se plantea la ventaja energética que supone la presente invención al aplicarse en una planta de tratamiento de aguas residuales realizada con HRAP frente al sistema convencional con fangos activos. La planta de tratamiento del presente ejemplo se diseñó con reactores de tipo HRAP con una unidad de área de 4.500 m<sup>2</sup>, que es un tamaño habitual para grandes instalaciones.

5 Se realizó la simulación fluido-dinámica mediante técnicas CFD con el programa ANSY fluent de un HRAP de 4.500 m<sup>2</sup>, según el diseño de la invención, hasta la optimización de los parámetros. Los parámetros constructivos finalmente resultaron ser los siguientes:

- 10 H1 = 0,3 m
- B1 = 9 m
- B2 = 3 m
- H2 = 0,9 m
- R = 4,5 m
- 15 L2 = 16,4 m
- L1 = 24 m
- L3 = 193+24x2+6x2 = 253 m
- L4 = 0,6
- L5 = 5 m
- 20 L6 = 4 m
- L7 = 5 m
- L8 = 1,8 m
- H3 = 100 mm
- D = 1.800 mm
- 25 D1 = 1.820 mm

El agitador seleccionado es un agitador de un diámetro de 1.800 mm, de la marca ABS, modelo SB 1800, de baja velocidad de salida (38 rpm) y elevado rendimiento global = 0,8, según datos del fabricante.

30 Otros parámetros de diseño son los recogidos en la Tabla 6.

**Tabla 6. Parámetros de diseño reactor HRAP de 4.500 m<sup>2</sup>**

DATOS DE PARTIDA	Nuevo diseño	Convencional
Velocidad (m/s)	0,256	0,256
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	998,4	998,4
L <sub>contracciones y expan</sub> L1 (m)	24	
Rugosidad (mm)	0,003	0,003
Área (m <sup>2</sup> )	4.500	4.500

35 Basándose en los parámetros de diseño anteriores, la simulación fluido-dinámica permite obtener las pérdidas de carga h a lo largo del sistema como se presenta en la Figura 10. Basándose en las pérdidas de carga h calculadas con la simulación matemática es posible obtener el coeficiente de pérdida localizada K. según la siguiente fórmula:

$$h = K \times \frac{v^2}{2g}$$

40 Estos valores se presentan en la Tabla 2, que se ha completado con los valores de los coeficientes de pérdida bibliográficos referenciados anteriormente para el sistema convencional. A efectos de comparación se calcularon los valores de pérdida de carga del canal recto equivalente de longitud L1 = 24 m, resultando un valor K<sub>zona de contracción</sub> = K<sub>zona de expansión</sub> = 0,552. Este valor es superior en un 55 % al valor K medio de las expansiones y contracciones del nuevo diseño, debido al mayor radio hidráulico. Esto supone una mejora hidráulica adicional en el sistema propuesto.

45

**Tabla 7. Coeficientes de pérdida de carga**

Coefficientes pérdida	Nuevo diseño	Convencional
K <sub>curvas</sub>	0,31	2
K <sub>zona de expansión</sub> (L = 24 m)	0,28	0,552
K <sub>zona de contracción</sub> (L = 24 m)	0,21	0,552
K <sub>pozo carbonatación</sub>		4

50 Basándose en los valores de K anteriores es posible estimar las mejoras hidráulicas que supone la nueva configuración del reactor, estimadas como la reducción de la pérdida de carga en todo el reactor. Las pérdidas de carga para el sistema convencional se calcularon aplicando la ecuación de Darcy previo cálculo del factor de fricción por medio de la ecuación de Colebrook-White resuelta usando el método de Newton hasta una tolerancia de 1e-16.

Se ha comprobado que este sistema, da los mismos valores que la simulación fluido- dinámica. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8. Pérdidas de carga y mejoras hidráulicas del diseño de la invención**

Laguna 4.500 m <sup>2</sup>	H <sub>rectas+accesorios</sub> (m)	h <sub>curvas</sub> (m)	h <sub>total</sub> (m)
Diseño convencional	0,050390	0,013370	0,063760
Diseño de la invención	0,032930	0,002080	0,035010
<b>MEJORAS HIDRÁULICAS</b>			<b>45 %</b>

5 Según la Tabla 8 y, dado que el consumo energético P (w) es proporcional a la pérdida de carga h (m), según la fórmula

$$P = \frac{\rho \times Q \times g \times h}{\eta}$$

10 se pudo deducir que el nuevo diseño suponía una reducción de consumo de energía debido a las mejoras hidráulicas del 45 %.

Sin embargo, la presente invención también supone una reducción de energía debido al sistema de agitación. El consumo de energía P en todo el HRAP es inversamente proporcional al rendimiento  $\eta$  del equipo de agitación.

