Planta Piloto para el Tratamiento de Aguas Residuales Empleando Algas: del Laboratorio a la Industria

Margarita Ramírez-Carmona*, Leidy Rendón-Castrillón*, Yesid Vélez-Salazar*, Carlos Ocampo-López*, Rubén Giraldo-Aristizábal*, Silvio Salazar-Martínez*

*Facultad de Ingeniería Química. Universidad Pontificia Bolivariana. Cq 1A N° 70-01, A. A. 56006, Laureles, Medellín, Colombia.

Email: margarita.ramirez@upb.edu.co, leidy.rendon@upb.edu.co, yesid.velez@upb.edu.co, carlos.ocampo@upb.edu.co, silvio.salazar@upb.edu.co

Abstract

This investigation, executed by phases, was carried out using wastewater treatment algae. Initially experimental work at laboratory level was developed by selecting the types of algae that were to be used, for which, the undergraduate students involved in the project applied the knowledge acquired in courses such as Organic Chemistry and Biochemical Engineering, later system operation conditions were adjusted, evaluating different bioreactors designs by applying theoretical elements from Reactor Design and Mass Transfer courses, and subsequent plant engineering design, reaching a pilot plant with a capacity of 1.4 m^3, using contents from Process and Control Design courses. All inputs obtained through this methodology were used to begin the construction of plant's detailed engineering, together with construction engineers, which showed the gap between prototypes in the laboratory and fieldwork reality.

Keywords: Laboratory, pilot plant, algae, wastewater treatment.

1 Introducción

La biotecnología de las algas se basa en su cultivo masivo. Para su cultivo existen dos diseños básicos para la producción (Grobbelaar, 2000), estos pueden ser abiertos o cerrados. Los abiertos son los más abundantes y más antiguos, presentan ciertas desventajas como: fácil contaminación del medio, difícil control de las condiciones de operación, perdida del medio por evaporación, baja densidad celular, alta dependencia de las condiciones climáticas entre otras; mientras los cerrados son más recientes y presentan ventajas como menor requerimiento de espacio, se reduce la contaminación del cultivo por organismos no deseados (algas competidoras, parásitos, epífitos) y la flexibilidad en la producción, entre otras.

Existe una variedad de diseños de reactores abiertos para el cultivo masivo de algas. Estos sistemas se basan en un esquema similar: un paralelepípedo de superficie variable y profundidad por lo general inferior a 50cm (Richmond, 2000). La cubeta puede estar construida con los materiales más diversos: piedra, hormigón, cemento, ladrillos, distintos plásticos, arena impermeabilizada con un plástico, entre otros (Dodd, 1986). Estos sistemas, pueden contar con canales poco profundos, construidos en forma de circuito cerrado, en los que el medio de cultivo es impulsado mediante paletas rotatorias. Además existen diseños en los que grandes estanques son mezclados con difusores de aire en el fondo de los tanques o turbinas flotantes. Este tipo de reactores generalmente requieren de grandes áreas de terreno (500-10000m^2) y alcanzan densidades celulares muy bajas de 0,4 g/L (Dodd, 1986; Pulz, 2001); tienen como ventaja el bajo costo de producción de biomasa. Sin embargo, el perfeccionamiento de esta tecnología llegó a su límite, restringiendo así el desarrollo de la biotecnología de microalgas. La baja densidad celular origina varios inconvenientes, incluyendo baja productividad, fácil contaminación, costosa recuperación del producto de medios diluidos y dificultad para el control de la temperatura por las pérdidas de agua por evaporación. Estos inconvenientes estimularon el desarrollo de fotobiorreactores construidos con materiales transparentes como vidrio, fibra de vidrio, acrílico, polietileno, policarbonato, entre otros materiales.

El sistema de producción de biomasa algal a cielo abierto más grande en funcionamiento ocupa 440.000 m^2 (Spolaore et al., 2006). Los primeros fotobiorreactores cerrados fueron propuestos por Pirt, Gudin & Chaumont y Torzillo (Pirt et al., 1983; Gudin y Chaumont, 1983; Torzillo et al., 1986). En la década los noventa, los fotobiorreactores tubulares horizontales, verticales e inclinados, de placas planas, entre otros, han recibido mucha atención, ya que permiten establecer cultivos de alta densidad celular, tres o más veces en comparación con los sistemas convencionales de carrusel. Esto tiene ventajas como facilidad para cosechar la biomasa, mantenimiento del cultivo sin contaminación, mejor control de las condiciones de cultivo.

