



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE

TUXTLA GUTIÉRREZ

INGENIERIA ELECTRONICA
RESIDENCIA PROFECIONAL

Nombre del proyecto

Modelado y simulación de un fotobiorreactor para producir
biocombustible a partir de microalgas.

ASESOR

DR. HECTOR RICARDO HERNÁNDEZ DE LEÓN

PRESENTA

CARLOS ALEXIS RAMÍREZ MENDOZA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

INDICE

Capítulo 1 Generalidades.....	4
1.1.-INTRODUCCION	4
1.2.-Información de la institución donde se desarrolló el proyecto.....	6
1.2.1.-Historia del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.....	6
1.2.2.- Escudo.....	7
1.2.3.- Misión	8
1.2.4- Visión	8
1.2.5.- Valores	8
1.2.6.- Oferta educativa	8
1.2.7.- Proyectos de vinculación exitosos con la industria	9
1.2.8.- Localización.....	9
1.2.9.- Área específica relacionada directamente con el proyecto	9
1.3.- Antecedentes.....	10
1.4.- Planteamiento del problema.....	12
1.5.- Nombre del proyecto.....	12
1.6.- Objetivos del proyecto 1.6.1.- Objetivo general	12
1.6.2.- Objetivos específicos	12
1.7.- Justificación del proyecto	13
1.8.- Alcances y limitaciones.....	13
1.9.- Metodología para la realización del proyecto	14
1.10.- Estado del arte.....	15
CAPITULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
2.1.- Introducción de Microalgas	18
2.2 Importancia de la microalgas.....	19
2.3.-Especies de microalgas	19
2.4.-Cultivo de microalgas.....	20
2.5.- Factores del cultivo de microalgas	20
2.6.-Luz.....	20
2.7.-Intensidad	21
2.8.-Burbujeo	21
2.9.-Temperatura	22
2.10.-PH.....	22

2.11.-Nutrientes	22
2.12.-Producción de la biomasa de microalgas	23
2.12.1-Métodos de cultivo	23
2.12.2.-Sistemas abiertos.....	24
2.12.3.-Sistemas cerrados.....	25
2.13.-Métodos de recolección	28
2.14.-Filtración	28
2.15.-Centrifugación y sedimentación	29
2.16.-Flotación	29
2.17.-Floculación	29
2.18.-Extracción de lípidos de microalgas.....	29
2.19.-Métodos mecánicos	30
2.20.-Métodos químicos	30
Capítulo 3 Estrategias de modelado y control de Fotobiorreactores.....	31
3.1.- Dinámica del sistema y modelos	32
3.2.-Subsistema de luz incidente: influencia en el crecimiento de las microalgas.....	33
3.3.-Subsistema de la fotosíntesis: modelo del crecimiento de las microalgas	34
3.4.-Subsistema de la química del medio.	37
3.5.-Identificación del sistema con datos experimentales y resultados.....	41
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS.....	46

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1.-INTRODUCCION

El cultivo de microorganismos fotoautotróficos como las microalgas, se ha llevado a cabo en fotobiorreactores (FBR), los cuales tienen múltiples diseños. Los avances tecnológicos en el diseño de estos sistemas han permitido mejorar notablemente la densidad celular, la productividad y por ende la economía de los cultivos para distintos fines.

La investigación con microalgas ha alcanzado una enorme importancia debido, fundamentalmente, a la combinación de usos que pueden tener. Se pueden utilizar con fines energéticos, principalmente para la obtención de biodiésel aunque también se pueden obtener otros biocombustibles como bioetanol, biometano, biohidrógeno y generar calor y electricidad. Otras aplicaciones comerciales de las microalgas buscan obtener productos de alto valor añadido con aplicaciones en la nutrición y salud humanas, acuicultura, cosméticos y biofertilizantes. Además, las microalgas pueden ayudar, durante su crecimiento, a reducir las emisiones de CO₂ por biomitigación biológica e intervenir en el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo son los fines energéticos los que más están contribuyendo al enorme desarrollo que están experimentando las microalgas. Para que estos usos sean económicamente viables y medioambientalmente sostenibles, es necesario reducir significativamente los costes de producción y los impactos medioambientales, consiguiendo un balance energético y de CO₂ favorables. Estos procesos se pueden combinar de manera que se produzcan sinergias que incrementen la sostenibilidad global de los procesos productivos

Las microalgas han despertado un enorme interés debido a que son microorganismos fotosintéticos que se caracterizan por su rápido crecimiento, las células se duplican en un periodo de 1 a 10 días, tienen un alto contenido lipídico (más del 50% en peso de materia seca en algunos casos) y utilizan menos superficie para su cultivo. Además, se obtiene una producción de aceite de 15 a 300 veces mayor que con otras especies para un mismo área y son los microorganismos con mayor capacidad para fijar el CO₂ (Yusuf Chisti, 2007).

Las algas necesitan, para transformar la energía solar en energía química, luz, CO₂, nutrientes y agua. La luz la obtienen del sol por lo que su utilización está limitada por el ciclo de luz natural y la variación estacional y restringida su viabilidad comercial a áreas con alta radiación solar. Se puede utilizar también luz artificial, aunque esta conlleva un mayor consumo energético y mayores emisiones de CO₂. El CO₂ que necesitan lo pueden fijar de la atmósfera, de emisiones de gases industriales y de los carbonatos solubles, siendo lo más común la alimentación externa, bien por las emisiones industriales o por carbonatos solubles.

Las microalgas pueden utilizar cualquier tipo de agua, lo que minimiza enormemente su consumo de agua dulce. En cuanto a los nutrientes necesarios para su crecimiento, fundamentalmente nitrógeno y fósforo, se tienen que adicionar en los sistemas de cultivo o captarlos de aguas residuales, siendo éste uno de los métodos actuales más efectivos para el tratamiento de aguas residuales.

Una vez que el interés biotecnológico de muchos de estos microorganismos autótrofos ha sido reconocido, el siguiente paso es el desarrollo de bioprocesos que vinculen los descubrimientos científicos a las necesidades comerciales.

El diseño y la optimización de biorreactores adecuados para cultivar estos microorganismos es una parte esencial de esta estrategia. Existen dos sistemas básicos para el cultivo de microorganismos foto autótrofos (Grobbelaar, 2000): En sistemas abiertos (estanques) y fotobiorreactores (FBRs) (Ho, 2011). Los sistemas abiertos son los más comunes para la producción comercial de microalgas y son una tecnología relativamente sencilla, cultivándose las microalgas en estanques de unos 20 a 50 centímetros de profundidad.

Los estanques de canales son los más empleados; suelen ser canales de hormigón ovalados donde el cultivo se recircula y mezcla para favorecer la estabilización del crecimiento y productividad de las microalgas. Las microalgas obtienen el CO₂ que necesitan por difusión desde la atmósfera o de emisiones de gases industriales, aunque a veces es necesario instalar difusores en el fondo del estanque. La producción mediante estanques tiene la gran ventaja de ser un método más barato que los FBRs, en inversión, mantenimiento y consumo energético. Sin embargo tiene desventajas, como su facilidad de contaminación, mezclado poco eficiente, la falta potencial de CO₂ y la limitación de la luz en las capas inferiores. En estos sistemas es difícil mantener una sola especie (se puede lograr extremando las condiciones ambientales) aunque esto sólo es válido para algunos tipos de algas: las denominadas extremófilas.