15 El rendimiento energético global del agitador seleccionado es del 80 %, según datos del fabricante. Por otro lado, el rendimiento volumétrico del agitador, medido como el ratio entre el caudal efectivo real (m<sup>3</sup>/s) en el HRAP y el caudal impulsado por la hélice, se obtuvo de la simulación fluido-dinámica y es equivalente a 0,691/0,743 = 0,93.

20 Este elevado rendimiento volumétrico se consiguió por un proceso de optimización de la geometría del sistema acelerador de flujo, hasta minimizar las corrientes de reflujo parásitas, obteniéndose finalmente un hueco de tan solo 10 cm alrededor de la hélice. Dicho de otro modo, en el diseño propuesto, el caudal efectivo real en el HRAP presentó unos valores del 93 % del caudal impulsado por la hélice, con una pérdida hidráulica de tan solo el 7 %. Esto es debido a que el diseño propuesto conduce el flujo hacia el interior de un conducto circular, con pequeños huecos entre la hélice y el tubo (10 mm). De esta forma el rendimiento total del sistema acelerador de flujo es el siguiente:

$$\text{Rendimiento total del sistema acelerador de flujo} = \text{Rendimiento global del agitador} \times \text{rendimiento volumétrico} = 0,8 \times 0,93 = 0,74$$

30 Los valores de la rueda de paletas se obtuvieron como una media de los valores bibliográficos referenciados anteriormente.

**Tabla 9. Rendimientos de agitación**

RENDIMIENTOS DE AGITACIÓN	Diseño de la invención	Rueda de paletas
Rendimiento hidráulico+mecánico	0,8	0,235
Rendimiento volumétrico	0,93	0,85
Rendimiento global	0,74	0,2

35 Con estos rendimientos y las pérdidas de carga h de la Tabla 8, se pudo calcular la potencia consumida en ambos sistemas.

**Tabla 10. Potencia consumida en ambos sistemas**

Laguna 4.500 m <sup>2</sup>	Potencia (W)	Potencia (w/m <sup>2</sup> )
Diseño convencional	2.158,22	0,479604
Diseño de la invención	318,56	0,070792
<b>AHORRO TOTAL DE ENERGIA</b>	<b>85 %</b>	<b>85 %</b>

40 La Tabla 5 muestra cómo el ahorro en energía consumida con el diseño propuesto fue del 85 % con respecto al sistema convencional. En este ahorro se tiene en cuenta la mejora del diseño hidráulico (Tabla 3) y la mejora del equipo de agitación. Por lo tanto, con el diseño de la invención se obtuvo un valor de 0,07 w/m<sup>2</sup> frente a 0,479 w/m<sup>2</sup> del sistema HRAP convencional.

45 Para comprobar la importancia de esta mejora energética se compararon los datos de consumo energético de tres tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (DQO = 700 mg/l, NT = 40 mg/l, PT = 10 mg/l). En primer lugar una planta de tratamiento con el sistema convencional de fangos activos con eliminación de N y P; en segundo lugar una planta de tratamiento de microalgas con sistemas HRAP convencionales; y por último, la planta de tratamiento construida con las mejoras de la presente invención. A efectos prácticos se supuso que el

pretratamiento y el sistema de separación y deshidratación de biomasa era el mismo en las tres plantas, por lo que solo se comparó el reactor biológico de tratamiento.

5 Planta de tratamiento de 4.800 m<sup>3</sup>/día, realizada con lagunas de 4.500 m<sup>2</sup>: Superficie efectiva estimada: 8,1 ha = 81.000 m<sup>2</sup>. Número de lagunas de 4.500 m<sup>2</sup> = 18 uds.

**Tabla 11. Potencia consumida en las tres plantas de tratamiento de aguas residuales comparadas**

	Superficie ocupada (m <sup>2</sup> )	Potencia consumida HRAP (w/m <sup>2</sup> )	Potencia consumida (Kwh/día)	Potencia consumida en reactor biológico (kwh/m <sup>3</sup> )	Ahorro energético
Fango activo	5.000		1.420	0,30	-
HRAP con rueda de paletas	81.000	0,479	932	0,19	37 %
HRAP de la invención	81.000	0,07	138	0,03	90 %

10 En la Tabla 11 se muestra cómo el HRAP con un sistema convencional de sistema de agitación por rueda de paletas redujo la energía consumida por una planta de tratamiento convencional por fangos activos, aproximadamente un 37 %. Esta reducción puede ser insuficiente en muchos casos como para optar por este sistema de depuración alternativo, teniendo en cuenta la desventaja de la superficie ocupada.