En este trabajo se realizó el diseño de un biorreactor para el tratamiento de aguas residuales empleando algas de 1.4 m^3 después de escalar el bioproceso (del laboratorio a la planta piloto). Para este trabajo, se vinculó al proyecto estudiantes de diferentes semestres del pregrado de Ingeniería Química, de forma que se les permitiera la aplicación de sus conocimientos adquiridos a través del plan de estudio, como se muestra en la Figura 1.

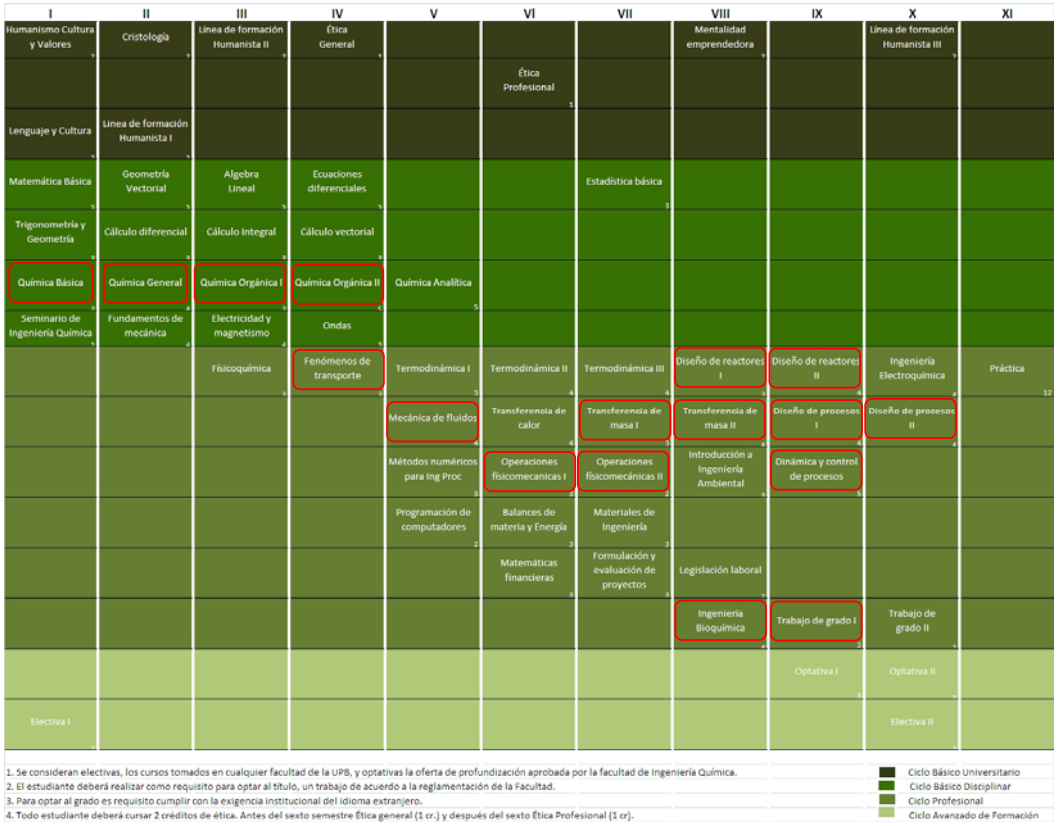

Figura 1: Plan de estudio del programa Ingeniería Química – UPB

2 Metodología

La transferencia de conocimiento para convertir una idea de laboratorio en un prototipo a escala industrial, consta de varias etapas: Identificación de la necesidad a suplir, conocimiento del proceso, diseño y construcción del primer prototipo, cálculos detallados, ensayo con los equipos, los primeros equipos y pruebas de funcionalidad.

2.1 Etapa 1

Identificación de la necesidad a suplir. Muchas veces las ideas generadas en un aula de clases, no son necesariamente ideas de negocio; en ocasiones porque son muy soñadoras, o porque no se alcanza a identificar en estas un potencial de ingresos económicos, con los cuales un inversionista desee arriesgar. En esta parte es fundamental acotar el objeto del desarrollo, e identificar sobre este los posibles beneficios económicos. No es necesario obtener un modelo económico; ya que es factible que se desconozcan las variables de análisis. Esta primera etapa se estructuró a partir de ideas generadas dentro del grupo de investigación, con base en un requerimiento realizado por la industria: Producir Biodiesel a partir de cultivos de algas. Se encargó a estudiantes de noveno semestre del pregrado en Ingeniería Química para que estructuraran el estado del arte, de la mano del docente correspondiente del curso Trabajo de Grado I, en el cual se aborda el tema metodológico para la construcción de documentos técnicos.