Los fotobiorreactores son sistemas cerrados transparentes, de plástico o vidrio, con geometrías de diversos tipos (tubulares, cilíndricas o planas). Su desarrollo es posterior al de los estanques y su configuración y geometría dependen de condiciones locales, del producto a obtener y de las especificaciones económicas del sistema. En estos sistemas se obtiene una mayor productividad, fundamentalmente porque mejora la eficiencia de la fotosíntesis y la capacidad de fijación del CO₂. Frente a los estanques, los FBRs necesitan un espacio menor y el coste de la recolección de la biomasa también es menor.

Otra ventaja muy importante es su mayor facilidad para mantener un monocultivo sin contaminación por otras especies, lo que permite obtener un producto de pureza apta para su procesado en la industria farmacéutica o alimentaria. Su desventaja fundamental es su coste, muy superior al de los estanques, por ser mayores los costes de inversión, de operación y de mantenimiento. Además, la productividad obtenida en los FBRs aún no es la máxima teórica.

El desarrollo y optimización de FBRs que permitan el cultivo económico de microalgas a gran escala, es aún hoy en día una de las mayores tareas a realizar (Ho, 2011). En la actualidad se están optimizando nuevos diseños de FBRs para mejorar su eficiencia y abaratar costes. De hecho, todas las plantas de producción operativas de microalgas a gran escala utilizan estanques abiertos (Molina Grima, 2003).

1.2.-Información de la institución donde se desarrolló el proyecto

1.2.1.-Historia del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

El Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG); es una universidad pública de tecnología, ubicada en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Es una Institución educativa pública de educación superior, que forma parte del Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos de México. El Instituto también está afiliado a la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES), zona Sur-Sureste.

Fue fundado el 22 de octubre de 1972, por el entonces Gobernador del Estado, Dr. Manuel Velasco Suárez, inicialmente con el nombre de Instituto Tecnológico Regional de Tuxtla Gutiérrez (ITRTG), posteriormente se llamaría el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).

Actualmente es considerada una de las dos máximas casas de estudios del estado de Chiapas, junto con la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Su lema es Ciencia y Tecnología con Sentido Humano y su actual director es el M.E.H José Luis Méndez Navarro.

- En los años 70's, llegó al estado de Chiapas el movimiento nacional de extensión educativa para la Educación, con la intervención del gobierno del estado de Chiapas ante la federación. Esta gestión dio lugar a la creación del Instituto Tecnológico Regional de Tuxtla Gutiérrez (ITRTG), hoy Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).
- El 23 de agosto de 1971, el Gobernador del Estado, Dr. Manuel Velasco Suárez, colocó la primera piedra de lo que pronto sería el centro educativo de nivel medio superior principal de la entidad.
- El 22 de octubre de 1972, con una infraestructura de dos edificios con ocho aulas, dos laboratorios y un taller en construcción abre sus puertas el Instituto Tecnológico Regional de Tuxtla Gutiérrez con las carreras de técnico en motores de combustión interna, en electricidad, en químico laboratorista y en máquinas y herramientas.
- En 1974 comenzó el nivel superior, con las carreras de Ingeniería Industrial en Producción e Ingeniería Bioquímica de Productos Naturales.
- En 1980, se amplía las oportunidades de educación para ingresar a las carreras de Ingeniería Industrial Eléctrica y de Ingeniería Química Industrial.
- En 1987 se abrió la carrera de Ingeniería en Electrónica.
- En 1989 se inicia el sistema abierto de la escuela secundaria y esta oferta se reorientó en el nivel superior de Ingeniería Eléctrica y Mecánica Industrial.
- En 1991 llega la licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales.
- En 1998 se estableció el programa de posgrado interinstitucional con la Universidad Autónoma de Chiapas para enseñar en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez la Maestría en Biotecnología.
- En el año 2012 se acredita el programa educativo de Ingeniería Mecánica, seguido por las carreras de Ingeniería en Electrónica e Ingeniería Industrial por el organismo acreditador CACEI.

1.2.2.- Escudo



Figura 1.1- Escudo ITTG

En 1974 ocupó el cargo de director del Instituto Ricardo Vidal Ramírez, quien vio la necesidad de adoptar un logotipo para identificar a la institución que se convirtió en el emblema de todos los miembros de la comunidad estudiantil y académica.

Puso en marcha la sesión en la que se invitó a los estudiantes, profesores y trabajadores de apoyo a presentar diseños para ser evaluados y seleccionar los más representativos, fue el estudiante de la carrera de técnico de combustión interna, Boanerges Nucamendi León, quien ganó el concurso entre 15 proyectos.

Se compone de un matraz en la parte central que representa las Ciencias Químicas en los lados se ve reforzada por dos rayos que representan la física que implican la electricidad y las áreas de electrónica, el matraz es apoyado por medio de un cojinete con 13 de bolas que representan las áreas relacionadas con la mecánica.

También representa los elementos que forman la base de la educación tecnológica que apoyan adecuadamente el desarrollo regional.

En el interior del matraz es un libro abierto que representa el conocimiento que se destila a verter en la sociedad, en el libro hay una flecha Chamula Lacandona atravesada, estos elementos representan las riquezas de la condición étnica de Chiapas.

Incluye la etiqueta redonda y arqueada de Tecnológico en la parte superior y Tuxtla Gutiérrez en la parte inferior, es necesario aclarar que, en el medio del libro fue inscrito con el número 27, esto correspondió a consecutiva que le fue asignado a la fundación de la institución, pero se retiró cuando el Instituto dejó de ser regional.

Los colores son representativos del Instituto de Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez: el rayo rojo, señales azules y blancas en el fondo.

1.2.3.- Misión

Formar de manera integral profesionales de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos

1.2.4- Visión

Ser una Institución de excelencia en la educación superior tecnológica del sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región.

1.2.5.- Valores

- El ser humano
- El espíritu de servicio.
- El liderazgo.
- El trabajo en equipo.
- La calidad.
- El alto desempeño.
- Respeto al medio ambiente.

1.2.6.- Oferta educativa

- Ingeniería en Gestión Empresarial
- Ingeniería en Sistemas Computacionales
- Ingeniería Bioquímica
- Ingeniería Industrial
- Ingeniería Mecánica
- Ingeniería Eléctrica
- Ingeniería Electrónica
- Ingeniería Química
- ingeniería logística
- Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
- Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica

Los principales laboratorios con los que cuenta el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez son:

- Microbiología
- Biotecnología
- Química
- Química pesada
- Mecánica
- Sistemas computacionales
- Ingeniería industrial
- Plantas piloto
- Polo Tecnológico Nacional

1.2.7.- Proyectos de vinculación exitosos con la industria

- Aprovechamiento integral del timbre
- Incremento en el contenido de sacarosa en la caña de azúcar
- Efectos del boro en la producción del cacahuete
- Factibilidad técnica en la extracción de aceites esenciales de la flora chiapaneca