15 Sin embargo con el sistema propuesto por la presente invención, el consumo energético se redujo en un 90 % con respecto a una planta de tratamiento convencional, valor que es muy atractivo de cara a la selección de esta tecnología de depuración de aguas residuales, por su rentabilidad y rendimiento.

## REIVINDICACIONES

1. Un reactor de lagunas algales de alta tasa (HRAP) para el cultivo de microalgas o cultivo mixotrófico de microalgas-bacterias que comprende:

- 5 - un canal de flujo, por el que discurre una lámina de agua, con un nivel de agua que varía entre 0,2 y 0,6 m, en forma de rectángulo redondeado con cuatro secciones: dos tramos rectos paralelos, separados por un tabique intermedio y unidos en sus extremos por curvas semicirculares de 180°, cada una de ellas dotada de una entrada y una salida en función de la dirección en la que discurre la lámina de agua; y
- 10 - al menos un primer sistema de agitación de dicha lámina de agua, situado entre la salida de una de las curvas y el extremo del tramo recto contiguo del canal

donde al menos la primera curva, contigua al sistema de agitación, es 2 a 4 veces más estrecha que los principales tramos rectos del canal y tiene un radio de curvatura medio 1 a 2 veces mayor que la anchura de la curva, estando la entrada de dicha curva unida al tramo recto contiguo mediante una primera zona de transición que consiste en un estrechamiento desde el tramo recto hasta la entrada de la curva en forma de trapecio isósceles, de paredes planas, que presenta un incremento de la profundidad en la misma proporción al estrechamiento de su anchura con respecto al tramo recto, y una longitud tal que el ratio entre la longitud y la anchura del tramo recto del canal está comprendido entre 1 y 3;

20 estando el reactor **caracterizado por que:**

- 25 - el sistema de agitación es un acelerador de flujo que comprende un dispositivo acelerador de flujo con una hélice axial de flujo que produce un flujo axial a una velocidad de rotación igual o inferior a 100 rpm, que está alojado en el interior de un conducto cerrado de pared tubular con dos extremos abiertos para el paso de toda la lámina de agua cuyo por su interior, estando su punto más elevado a una cota por debajo del nivel inferior de agua a la entrada del sistema de agitación, y con una distancia entre el diámetro interior del conducto y el extremo de las hélices comprendida entre 2 y 20 mm; estando dicho sistema de agitación situado entre dos secciones de transición, uniendo la primera la sección rectangular de la curva con la sección circular del conducto por un extremo, y uniendo la segunda la sección circular del conducto con la sección de la segunda zona de transición del canal por el otro extremo, con la misma configuración que la primera, que también está unida al tramo recto contiguo;

siendo constante el área de sección transversal de todas las secciones del reactor, y siendo también constante la velocidad del flujo entre 0,2 y 0,4 m/s.

35 2. El reactor según la reivindicación 1, donde la anchura de los tramos rectos del canal está comprendida entre 0,5 y 25 m.

40 3. El reactor según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la segunda curva presenta la misma configuración que la primera, y tanto la entrada como la salida de dicha segunda curva se unen a los extremos de los tramos rectos contiguos mediante una tercera y cuarta zonas de transición como la definida para la entrada de la primera curva, de tal forma que el reactor comprende: el primer tramo recto; la primera zona de transición hasta la primera curva; la primera curva; el sistema de agitación; la segunda zona de transición hasta el segundo tramo recto; el segundo tramo recto; la tercera zona de transición hasta la segunda curva; la segunda curva; y la cuarta zona de transición hasta el primer tramo recto del canal.

50 4. El reactor según una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, donde la segunda curva presenta la misma configuración que la primera, estando la entrada de dicha segunda curva unida al extremo del tramo recto contiguo mediante una tercera zona de transición como la primera y estando la salida de dicha segunda curva conectada a uno de los extremos de un segundo sistema de agitación como el primero, conectada a su vez por su extremo opuesto a una cuarta zona de transición hacia el tramo recto contiguo, de tal forma que el reactor comprende: el primer tramo recto; la primera zona de transición hasta la primera curva; la primera curva; el primer sistema de agitación; la segunda zona de transición hasta el segundo tramo recto; el segundo tramo recto; la tercera zona de transición hasta la segunda curva; la segunda curva; el segundo sistema de agitación; y la cuarta zona de transición hasta el primer tramo recto del canal.

55 5. El reactor según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde al menos una de las dos curvas comprende un deflector con el mismo radio de curvatura que la propia curva.

60 6. El reactor según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la longitud del conducto cerrado de pared tubular del sistema de agitación está comprendida entre 1 m y 5 m y el punto más elevado de dicho conducto se encuentra a una profundidad bajo el nivel de la lámina de agua a la entrada del sistema de agitación comprendida entre 100 y 400 mm, ambos límites incluidos.