2.2 Etapa 2

Conocimiento del proceso. En esta etapa es fundamental una continua comunicación entre los integrantes del grupo de investigación (estudiantes de pregrado e investigadores). En ocasiones, en el laboratorio los procesos son simples y replicables, debido básicamente a que el ambiente es controlado y en consecuencia es mucho más fácil controlar todas las variables involucradas en el proceso. Cuando se escala una planta o proceso, los volúmenes son de tal

magnitud que no se logran controlar las variables con tanta facilidad como se realiza en el laboratorio: subir un grado centígrado o bajarlo, ya no es cosa de segundos o minutos; a escala industrial puede ser un asunto de horas.

Para el constructor, se supone que toda la información está en los artículos o documentos de trabajo de los investigadores. El pequeño detalle, que allí no aparece es el que contiene el verdadero know-how: agregar unas gotas, colocar un elemento de una u otra forma. Esto es lo que permitirá que el proceso funcione en el laboratorio; y que es necesario que se migren a los procesos industriales. En esta etapa, se encargó a los estudiantes de pregrado de octavo semestre o superiores, la realización de una búsqueda bibliográfica que permitiera la clara elucidación de los procesos fotosintéticos de las algas, bajo la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los requerimientos de las algas para la activación de los Fotosistemas II y I y la acumulación del CO_2 para posteriormente ser fijado en el Ciclo de Calvin? o ¿Cuáles son los requerimientos de las algas para llevar a cabo sus fases lumínica y oscura?. Estas preguntas fueron resueltas desde los contenidos del curso de Ingeniería Bioquímica, para los estudiantes de pregrado.

2.3 Etapa 3

Diseño y construcción del primer prototipo. Luego de conocer los procesos, se hace necesario tomar las ideas y empezarlas a plasmar en un plano o en un dibujo, esto resume lo que el constructor entiende de la explicación del investigador. En este punto del proyecto, se desarrolla una reunión general entre estudiantes, investigadores y constructores, quienes explican su propuesta con base en lo comprendido del proceso y por medio de diferentes metodologías. Se evalúa cada elemento diseñado y se ajusta a las necesidades. Los primeros diseños, son levantados por estudiantes de noveno semestre del pregrado, haciendo uso de los contenidos de los cursos Mecánica de fluidos, Operaciones fisicomecánicas, Transferencia de masa, Diseño de reactores, Diseño de procesos y Dinámica y Control de Procesos, transcurriendo a través del ciclo profesional de su plan de estudios. Se obtiene simplemente una representación de lo que el investigador tenía en el laboratorio a una escala superior.

2.4 Etapa 4

Cálculos detallados. Todo diseño debe contar con unos cálculos que soporten los desarrollos a realizar: la parte estructural, los rangos de operación y de temperatura y demás variables involucradas en el proceso.

Aquí es factible que se identifiquen que los valores requeridos para el laboratorio, en las cantidades en las que se requiere en la planta piloto, incrementen los consumos o costos y generen la necesidad de optimizar los procesos. Se requiere entonces hacer sistemas adicionales para mantener los costos de producción a valores razonables.

Esta etapa es ejecutada fundamentalmente por el constructor, generando permanentemente retroalimentación al grupo de investigación, con el fin de garantizar que los cambios que se realicen al proceso no afecten los resultados que se esperan.

2.5 Etapa 5

Los primeros equipos y pruebas de funcionalidad. Para llevar el proceso a la realidad, es necesario evaluar cada equipo y cada etapa del proceso, con algún grado de detalle. La construcción de un equipo a escala diferente a la del laboratorio y con los elementos comerciales, implica que, por ejemplo, lo que antes era una manguera ya se deba reemplazar por una tubería, lo que implica una nueva evaluación con estos nuevos elementos.