1.2.8.- Localización

Carretera panamericana km 1080, Bulevares, Tuxtla Gutiérrez Chiapas

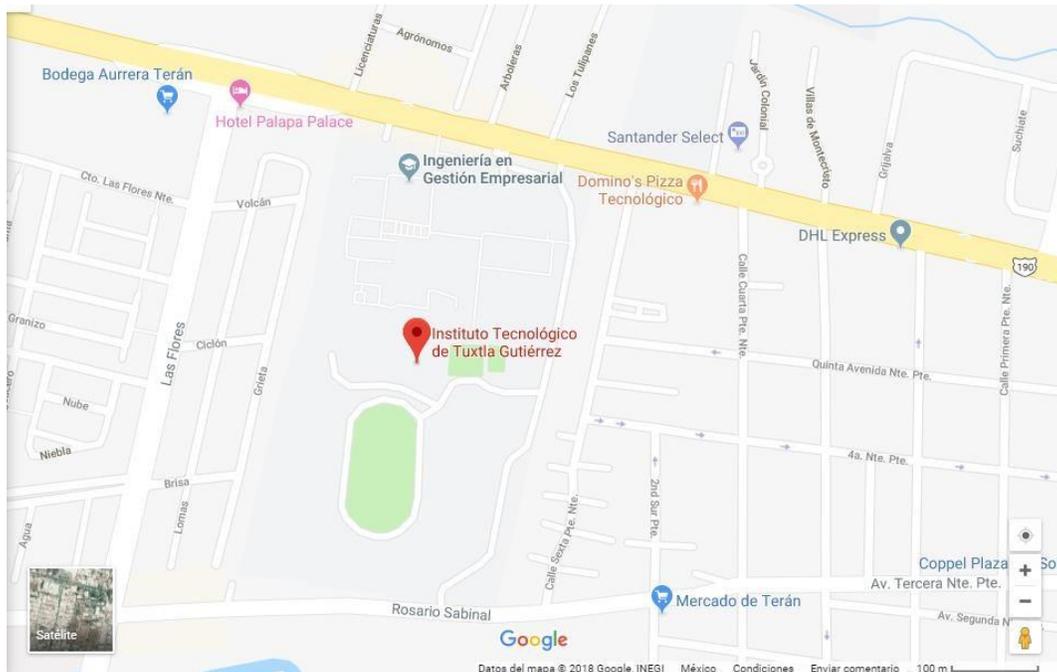


Figura 1.2- Localización ITTG

1.2.9.- Área específica relacionada directamente con el proyecto

El proyecto será realizado en el Laboratorio de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (Edificio I) y en el edificio del Polo Tecnológico de Biocombustibles (Edificio AA).

Polo Nacional de Pruebas Analíticas en Biocombustibles

La carrera de Ingeniería Electrónica tiene como misión “formar profesionales de excelencia con competencias en el ámbito de la Ingeniería Electrónica, motivados para la promoción del desarrollo profesional y el conocimiento científico y tecnológico, con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores cívicos y éticos”.

1.3.- Antecedentes

Las microalgas, como organismos fotosintéticos, son imprescindibles en el mantenimiento de la vida en la Tierra ya que proporcionan compuestos orgánicos reducidos y oxígeno para soportar al resto de la vida del planeta. Las microalgas son la principal fuente de producción fotosintética del planeta.

Como organismos unicelulares que son, tienen una capacidad de crecimiento y de generación de biomasa mucho mayor que las plantas superiores, ya que no necesitan arraigar o generar estructuras reproductoras, lo que les permite duplicarse en cuestión de horas.

Las condiciones óptimas de temperatura, intensidad luminosa, salinidad, nutrientes y pH para el cultivo de microalgas, varían ampliamente de una especie a otra, estos parámetros fisicoquímicos, han sido determinados en laboratorio y nos ayudan a comprender las condiciones óptimas para el desarrollo de las diferentes especies en cultivo. Actualmente a nivel comercial, los cultivos masivos de microalgas al exterior y los fotobiorreactores cobran mayor importancia para la producción de compuestos químicos de alta pureza, como: biocombustibles, biofertilizantes, intercambiadores iónicos y carotenos; así mismo, para el tratamiento de aguas residuales, obtención de compuestos terapéuticos y como alimento de consumo humano y animal (Contreras-Flores y col., 2003).

Las microalgas tienen una composición bioquímica compleja debida a la presencia del aparato fotosintético, que le da una gran riqueza en pigmentos y componentes como citocromos y ácidos poliinsaturados de cadena larga (PUFAs). Esto resulta en un elevado contenido en productos de alto valor, como los carotenoides luteína y antoxantina o los PUFAs DHA y EPA. Como captadoras de CO₂ y asimiladoras del nitrógeno, son además una fuente sostenible de biocombustibles y biofertilizantes.

El biodiesel de microalgas es el biocombustible más estudiado ya que las microalgas son la mejor fuente de lípidos convertibles a biodiesel debido a su elevado crecimiento. El parámetro clave para que la producción de este biodiesel sea factible es la productividad de lípidos, que depende tanto de la productividad de la biomasa de microalgas como del contenido celular de lípidos en la microalga. Un proceso ideal debería permitir alta productividad de lípidos con una alta productividad de biomasa y con el mayor contenido posible de lípidos en las células (Q. Li et al., 2008).

Desafortunadamente esta situación es muy difícil de obtener, dado que las células con alto contenido de lípidos se obtienen bajo condiciones de estrés fisiológico, el cual está asociado a condiciones limitantes de nutrientes y, por ello, se obtiene una baja productividad de biomasa. El contenido total de lípidos en las microalgas se suele encontrar entre el 20% y el 50% del peso seco, dependiendo de la especie y de las condiciones de cultivo (Yusuf Chisti, 2007).

Los factores que más afectan a la alta productividad de lípidos son la deficiencia de nutrientes (nitrógeno, fósforo, azufre y silicio), especialmente el nitrógeno (Gouveia &

Oliveira, 2009), y las altas intensidades luminosas, ya que incrementan la cantidad de triglicéridos.

A pesar del desarrollo de diferentes fotobiorreactores, pocos utilizan efectivamente la luz solar como energía para el cultivo microbiano. Un problema frecuente en diseño de fotobiorreactores es la provisión óptima de energía solar al aire libre, que todas las células tengan la misma exposición de luz, suministrar una relación área superficial/volumen (S/V) grande, que ocupe menos espacio terrestre, rápida transferencia de masa y que logre una mayor productividad (Janssen et al., 2000).

Para que el cultivo de micro algas sea eficiente es necesario diseñar fotobiorreactores que transmitan la mayor cantidad posible de luz, esto implica alta relación superficie/volumen (S/V) del reactor. De esta forma, la eficiencia de un fotobiorreactor es determinada en base a la captación, transporte, distribución y uso de la luz (Zijffers et al., 2008). Se han diseñado diferentes fotobiorreactores con propiedades específicas que pueden agruparse en tres tipos básicos: tubulares, de superficie plana (flat plate) y de tanque agitado. Los tubulares y de superficie plana son los más empleados considerando que utilizan luz solar.

Molina et al. (1999) sugieren que al escalar un fotobiorreactor tubular, el diámetro de la columna no sea mayor a 0.1 m y longitud continua de 80 m con flujo de velocidad de 0.3-0.5 m s⁻¹. Por su parte Sánchez et al. (2000) indican para un fotobiorreactor tubular vertical un diámetro de tubo no mayor a 0.2 m para que la disponibilidad de luz no se vea reducida. Sin embargo, estos diámetros pueden aumentarse si el reactor es diseñado con un sistema de iluminación interna. Las dificultades en el escalamiento surgen ya que los volúmenes de las zonas iluminadas y oscuras cambian a medida que aumenta el diámetro del tubo.