65 7. El reactor según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la velocidad de rotación del dispositivo acelerador de flujo está comprendida entre 30 y 80 rpm, ambos límites incluidos.

8. El reactor según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el sistema de agitación comprende un pozo de sedimentación de sólidos alojado a la entrada de dicho sistema y antes de la entrada del conducto cerrado de pared tubular, presentando dicho pozo de sedimentación de sólidos una forma rectangular en la parte superior de longitud entre 0,5 y 1 m y una anchura igual a la anchura de la curva, y un fondo plano horizontal de longitud igual a la zona superior y una anchura entre 0,4 y 0,6 m en la parte inferior, que coincide con la parte inferior del conducto cerrado de pared tubular, estando las partes superior e inferior unidas por planos inclinados.
9. El reactor según la reivindicación anterior, donde la primera sección de transición entre el pozo de sedimentación de sólidos y la entrada del conducto cerrado de pared tubular donde se aloja el dispositivo acelerador de flujo consiste en un conducto cerrado que presenta un extremo rectangular de anchura y altura correspondientes a la forma de la curva contigua a la que está conectado, y un segundo extremo circular de diámetro igual al diámetro del conducto cerrado de pared tubular al que está conectado y donde el dispositivo acelerador de flujo está situado, con pendientes de bajada comprendidas entre 1:4 y 1:6.
10. El reactor según la reivindicación anterior, donde la segunda sección de transición situada entre la salida del conducto cerrado de pared tubular y la zona de transición del canal que está conectada a la salida del sistema de agitación hacia el tramo recto del canal es igual a la primera.
11. El reactor según la reivindicación 10, donde el sistema de agitación comprende un sistema de carbonatación entre la segunda sección de transición situada a la salida del conducto cerrado de pared tubular y la zona de transición del canal situada a la salida del sistema de agitación y que conecta dicho sistema con el tramo recto contiguo del canal.
12. El reactor según la reivindicación anterior, donde el sistema de carbonatación consiste en un foso sin tabique deflector, situado en el fondo del sistema de agitación y que tiene una anchura equivalente a la del canal de flujo y una longitud comprendida entre la mitad y el doble de la anchura del canal; y que además comprende al menos un dispositivo de inyección de CO<sub>2</sub> dentro del foso, situado en la base del mismo y junto a la pared contraria a la dirección de entrada de la lámina de agua, con una distancia desde la cara superior del dispositivo por la que se inyecta el CO<sub>2</sub> hasta el fondo del canal de flujo comprendida entre 0,5 y 1,5 m, ambos límites incluidos.
13. El reactor según la reivindicación 1, que consiste en:
- dos tramos rectos de una anchura entre 0,5 y 25 m;
  - dos curvas a los extremos de los tramos rectos, con un radio de curvatura medio: ratio de anchura del canal comprendido entre 1 y 2, y un deflector con el mismo radio de curvatura que la curva;
  - cuatro zonas de transición del canal, dos entre los extremos de los tramos rectos del canal unidas a las entradas de las curvas contiguas y dos entre los sistemas de agitación y los tramos rectos contiguos a las que están unidas; donde el ratio entre la anchura del tramo recto y la anchura de la curva está comprendida entre 2 y 4, de tal forma que la profundidad se incrementa gradualmente por el mismo valor a lo largo de la longitud de la zona de transición, estando el ratio de la longitud de la zona de transición y la anchura del tramo recto del canal comprendido entre 1 y 3;
  - dos sistemas de agitación, situados a la salida de las curvas, que contienen el dispositivo acelerador de flujo situado en el interior del conducto cerrado de pared tubular con dos extremos abiertos para el paso de la lámina de agua y cuya parte superior se encuentra a una cota por debajo del nivel de la lámina de agua a la entrada del sistema de agitación, dichos sistemas de agitación comprendiendo además:
    - un pozo de sedimentación de sólidos, de longitud comprendida entre 0,5 y 1 m y con fondo plano horizontal en la parte inferior de anchura comprendida entre 40 y 60 cm, unido a la parte superior por planos inclinados, donde el fondo plano horizontal coincide con la parte inferior del conducto cerrado de pared tubular que aloja una bomba sumergible para la extracción de sólidos sedimentados;
    - una primera sección de transición entre el pozo de sedimentación de sólidos y el conducto cerrado de pared tubular, que consiste en una tolva fabricada con técnicas de calderería para la transición entre la forma rectangular de la curva y la forma circular del conducto cerrado de pared tubular, formada por cuatro triángulos y cuatro tramos curvos;
    - el conducto cerrado de pared tubular, que es un tubo circular donde se sitúa concéntricamente el acelerador de flujo, de longitud comprendida entre 1 m y 5 m;
    - una segunda sección de transición, con la misma configuración que la primera, entre la salida del conducto cerrado de pared tubular y un sistema de carbonatación; y
    - el sistema de carbonatación, que consiste en un foso sin tabiques deflectores, situado en el fondo del sistema de agitación y de anchura equivalente a la anchura del canal de flujo y una longitud comprendida entre la mitad y el doble de la anchura del canal; y que además comprende al menos un dispositivo de inyección de CO<sub>2</sub> dentro del foso, situado en la base del mismo y junto a la pared contraria a la dirección de entrada de la lámina de agua, con una distancia desde la cara superior del dispositivo por la que se inyecta el CO<sub>2</sub> hasta el fondo del canal de flujo comprendida entre 0,5 y 1,5 m, ambos límites incluidos.