En esta etapa del proyecto, el trabajo en conjunto entre estudiantes, investigadores y constructor, se evidencia de manera más marcada, ya que el constructor se encarga de entregar insumos para ser evaluados por los integrantes del grupo. Este trabajo permite la complementación de la formación de los estudiantes de pregrado, buscando cerrar brechas entre la investigación y la ejecución en campo.

3 Resultados obtenidos

En la actualidad existe un creciente interés en el desarrollo de procesos industriales tendientes a los bioprocesos, estos deben ser estructurados pensando en la posibilidad de ser escalables, pasar del desarrollo en el laboratorio al desarrollo piloto y posteriormente al industrial. En la Figura 2 se muestra de manera general como después de concebir la idea, se ajustan los parámetros en el laboratorio, de tal manera que se logre traducir el proceso en un diagrama PFD, que posteriormente se traduce en un diagrama Layout, que permite elaborar el diseño en detalle y lograr el diseño de la planta piloto.

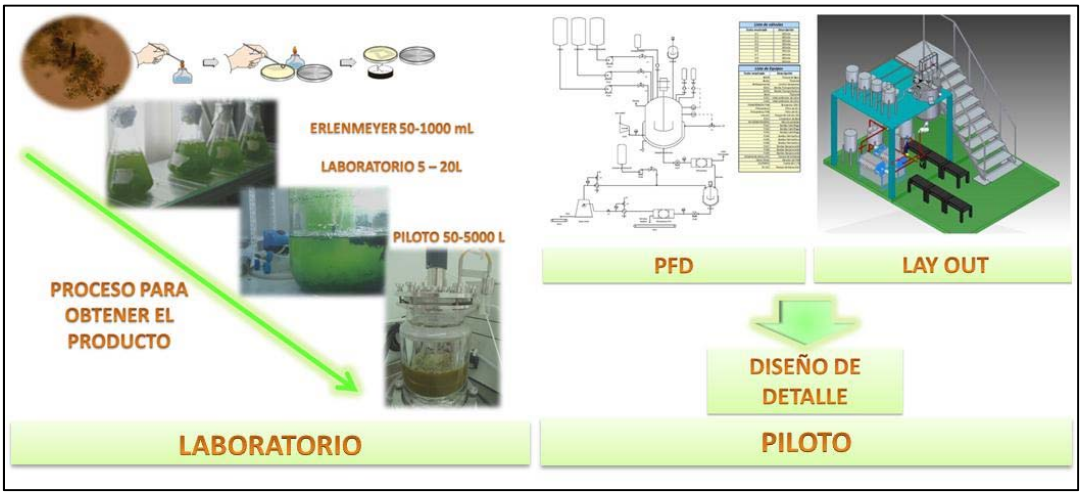

Figura 2: Diagrama Layout

En general la estrategia de escalado consiste en conservar la igualdad en el aumento de la transferencia de masa y de la relación nutrientes/células, en el aumento de la taza de producción de metabolitos, además de evitar la formación de agregados o deposición celular; para lo cual se emplean modelos empíricos, grupos adimensionales y modelos fenomenológicos como: transporte de energía, cantidad de movimiento y transporte de masa; esta última es la que presenta mayor complejidad cuando se realiza el escalado de los bioprocesos. Normalmente se emplea el concepto de coeficiente difusional, el cual representa la facilidad con que cada soluto en particular se mueve en un solvente determinado. Numéricamente se representa mediante el K_La (Ghasem, 2006).

La determinación del K_La en biorreactores es esencial para establecer la eficiencia de la aireación y para cuantificar los efectos de las variables que operan en el suministro de Oxígeno disuelto (García & Gómez, 2009).

El Oxígeno para ser metabolizado por las microalgas debe pasar a través de una serie de resistencias al transporte, dependiendo de la hidrodinámica de la burbuja, temperatura, actividad celular y densidad, composición de la solución, fenómeno interfacial y otros factores. En la Figura 3 se muestra las resistencias involucradas en el transporte de Oxígeno desde el interior de la burbuja de gas hasta el lugar de reacción en el interior de la célula (Montoya, et al., 2003). Estas son:

- Difusión desde el seno o núcleo del gas a la interfase gas – líquido.
- Movimiento a través de la interfase gas – líquido.
- Difusión del soluto a través de la región estancada adyacente a la burbuja.
- Transporte del soluto a través del seno del fluido líquido.
- Movimiento a través de la segunda región estancada asociada con la célula.
- Transporte difusivo hacia el interior de la célula.
- Si las células están en un flóculo, agregado o partícula sólida, difusión a
- través del sólido hasta cada célula individual.
- Transporte a través del citoplasma hasta el lugar de reacción.