Es adecuado el uso de bases y tapas en acero inoxidable ya que además de resistir temperaturas de esterilización, se puede fijar un intercambiador de calor mediante una chaqueta térmica Sánchez et al. (2000). La tapa superior debe permitir la entrada de dispositivos que midan pH y oxígeno disuelto, dar salida de gases y en la base estará la entrada de gases y salida de líquido. Estos dispositivos de entrada y salida de gases, deben acompañarse de filtros de membrana para garantizar la esterilidad.

Controlar el pH, en ciertos límites, se dificulta ya que éste se incrementa continuamente debido al consumo de carbono en la fotosíntesis. El pH afecta la polaridad de los compuestos del medio de cultivo así como la disponibilidad de nutrientes, CO₂, hierro y ácidos orgánicos; puede ocurrir precipitación química de sales que contienen CO₃²⁻, OH⁻ y PO₄³⁻ llevando al deterioro del medio y posible daño celular. Existe un consenso general acerca de la preferencia de cianobacterias para el CO₂ (como fuente de carbono inorgánico), ya que se controla fácilmente y produce cambios menores de pH (Jacob-Lopes et al., 2008).

El estudio de la microalga ha sido notorio en muchos aspectos en la carrera por alcanzar el mejor biocombustible, gracias a las diversas investigaciones realizadas por diferentes instituciones públicas y privadas hoy tenemos un antecedente más amplio del cual podemos tomar datos y hacer revisiones para proyectos nuestros.

1.4.- Planteamiento del problema

El biocombustible renovable nos ayuda a satisfacer la creciente demanda de energía y es necesario para la sostenibilidad ambiental y el reducir el riesgo de cambio climático. El biocombustible derivado de cultivos oleaginosos (microalgas) es una alternativa potencialmente renovable capaz de satisfacer la demanda mundial de combustibles.

La complejidad de los bioprocesos, entre ellos la de los fotobiorreactores, han sido objeto de estudio y área abierta de investigación debido a la necesidad de contar con la identificación de sus parámetros principales y herramientas específicas para el modelado y simulación. El uso de los modelos matemáticos rigurosos son necesarios para realizar tareas de análisis, diseño, optimización, control y simulación.

Existen centros de investigación en Chiapas como ECOSUR que se encuentran trabajando en la producción de lípidos para la elaboración de biodiesel a partir de plantas como piñones y palma. Sin embargo, la producción de biocombustible basada en éste tipo de plantas, termina generando consecuencias devastadoras hacia el medio ambiente.

El impacto ambiental y las consecuencias sociales de su previsible producción y comercialización masiva generan un aumento de la deforestación de bosques nativos, la expansión indiscriminada de la frontera agrícola, el desplazamiento de cultivos alimentarios y para la ganadería y la destrucción del ecosistema y la biodiversidad.

Con base en esto, lo que se pretende es caracterizar el fotobiorreactor para hacer que el medio ambiente de crecimiento de la microalga sea lo más cercano posible a lo ideal, todo esto a través de una serie de pruebas o simulaciones, y así más adelante poder crear biomasa, la cual es indispensable para la creación del biocombustible.

1.5.- Nombre del proyecto

Modelado y simulación de un fotobiorreactor para la producción de biocombustible usando microalgas.

1.6.- Objetivos del proyecto

1.6.1.- Objetivo general

Desarrollar un esquema de pruebas de simulación de un fotobiorreactor para producir biocombustible a partir de microalgas

1.6.2.- Objetivos específicos

1. Conocer la teoría básica y estado del arte de los fotobiorreactores para producir biocombustible a partir de microalgas
2. Identificación del modelo dinámico de comportamiento del fotobiorreactor para producir biocombustible a partir de microalgas.
3. Desarrollar el esquema de simulación del proceso que valide al fotobiorreactor utilizando las diferentes herramientas de software existentes.

1.7.- Justificación del proyecto

El Biodiesel es una fuente de energía renovable que proporciona una garantía para la economía de los países al mismo tiempo que permite lograr un entorno verde sustentable. El uso combustible actual, en el sector transporte principalmente, es dependiente de combustibles derivados del petróleo y es ya insostenible debido al agotamiento de los suministros y a su comprobable daño al planeta en el cambio climático y por la emisión de gases contaminantes, como los de efecto invernadero. Por lo que existe la necesidad urgente de reducir estas emisiones y así evitar el calentamiento global.

Los biocombustibles a partir de microalgas son tecnologías que permitirán dar respuesta a las necesidades de combustibles líquidos de forma sustentable y contribuir a la seguridad energética local, regional y mundial. El biodiesel es biodegradable y durante su combustión produce menos emisiones nocivas. Además, las microalgas son microorganismos con mayor eficiencia fotosintética que los cultivos terrestres, y con esto contribuyen a la disminución de CO₂ de la atmósfera. Finalmente, las microalgas se pueden cultivar en terrenos no aptos para otros fines con agua que no se puede utilizar para la producción de alimentos. Además de utilizar tierras no cultivables y no requerir el uso de agua dulce, también podrían producir mayores volúmenes de biocombustibles por hectárea que otras fuentes.

Por todo ello, las microalgas se están convirtiendo en una fuente muy prometedora de biocombustible en un futuro inmediato y parecen ser la única fuente de biocombustible renovable capaz de satisfacer la demanda mundial de combustibles para el transporte. Por lo que, serán necesarios avances científicos y sistemas de control electrónicos para asegurar que los biocombustibles basados en la citada oleaginosa, puedan ser producidos con el beneficio ambiental deseado de emisiones de gases de efecto invernadero.

1.8.- Alcances y limitaciones

El alcance del trabajo es contar con el modelo de comportamiento del fotobiorreactor, disponer de un esquema de simulación del proceso del fotobiorreactor para validar los resultados teóricos con los datos reales del proceso, complementar el área de conocimiento para la consolidación de la línea de investigación de investigación de automatización de procesos.

En cuanto a las limitaciones hay que tomar en cuenta las siguientes:

- Materiales, Tiempo, Problemas imprevistos.
- Disponibilidad de acervo bibliográfico.
- Los problemas que el trabajo no resolverá, como son la manipulación química correspondiente al tratamiento de las microalgas.
- Presupuesto.