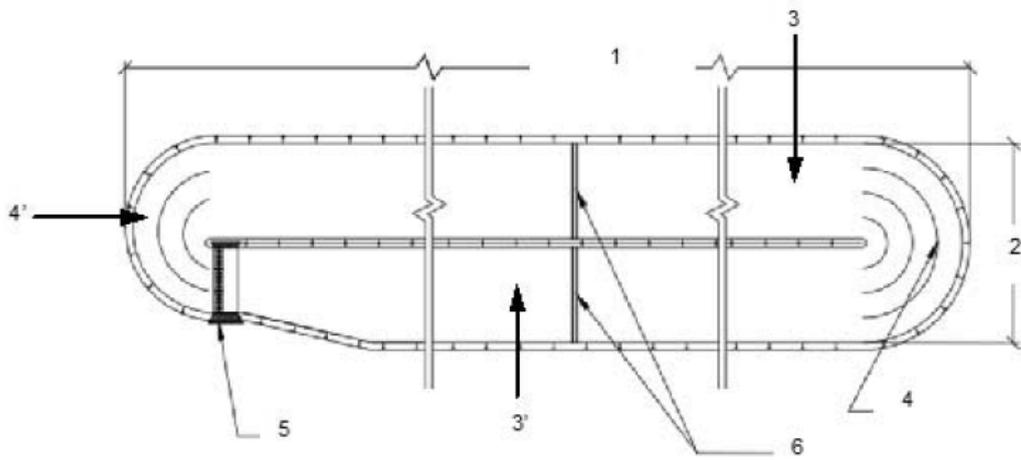


FIG. 1 (estado de la técnica)

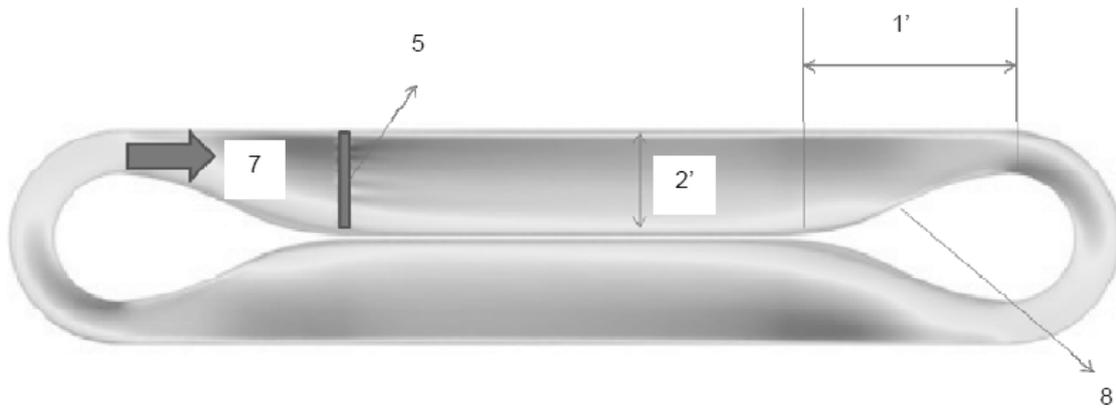


FIG. 2 (Liffman, Paterson et al., 2013; estado de la técnica)