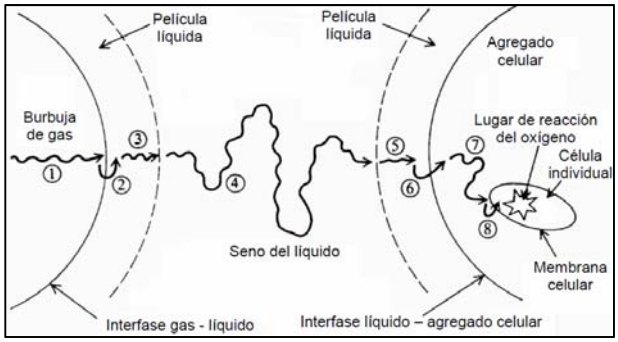

Figura 3: Esquema del transporte de CO_2/ Aire desde una burbuja de gas al interior de la célula

La tasa de transferencia de gases está influenciada por un gran número de parámetros (propiedades físicas del gas y del líquido, las condiciones de funcionamiento, parámetros geométricos del biorreactor) y también por la presencia de la biomasa, como se muestra en la Figura 4 (García & Gómez, 2009; Ugwu et al., 2008).

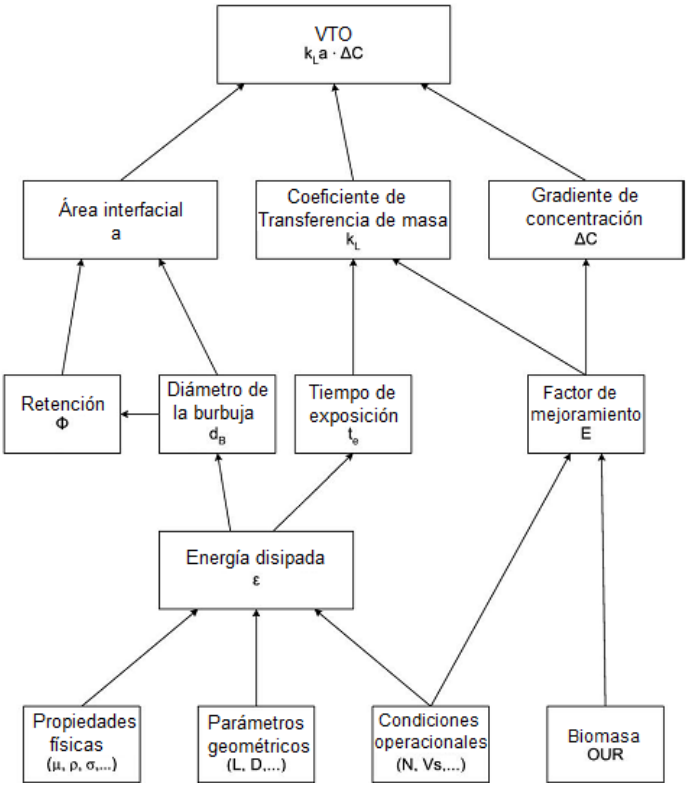

Figura 4: Diagrama conceptual de la transferencia de masa

Para garantizar una apropiada tasa de transferencia de gases, se debe evaluar un eficiente sistema de aspersión de burbujas de gas (difusor) dirigido a incrementar el área interfacial de las burbujas con el medio y el tiempo de contacto; parámetros claves para aumentar la eficiencia de la transferencia de masa de CO_2/ Aire en columnas de burbujeo (Putt, 2011).

El método dinámico se basa en la medición de la concentración de Oxígeno disuelto en el medio en la etapa de absorción y desorción, como se observa en la Figura 6. Después de un cambio en la concentración en el gas de entrada, se analiza el cambio de dinámica en la concentración de Oxígeno disuelto (García & Gómez, 2009).

Este método consiste en el suministro de la mezcla CO_2/Aire hasta alcanzar la concentración de saturación de Oxígeno en el líquido, luego se introduce Nitrógeno para contribuir a la disminución de la concentración de Oxígeno en función del tiempo (García & Gómez, 2009), como se muestra en la Figura 5.