1.9.- Metodología para la realización del proyecto

La realización de este proyecto busca resolver los problemas de caracterización en los fotobiorreactores del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, la metodología a seguir es la siguiente:

1. Recopilación de información e investigación la teoría básica de fotobiorreactores para producir biocombustible a partir de microalgas (edo. del arte). Recabar información de la teoría básica y observaciones de los sistemas de adquisición de datos existentes en fotobiorreactores para producir biocombustible a partir de microalgas. Verificación de trabajos similares, apoyado en los registros e información generada en residencias anteriores, artículos de investigación y trabajos profesionales de tesis sobre el mismo tema.
2. Identificar el modelo dinámico de comportamiento del fotobiorreactor para producir biocombustible a partir de microalgas con el objetivo de establecer los parámetros y condiciones de operación en las que se utilizarán los sensores y actuadores.
3. Desarrollar un esquema de simulación del fotobiorreactor para producir biocombustible a partir de microalgas, mediante diferentes herramientas de Software. Implementación de un esquema de simulación que permita simular con diferentes herramientas de Software como Matlab-Simulink y Comsol al fotobiorreactor para producir biocombustible a partir de microalgas durante el proceso.
4. Pruebas de funcionamiento del esquema de validación con datos reales del fotobiorreactor para producir biocombustible a partir de microalgas utilizado. Pruebas de funcionamiento del esquema de validación a partir de datos reales del fotobiorreactor para producir biocombustible a partir de microalgas, para verificar el funcionamiento por partes y luego en su conjunto.

Además existen parámetros que se deben tener en cuenta para comprender los fenómenos hidrodinámicos que ocurren en el interior del fotobiorreactor como son: la velocidad del líquido, la velocidad del gas *Holdup* (Retención del gas) y la velocidad del sólido cuando se tiene en cuenta una tercera fase. Por otra parte en las últimas décadas se han utilizado software de tipo comercial para la simulación de procesos químicos, debido a sus claras ventajas frente a los datos experimentales, uno de estos factores es la reducción de costos a la hora de encontrar soluciones a problemas de procesos de producción; en este caso al cultivo de microalgas para fotobiorreactores (Cortes *et al.*, 2013).

Para desarrollar el modelamiento hidrodinámico de un Fotobiorreactor *Airlift* se utilizó el modelo propuesto por García Calvo (1999) para el sistema de tres fases (sólido, líquido, gas) en los Reactores *Airlift*. Este modelo es una extensión del modelo de dos fases propuesto. Este se desarrolló a partir de balances de energía para determinar la energía de disipación en la interfase gas-líquido y las pérdidas por fricción que ejerce el fluido con las paredes del sistema. Los parámetros hidrodinámicos más importantes para predecir el modelo son: la velocidad de circulación del líquido y del sólido, la retención del gas y la distribución de los sólidos dentro del reactor.

Este modelo es el más completo en comparación con otros reportados en la literatura, ya que es el único capaz de identificar las fronteras entre los diferentes regímenes de flujo y soporta grandes cargas de sólidos, al obtener un aumento en la producción de biomasa requerida para la extracción de lípidos u otras moléculas de alto valor agregado.

Para predecir el comportamiento de cultivo de microalgas en un reactor *Airlift*, es necesario determinar los parámetros hidrodinámicos más importantes para mantener un ambiente óptimo para la producción de biomasa, estos parámetros son: la retención del sólido en el *Riser* y *Downcomer*, la retención del gas en el *Riser* y la velocidad superficial del líquido en el *Downcomer*.

La Figura presenta la variación entre la velocidad del gas en el *Riser*, la concentración de biomasa producida por la microalga y la retención del gas en el *Riser*, se demuestra que al aumentar el caudal de gas y la concentración de biomasa, la retención de gas en el *Riser* aumenta debido a que se genera una mayor cantidad de burbujas, las cuales son las encargadas de incrementar la concentración de gas en la fase líquida, para generar una mayor producción de biomasa, debido a que el microorganismo tiene una mayor facilidad de

encontrar los nutrientes suspendidos en el líquido provocado por el flujo heterogéneo.

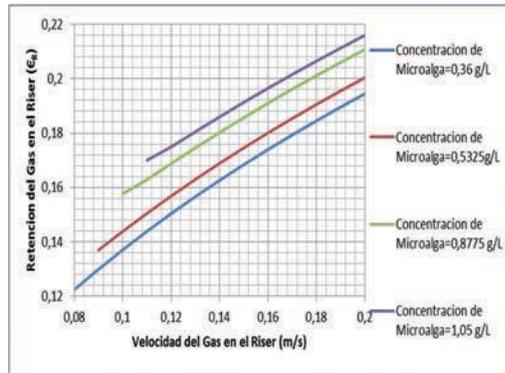


Figura 1.4.- Retención del gas en el riser respecto a la velocidad del gas para cultivos microalgales.

Ruiz (2015) propone el diseño de un sistema de supervisión y monitoreo automático, el cual se encuentra basado en el estudio de un fotobiorreactor tubular de crianza para cultivo de microalgas de las especies *dunaliella tertiolecta* y *spirulina platensis*. Ella llama Opto 22 a su sistema de hardware y software, además analiza el comportamiento basándose en un modelo matemático, aplicando diferentes estrategias de control, entre las que se encuentran PID, variables de estado y GPC (Control Predictivo Generalizado), lo cual otorga una visión amplia para determinar la mejor estrategia de monitoreo y de control. Los parámetros que se toman en cuenta para el diseño del sistema son la temperatura, pH y la luminosidad, correlacionando éstas variables al crecimiento de las microalgas.

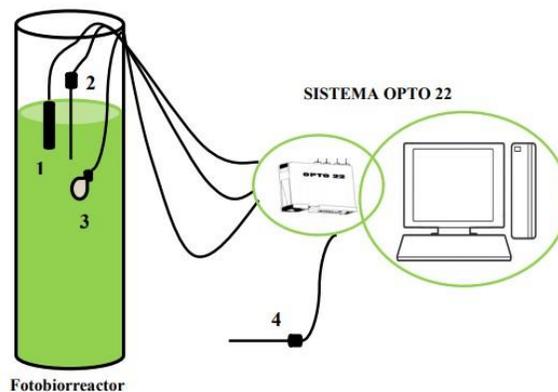


Figura 1.5.- Sistema opto 22

CAPITULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.- Introducción de Microalgas

Se conoce como microalgas al conjunto de microorganismos unicelulares eucariotas y procariotas (cianobacterias) que sintetizan una gran cantidad de clorofila a y otros pigmentos que define su coloración verde, les permite realizar la fotosíntesis y actuar como productores primarios en la generación de energía química a partir de energía lumínica; varían en cuanto a tamaño, toxicidad, grosor de la pared celular, movilidad y composición química.

Las microalgas son microorganismos que se encuentran en diversos ambientes naturales y presentan varios tipos de adaptaciones para su crecimiento por lo que pueden vivir en agua dulce o salada. Existen alrededor de 300.000 especies de microalgas, pertenecen al reino Plantas y sus divisiones son: *Cryptophyceae*, *Dinophyceae*, *Prymnesiophyceae*, *Chrysophyceae*, *Bacillariophyceae*, *Dictyochophyceae*, *Euglenophyceae* y *Clorophyceae*.

Las condiciones necesarias de temperatura, nutrientes, pH, presión, salinidad, aireación y concentración de CO₂ en los medios de cultivo varían entre especies e influyen en la cantidad de biomasa final generada en un tiempo determinado.

El cultivo de microalgas puede ser desarrollado en condiciones extremas o normales, dependiendo de la especie en estudio los requerimientos nutricionales varían. Las estrategias que utilizan las microalgas para adaptarse a las condiciones extremas son varias. Entre las más importantes se puede mencionar: la producción de sustancias mucilaginosas extracelulares para protegerse del estrés hidrodinámico, la acumulación de moléculas osmorreguladoras en condiciones salinas, la síntesis de pigmentos fotoprotectores para la respuesta a altas intensidades de luz; y la acumulación de lípidos en condiciones limitadas de nitrógeno.