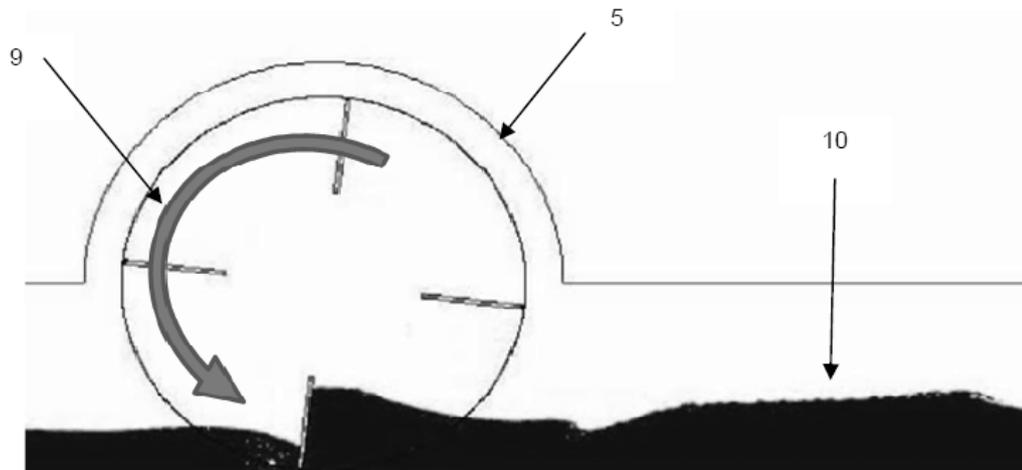


FIG. 3 (estado de la técnica)