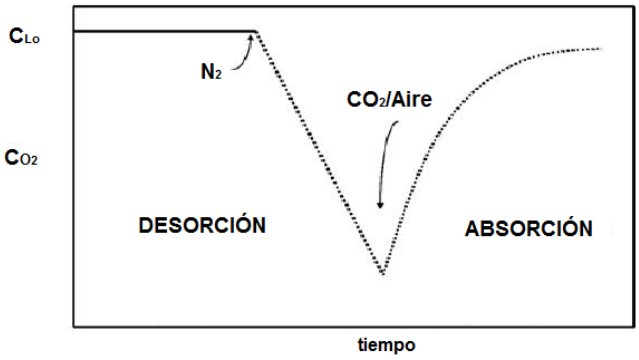

Figura 5: Descripción esquemática de la técnica de desorción y absorción de Oxígeno en el método dinámico, para las mediciones en condición inerte

Todo lo anterior corresponde al levantamiento documental realizado por los estudiantes del pregrado en Ingeniería Química de diferentes semestres, quienes se apoyaron de los docentes de los cursos involucrados en tales temas, como Química Orgánica, Fenómenos de Transporte, Mecánica de Fluidos, Operaciones Fisicomecánicas y Transferencia de Masa, permitíendoles evidenciar la aplicación de todos los conceptos teóricos abordados en cada curso.

Posterior al cálculo del coeficiente difusional, relevante en los procesos biológicos, se pasa a ajustar los detalles con el constructor de acuerdo a las etapas mencionadas en la metodología, partiendo de un diagrama de bloques (Figura 6) y una propuesta inicial para el biorreactor (Figura 7), generado por los estudiantes con la asesoría de los investigadores y que sirvió como parte de la estructuración de su trabajo de grado para aspirar al título de Ingenieros Químicos.

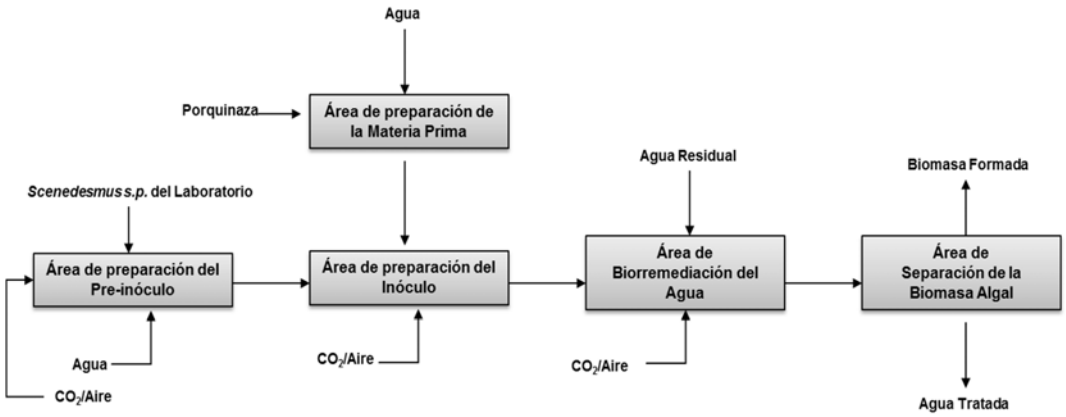

Figura 6: Diagrama de bloques planta piloto

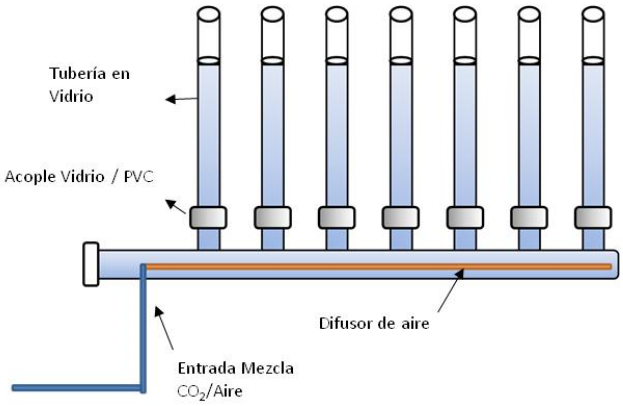

Figura 7: Disposición de un ramal con algunas derivaciones verticales en vidrio

Las situaciones que se encontraron en conjunto con el constructor, al analizar la propuesta inicial, fueron:

Etapa 1: En este caso el tratamiento de aguas residuales por este método; implicaría la construcción de grandes depósitos para recoger el material y almacenarlo; ya que su tiempo de proceso puede superar los 10 días. Bajo esta condición se acota un tamaño adecuado de planta que es factible construir y puede generar una cantidad de material.