Además de las estrategias de supervivencia que tienen algunas especies de microalgas, las condiciones extremas evitan la contaminación de los cultivos en producción a gran escala, puesto que los cultivos se convierten en selectivos, y de esta manera impiden el crecimiento de otras microalgas que puedan generar competencia en el sistema de cultivo. Las especies de microalgas que no crecen en medios

Selectivos desarrollan estrategias de crecimiento diferentes a las microalgas extremófilas y por lo tanto es importante estudiar la influencia que ciertos factores tienen sobre el crecimiento celular; dichos factores podrían ser: cantidad de luz recibida, concentración de CO₂ suministrada, pH, temperatura del cultivo y sistema de producción.

2.2 Importancia de la microalgas

Las microalgas poseen una capacidad ficorremediadora que consiste en la eliminación o biotransformación de contaminantes de un medio líquido o gaseoso. Estos compuestos contaminantes son captados por la biomasa algal y pueden ser recuperados mediante su cosecha. Esta capacidad resulta en un sistema de cultivo con 2 propósitos: eliminación de contaminantes y producción de biomasa con fines comerciales. Ambos objetivos dependen del sistema de cultivo, la o las especies cultivadas y los factores ambientales. La utilización de medios contaminados en el cultivo impacta directamente en los costos de producción.

La elección del tipo de sistema de cultivo es importante, y debe realizarse en base a factores biológicos, técnicos, ambientales y económicos, definidos previamente. La cosecha de la biomasa algal es el procedimiento más complejo y costoso en el cultivo de microalgas, existiendo varias técnicas diferentes tanto en eficiencia como en complejidad. La producción de biomasa de microalgas ha proporcionado una amplia gama de productos biotecnológicos con usos en la industria alimenticia, salud y medicina humana, alimentación animal, compuestos orgánicos y biocombustibles. Todo esto adquiere una gran importancia debido a los problemas ambientales globales existentes en la actualidad.

2.3.-Especies de microalgas

La elección de las especies a cultivar depende directamente de la finalidad que se le desea brindar a la biomasa resultante (e.g., pigmentos, alimento) y/o si el cultivo es para ficorremediación. Las especies algales predominantes dentro de un sistema abierto dependen de factores ambientales, operacionales y parámetros biológicos. En un sistema cerrado se pueden lograr cultivos monoespecíficos aislados del medioambiente. Las microalgas en un cultivo para ficorremediación deben cumplir con 3 condiciones: alta tasa de crecimiento; alta tolerancia a la variación estacional y diurna si es un sistema abierto; y buena capacidad para formar agregados para una cosecha por simple gravedad. Además, altos niveles de componentes celulares valiosos (por ejemplo lípidos para generación de biodiesel) también podrían ser deseables.

Algunas especies presentes en aguas contaminadas son utilizadas en tratamientos de aguas residuales por su elevada tolerancia. Además, varias de éstas también son utilizadas para fines comerciales específicos. Los géneros *Chlorella*, *Ankistrodesmus*, *Scenedesmus*, *Euglena*, *Chlamydomonas*, *Oscillatoria*, *Micractinium*, *Golenkinia*, *Phormidium*, *Botryococcus*, *Spirulina*, *Nitzschia*, *Navicula* y *Stigeoclonium* han sido registrados en aguas residuales desde distintas procedencias, varias de éstas son comercialmente interesantes para la alimentación humana y/o animal, la obtención de biocombustibles, aceites esenciales, pigmentos, entre otros.

2.4.-Cultivo de microalgas

Para el cultivo de las microalgas, es necesario el estudio de varios factores. El primer factor es el requerimiento nutricional de la microalga para su crecimiento. En este desempeña un papel fundamental la fuente de carbono y la intensidad de luz que aprovecha la microalga para realizar fotosíntesis.

El segundo factor es el modo de operación en el que va a trabajar el sistema de cultivo. Para este caso se debe decidir si el modo discontinuo es más adecuado que el modo continuo para la producción de una determinada concentración de microalgas.

El tercer factor es el sistema de cultivo. Es necesario reconocer qué sistema es más eficaz para la producción de un determinado volumen de biomasa microalgal y tener claras cuáles son las desventajas y las ventajas que aportan los sistemas abiertos frente a los sistemas cerrados o viceversa.

Finalmente, el diseño de un sistema de cultivo bajo un modo de operación es uno de los principales factores que necesitan ser evaluados y optimizados. El diseño óptimo de un sistema abarca criterios de luz, burbujeo, control de temperatura y control de pH, y le permite a la microalga alcanzar la mayor concentración de biomasa al final del tiempo de crecimiento

2.5.- Factores del cultivo de microalgas

Las microalgas requieren para su correcto crecimiento un balance adecuado de diferentes nutrientes y condiciones ambientales.

Son varios factores influyentes en el cuidado de las microalgas, ya que estos estimulan el comportamiento celular de la microalga, Igualmente es elemental examinar todas las variables involucradas en el cultivo, tales como:

2.6.-Luz

La intensidad de la luz es uno de los factores más importantes para el crecimiento fotosintético de las microalgas. Los sistemas de cultivos de microalgas pueden ser iluminados por luz artificial, luz solar o ambas. Entre los sistemas de cultivo de algas con iluminación natural con grandes áreas de iluminación se encuentran los estanques abiertos, los llamados platos planos o flat plates, los airlift tubulares o de tipo serpentín y los de tipo inclinado, entre otros.

Los sistemas de biorreactores empleados a nivel laboratorio son iluminados interna o externamente por luz artificial con lámparas fluorescentes y diodos emisores de luz (light emitting diodes, LED) entre otros.

2.7.-Intensidad

La tasa fotosintética y la intensidad lumínica se relacionan por medio de una cinética de Michaelis-Menten (Figura 2.0). La tasa fotosintética aumenta con la intensidad hasta el punto de saturación, que varía en función de la especie y las condiciones ambientales. A partir del punto de saturación lumínica la tasa fotosintética se mantiene constante hasta un nivel en el que empieza a descender.

A intensidades bajas el crecimiento está limitado por la falta de luz, en este punto la eficiencia en el aprovechamiento de la luz es muy alta, toda la luz incidente se aprovecha en la fotosíntesis. Las microalgas que se desarrollan a bajos niveles de intensidad lumínica presentan una cantidad mayor de pigmentos fotosintéticos por lo que son más eficientes en el aprovechamiento de la luz.

2.8.-Burbujeo

El burbujeo, la aireación o el mezclado pueden ser realizados mediante el empleo de paletas como en el caso de los fotobiorreactores de tipo carrusel, o por medio de bombas como en el caso de los fotobiorreactores de tipo panel y de tipo tubular. Esto facilita el intercambio gaseoso entre el cultivo y la atmósfera.

El mezclado evita la sedimentación de las microalgas y le permite a cada célula el acceso a la zona fótica. Cuando se optimiza el mezclado los fotobiorreactores pueden generar productividades altas debido a que el intercambio gaseoso es adecuado.