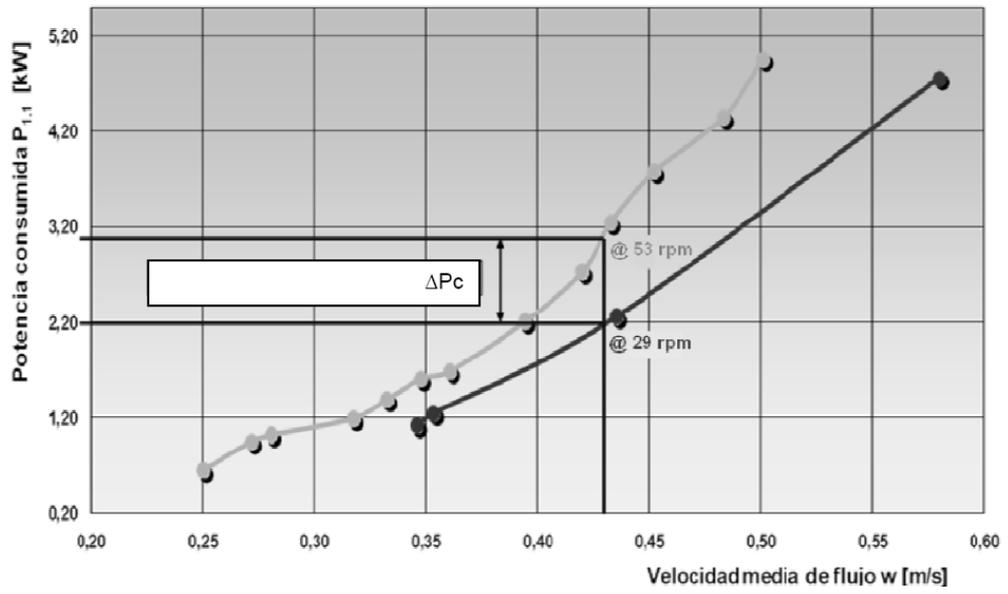


FIG. 4

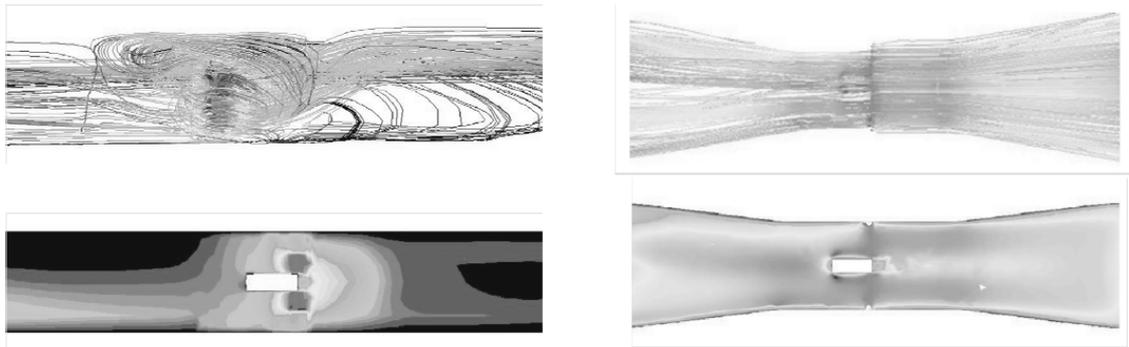


FIG. 5

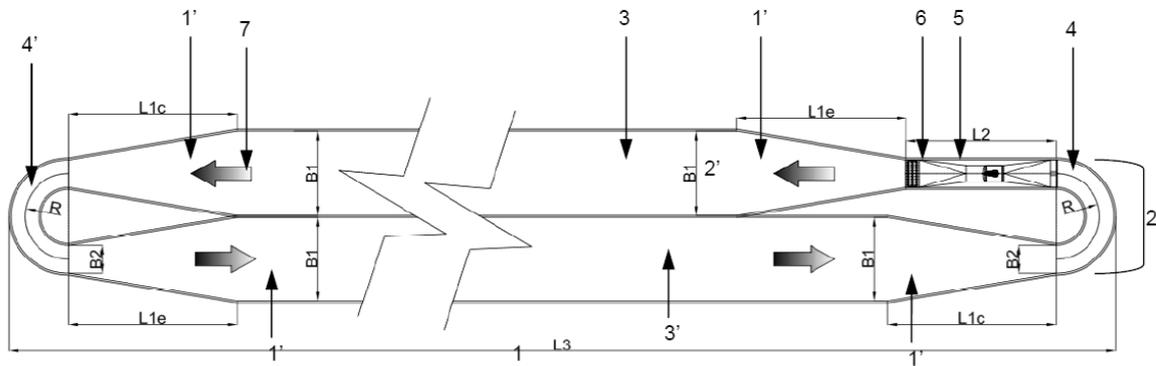


FIG. 6

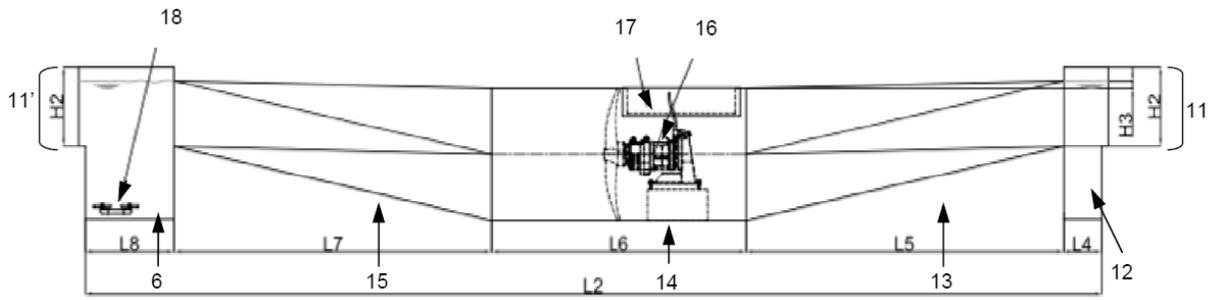