Etapa 2: En el momento de diseñar la planta, apareció la necesidad de burbujear CO_2. Los valores escalados para el este un tamaño industrial, generan un sistema con un consumo muy alto; por lo tanto, en este punto ya el CO_2, no puede ser un insumo, sino que se vuelve necesario generar sistemas donde este se pueda conseguir por otros medios.

Etapa 3: En esta investigación se diseñaron tubos de vidrio que son de alto costo y frágiles y almacenan poca cantidad de agua, lo que generarían una planta grande, costosa y difícil de operar a largo plazo.

En general para resolver los problemas de las etapas restantes, se mencionan a continuación los casos puntuales:

Inicialmente se pensó un diseño de reactor tipo columna, que para logar tratar 1 m^3 requería un volumen de sistema de 1.4 m^3, siendo necesario disponer de 100 columnas de vidrio para ello, además de una inyección de una mezcla CO_2/aire que favorecía la agitación.

Cambio de geometría del biorreactor: Columnas cilíndricas de burbujeo por piscinas rectangulares, que requirieron pasar de 100 columnas cilíndricas a 6 piscinas rectangulares. Las columnas cilíndricas no estaban disponibles en el mercado nacional, presentaban fragilidad, dificultad en el ensamblaje. El cambio de biorreactor bajó los costos, mejoró la facilidad para empalmar las piezas de los equipos, facilitó el mantenimiento, disminuyó los riesgos para los operarios. Ver Figura 8.

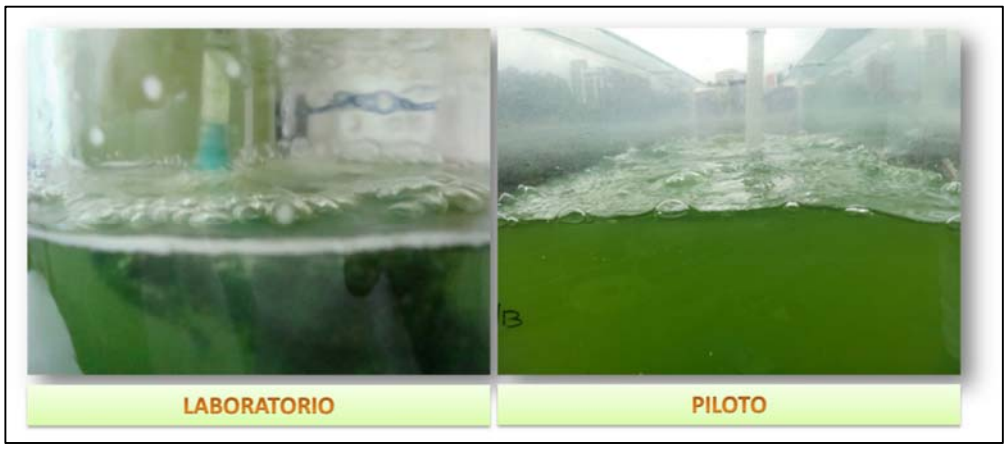

Figura 8: A la izquierda, el reactor evaluado a nivel de laboratorio, con geometría cilíndrica; a la derecha, el reactor evaluado a nivel piloto, con geometría cúbica.

Conservación del burbujeo: Este parámetro fue relevante, a pesar del cambio de geometría del biorreactor. Para lograrlo fue necesario afinar la selección de la bomba, el tipo de difusor y garantizar la presión del sistema para mantenerlo no solo aireado sino en agitación constante.

Se pasó de bombas de peceras a sopladores y posterior a un compresor. El soplador no conseguía mantener la presión del sistema para garantizar su objetivo. Ver Figura 9.

Figura 9: Tipos de bombas utilizados a nivel de laboratorio y a nivel piloto.

Se pasó de difusores de peceras a difusores que garantizaron un burbujeo fino, para aumentar el contacto entre las algas y el sustrato, en este caso los sólidos presentes en el agua residual. Ver Figura 10.

Figura 10: Tipos de difusores evaluados a nivel de laboratorio y a nivel piloto

Se empleó un tanque pulmón a la entrada del sistema, garantizando así la agitación en el biorreactor. Ver Figura 11.