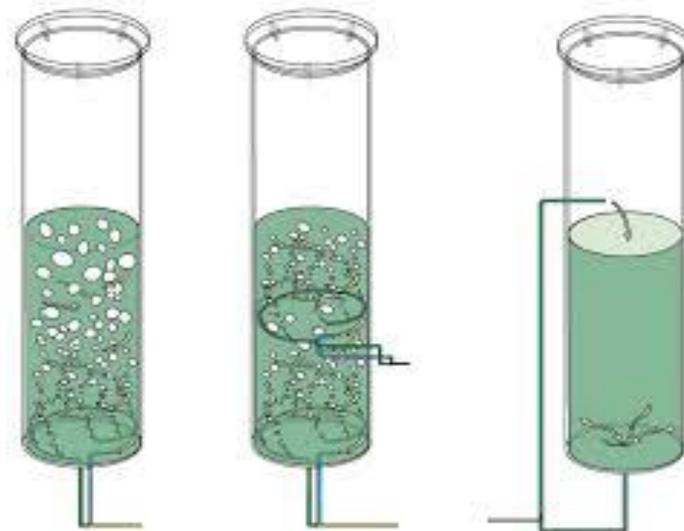


Figura 2.1- Burbujeo de un fotobiorreactor.

2.9.-Temperatura

La producción algal aumenta proporcionalmente con la temperatura hasta alcanzar la temperatura óptima de cada especie. Por encima de esta, aumenta la respiración y la fotorrespiración reduce la productividad global. La temperatura óptima varía entre las especies, pero en general está entre 28° y 35°C.

En un sistema de cultivo cerrado, la temperatura se puede controlar por varios mecanismos, tales como rociadores de agua, inmersión del colector solar en piscinas, reactor dentro de un invernadero, etc. Por el contrario, en un sistema de cultivo abierto es muy difícil de controlar, aunque se pueden realizar ciertas acciones simples para disminuir el efecto, como cubrir los estanques con plásticos transparentes.

2.10.-PH

Las microalgas tienen diversos requerimientos de pH para su crecimiento. A niveles de pH alcalinos, la disponibilidad de CO₂ puede ser limitante para el crecimiento y la fotosíntesis de microalgas. El rango de pH para la mayoría de los cultivos de microalgas está entre 7 y 9, con un rango óptimo de 8.2 a 8.7. Un pH óptimo en el cultivo generalmente es mantenido gracias a la aeración con aire enriquecido con CO₂. En el caso de los cultivos de alta densidad celular, la adición de dióxido de carbono corrige un incremento del pH, el cual puede llegar a un valor límite de 9 para el crecimiento de la microalga.

Algunos autores coinciden que el crecimiento de las microalgas es óptimo a un pH neutro de 7.5. Por lo general, soluciones amortiguadoras son añadidas a los medios de cultivo con la finalidad de ajustar y mantener el pH del medio. El pH se incrementa conforme la edad del cultivo es mayor, esto es debido a la acumulación de minerales y a la oxidación de nutrimentos. Por lo tanto, es recomendado que el pH inicial del medio de cultivo se ajuste a 6.5 antes de ser inoculado.

2.11.-Nutrientes

El nitrógeno es el nutriente más importante para las microalgas (después del carbono) y se incorpora como nitrato (NO₃⁻) o como amonio (NH₄⁺). Es también un factor crítico para regular el contenido de lípidos de las microalgas. Típicamente, las microalgas tienen un contenido lipídico aproximadamente del 20%, pero cuando el nitrógeno se convierte en el factor limitante del crecimiento, la acumulación de los niveles de lípidos aumenta en más de 40%. Sin embargo, usando la limitación de nitrógeno para estimular la acumulación de lípidos en las células de algas, a menudo reduce la producción de algas, lo que sugiere que las 2 condiciones, alto contenido en lípidos y alta productividad, pueden ser mutuamente excluyentes. El fósforo es fundamental en muchos procesos celulares, tales como la formación de ácidos nucleicos y transferencia de energía. Aunque el contenido en fósforo de las microalgas es menor al 1%, su deficiencia en el medio de cultivo es una de las mayores limitaciones al crecimiento.

2.12.-Producción de la biomasa de microalgas

Las microalgas han despertado un enorme interés debido a que son microorganismos fotosintéticos que se caracterizan por su rápido crecimiento, las células se duplican en un periodo de 1 a 10 días, tienen un alto contenido lipídico (más del 50% en peso de materia seca en algunos casos) y utilizan menos superficie para su cultivo. Además, se obtiene una producción de aceite de 15 a 300 veces mayor que con otras especies para una misma área y son los microorganismos con mayor capacidad para fijar el CO₂.

Las algas necesitan, para transformar la energía solar en energía química, luz, CO₂, nutrientes y agua. La luz la obtienen del sol por lo que su utilización está limitada por el ciclo de luz natural y la variación estacional y restringida su viabilidad comercial a áreas con alta radiación solar. Se puede utilizar también luz artificial, aunque esta conlleva un mayor consumo energético y mayores emisiones de CO₂. El CO₂ que necesitan lo pueden fijar de la atmósfera, de emisiones de gases industriales y de los carbonatos solubles, siendo lo más común la alimentación externa, bien por las emisiones industriales o por carbonatos solubles.

Las microalgas pueden utilizar cualquier tipo de agua, lo que minimiza enormemente su consumo de agua dulce. En cuanto a los nutrientes necesarios para su crecimiento, fundamentalmente nitrógeno y fósforo, se tienen que adicionar en los sistemas de cultivo o captarlos de aguas residuales, siendo éste uno de los métodos actuales más efectivos para el tratamiento de aguas residuales.

La producción de biodiesel a partir de microalgas es un proceso formado, en términos generales, por las etapas elementales de producción de biomasa rica en lípidos, recuperación o cosecha de la biomasa, extracción de lípidos y transesterificación (Vélez, 2013). Esta sección se centrará en las tres primeras etapas.

2.12.1-Métodos de cultivo

Una vez que se lleva a cabo la selección del tipo de microalga idónea para obtener el producto de interés, se hace necesario el desarrollo de una amplia gama de procesos biológicos que hagan viable su comercialización. Por lo tanto, el diseño y optimización de biorreactores adecuados para cultivar estos microorganismos es un paso importante en la estrategia que apunta a transformar los hallazgos científicos en un producto comercializable.

Desde un punto de vista comercial, un sistema de cultivo de microalgas debe tener las siguientes características, tantas como sea posible: elevada productividad/área; alta productividad volumétrica; economicidad (tanto en términos de costes de inversión y mantenimiento); facilidad de control de los parámetros del cultivo (temperatura, pH, O₂, turbulencia), y fiabilidad. Los diferentes diseños en los sistemas de cultivo intentan lograr estas características de manera distinta. Actualmente existen sistemas de cultivo de microalgas destinados a la obtención de productos de alto valor agregado (pigmentos carotenoides, ácidos grasos esenciales - ω₃ y ω₆ -, compuestos isotópicos, farmacéuticos - anticancerígenos y antibióticos -, vitaminas C y E, etc.), no obstante ante la escasa flexibilidad económica del

mercado de los biocombustibles, la optimización de tales sistemas de producción mediante adecuadas estrategias de modelado y control resulta necesaria.