FIG. 7

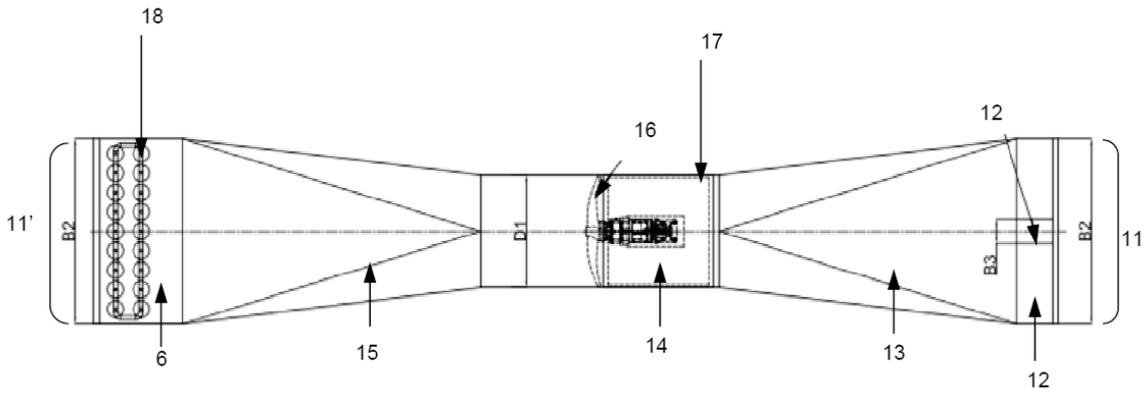


FIG. 8

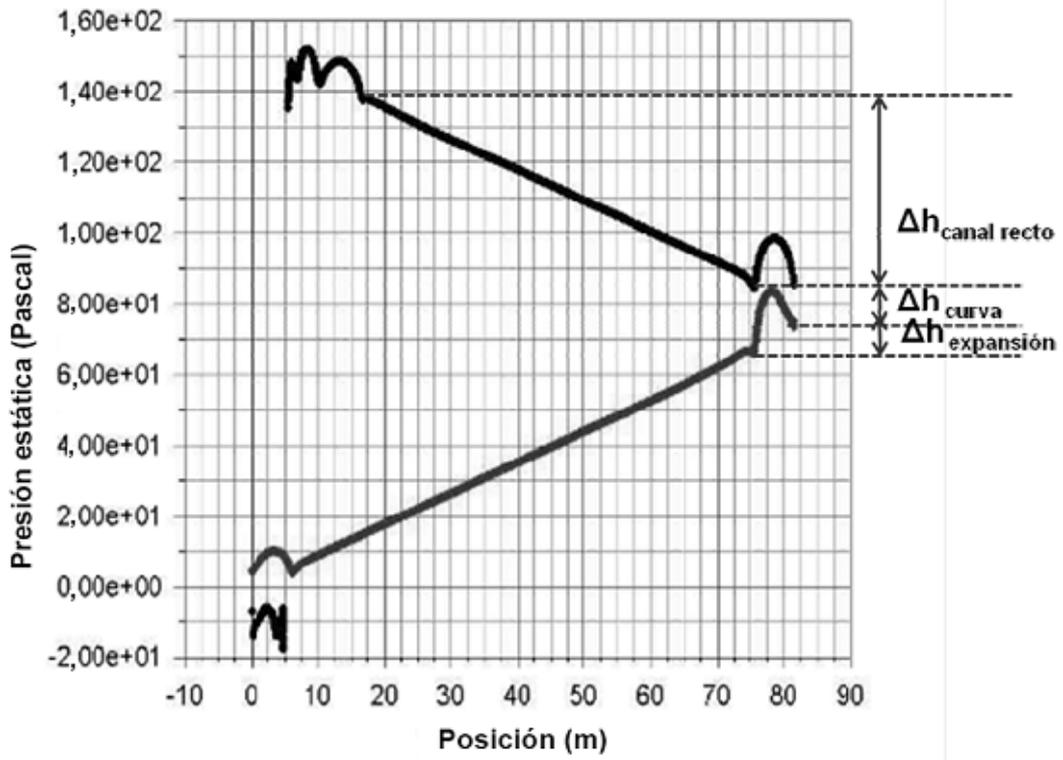


FIG. 9

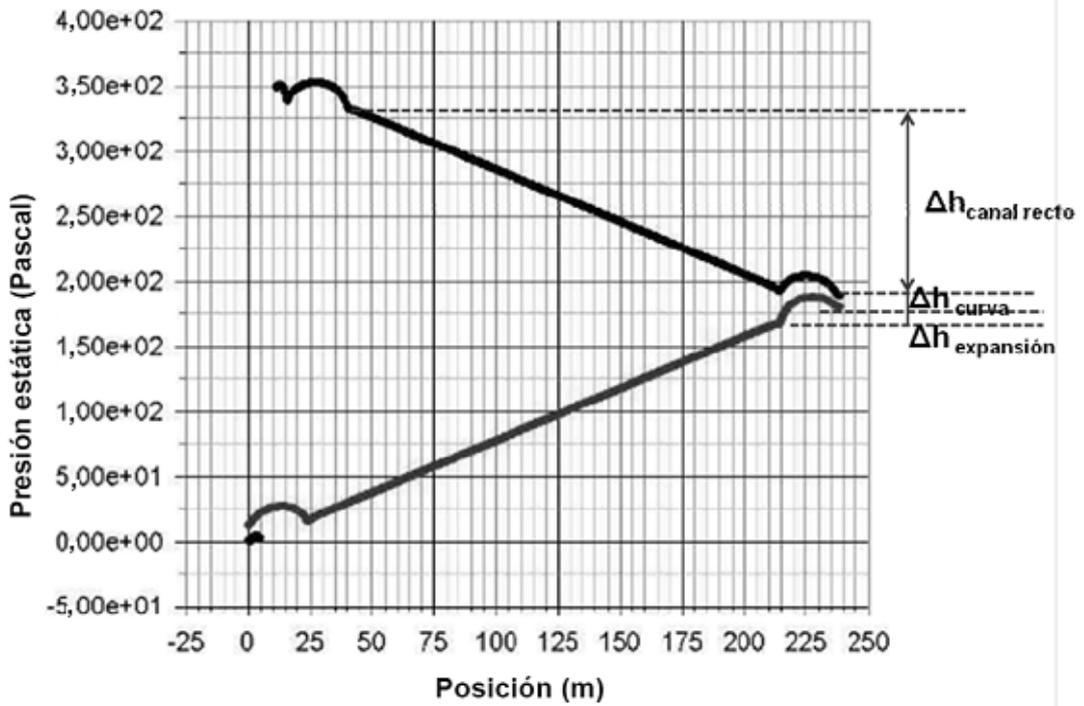


FIG. 10



FIG. 11



FIG. 12



**FIG. 13**