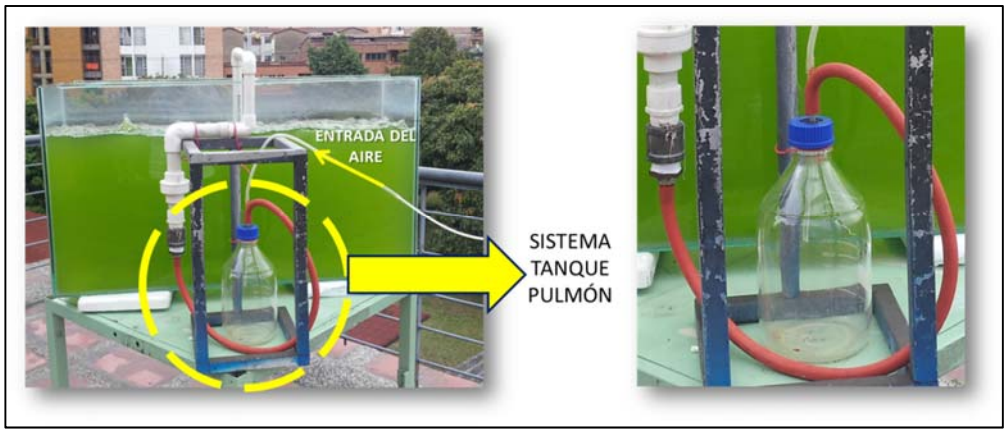

Figura 11: Sistema de tanque pulmón que optimiza la homogenización de la biomasa. Evita su sedimentación

Al iniciar la ingeniería de detalle se había conseguido resolver las condiciones críticas para la construcción. Se logró un sistema de planta piloto conservando las condiciones técnicas del bioproceso y permanentemente vinculando estudiantes del pregrado en Ingeniería Química con quienes se tuvo la oportunidad de articular su plan de estudios, con la estructuración y ejecución de un proyecto de investigación y su posterior construcción en conjunción con una firma de ingenieros.

4 Conclusión

El tratamiento de aguas residuales empleando algas, evidenció la brecha que existe entre la experimentación a nivel de laboratorio y los prototipos de planta piloto diseñados para la aplicación en campo. El cierre de esta brecha se logró con la articulación de los estudiantes de pregrado del programa de Ingeniería Química, los investigadores y los constructores, dirigiendo todos sus conocimientos e iniciativas para lograr hablar el mismo idioma.

Referencias

Dodd, J.C. (1986). Elements of pond design and construction. In A RICHMOND ED., CRC Handbook of Microalga/ Mass Culture: 265-283. CRC Press Inc., Boca Ratón (Florida).

García, Félix y Gómez, Emilio (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: En: Biotechnology Advances. Vol. 27, pp. 153 –176.

Ghasem, Najafpour. (2006). Biochemical Engineering and Biotechnology. Elsevier, Dec 9, 438 pages.

Grobbelaar, JU (2000). Physiological and technological considerations for optimizing mass algal cultures. Journal of Applied Phycology. 12: 201-206.

Gudin, Chaumont (1983). Solar biotechnology study and development of tubular solar receptors for controlled production of photosynthetic cellular biomass. En Palz W, Pirrwitz D (Eds.) Proceedings of the Workshop and EC Contractor's Meeting in Capri. Reidel. Dordrecht, Holanda. Pp. 184-193.

Montoya, Didier y Bermúdez, Mónica. (2003). Modelamiento de la Transferencia de Oxígeno para el cultivo de microorganismos en un biorreactor de columna de burbujeo. En: Trabajo Final. Universidad Nacional De Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Carrera de Ingeniería Química. Manizales.

Pirt SL, Lee, et al. (1983) A tubular bioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: Design and performance. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 33B: 35- 38.

Pulz, O. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. (2001). Applied Microbiology and Biotechnology. 57:287–293

Putt, Ron, et al (2011). An efficient system for carbonation of high-rate algae pond water to enhance CO_2 mass transfer. Bioresource Technology. No. 102. pp. 3240–3245.

Richmond A (2000). Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: a personal view. Journal of Applied Phycology. 12: 441-451.

Torzillo G, et al (1986) Production of Spirulina biomass in closed photobioreactors. Biomass 11: 61-64.

Ugwu, C.U, Aoyagi, H and Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. Review. En: Bioresource Technology. Vol 99. pp. 4021–4028.