2.12.2.-Sistemas abiertos

Los sistemas de cultivo abiertos se han estudiado ampliamente en los últimos años pero estos sistemas de cultivo de microalgas se han utilizado desde 1950. Son los sistemas empleados con mayor frecuencia en la producción de biomasa de microalgas, además de ser los sistemas comerciales de gran tamaño más utilizados actualmente; que a pesar de sus formas y tamaños diversos, destacan por asemejar el entorno natural de las microalgas. Los cultivos abiertos comprenden i) sistemas naturales (lagos, lagunas, estanques) y artificiales, ii) de superficie inclinada y iii) estanques tipo circuito (“raceway ponds”), siendo estos últimos son los de uso más extendido.

Las producciones y productividades biomásicas factibles en estos últimos sistemas son bajas, próximas a $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ y a $10\text{-}25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectivamente. Las ventajas inherentes a los cultivos abiertos radican en su sencillez y su bajo costo de inversión en contraste con los sistemas cerrados, a causa de la diversidad de materiales útiles para su construcción (concreto, tierra, plástico, etc.) y la facilidad que ofrecen para su operación y mantenimiento, y por presentar una capacidad de producción mayor.

Además, pueden utilizar la luz solar, y los nutrientes se pueden proporcionar a través del escurrimiento de agua de las zonas terrestres cercanas o canalizando aguas procedentes de aguas residuales/plantas de tratamiento de aguas, por lo que es el método más barato de la gran producción de biomasa algal.



Figura 2.2- Cultivo de microalgas en estanques.

Aunque estos sistemas son los más utilizados a nivel industrial, al aire libre, los sistemas todavía presentan desafíos técnicos significativos. En general, los estanques son

susceptibles a las condiciones climáticas, no permitiendo el control de la temperatura del agua, la evaporación y la iluminación, que hacen que estos sistemas dependan de las condiciones climáticas imperantes de la región (rango de temperatura diaria y anual, tasa de precipitación anual, número de días de sol, y grado de la cobertura de nubes). También presentan transferencia limitada de CO₂ al cultivo por su baja concentración en el aire (0.035% v/v), su difusión hacia la atmósfera, y por el control limitado de las condiciones de cultivo. Por otra parte, la contaminación por los depredadores y otros heterótrofos de rápido crecimiento (excepto en cultivos de especies extremófilas), han restringido la producción comercial de algas en los sistemas de cultivo abiertos. Por consiguiente, este tipo de cultivo se limita estrictamente a especies de algas que pueden ser cultivadas en dichos sistemas. Como resultado, sólo *Dunaliella* (adaptable a salinidad muy alta), *Spirulina* (adaptable a alta alcalinidad) y *Chlorella* (adaptable a medios ricos en nutrientes) se han cultivado con éxito en los sistemas comerciales de estanque abierto. Otros inconvenientes son el requerimiento de superficies extensas, amplios períodos de producción (de 6 a 8 semanas), producciones reducidas de biomasa y penetración limitada de la luz.

El tipo de sistemas abiertos de estanques naturales y artificiales sólo son viables cuando se dan una serie de condiciones. Se requieren de condiciones climáticas favorables y de nutrientes, y también que el agua presente características selectivas (por ejemplo, la alta salinidad, pH alto) para garantizar la existencia de un monocultivo. El sistema inclinado (sistema de cascada) es el único sistema abierto que alcanza altas densidades celulares sostenibles (hasta 10 g L⁻¹). Este sistema es muy adecuado para las algas tales como *Chlorella* y *Scenedesmus*, que pueden tolerar bombeo en secuencias repetidas [86]. En estos sistemas inclinados la turbulencia se genera por la gravedad, la suspensión de cultivo fluye desde la parte superior a la parte inferior de una superficie con pendiente, por lo tanto se alcanza un flujo altamente turbulento y permite la adopción de capas de cultivo muy finas (<2 cm), lo que facilita una mayor concentración celular y una relación más alta superficie/volumen (s/v) en comparación con los estanques circulares. Los estanques tipo Raceway son el sistema artificial más utilizado. Se trata de un circuito cerrado, con canales de recirculación en forma ovalada, generalmente entre 0,2 y 0,5 m de profundidad, con mezcla y la circulación necesaria para estabilizar el crecimiento de algas y la productividad (Tabla VI). En un ciclo de producción continua, el caldo de cultivo y los nutrientes son introducidos en oposición a donde se sitúen las paletas y circulan a través del bucle hacia el punto de extracción de la cosecha. La rueda de paletas opera en continuo para evitar la sedimentación.

2.12.3.-Sistemas cerrados

Los sistemas cerrados, fotobiorreactores (PBR), en contraste con los abiertos, se caracterizan por ofrecer numerosas ventajas tales como pérdidas mínimas de CO₂, riesgo reducido de contaminación, control y reproducibilidad de las condiciones de cultivo, ahorro de agua y nutrientes, menores requerimientos de superficie, flexibilidad de diseño, cortos períodos de producción (de 2 a 4 semanas) y productividades considerablemente superiores a los sistemas abiertos (de 5 a 13 veces) [87]. Estos sistemas reciben la luz del sol directamente

a través de las paredes del recipiente transparente o por medio de fibras de luz o tubos que se canalizan desde los colectores de luz solar. Con el propósito de coleccionar la mayor cuantía de energía solar por unidad de superficie posible, presentan configuraciones diversas, i) tubulares (vertical, horizontal, helicoidal, conformación α), ii) de paneles planos y iii) columnas de burbujeo, (Ver Tabla VI) [83]. Los reactores tubulares y de panel plano son los de uso más frecuente; habitualmente están formados por dos unidades, una de recolección de luz y otra de transferencia de gases. La consideración de factores tales como la luz, la razón CO_2/O_2 , la temperatura, los nutrientes, la salinidad, el pH, entre otros, resulta trascendental para el diseño de sistemas cerrados.

Las altas productividades inherentes a estos sistemas precisan de una penetración y distribución óptima de la luz, condición que a su vez requiere de materiales de construcción transparentes y de relaciones superficie/volumen elevadas. Sin embargo, la intensidad de la luz incidente debe ser moderada, de lo contrario se presentan fenómenos de fotoinhibición y foto-blanqueo. Asimismo, la relación CO_2/O_2 debe ser tal que la proporción de O_2 sea mínima y por consiguiente, sean impedidos procesos de foto-respiración y daño foto-oxidativo. Actualmente, la principal desventaja de los sistemas cerrados consiste en sus elevados costos, atribuidos en mayor medida a la energía invertida en la agitación mecánica de los cultivos con la finalidad de evitar la sedimentación y favorecer la transferencia de gases.

1) Fotobiorreactores tubulares

Los fotobiorreactores tubulares (Fig. 9) pueden ser horizontal/serpentin [88], casi horizontal [89], vertical [90], inclinado [91] y de forma cónica [92]. Las microalgas se hacen circular a través de los tubos con el uso de una bomba, o preferiblemente con tecnología airlift. En general, estos sistemas son relativamente baratos (en comparación con el resto de sistemas cerrados), tienen un área de iluminación de gran superficie y productividades de biomasa bastante buenas. Las desventajas incluyen la formación de incrustaciones, un cierto grado de crecimiento en la pared, el oxígeno y el CO_2 disueltos a lo largo de los tubos, y los gradientes de pH que conducen a una frecuente re-carbonatación de los cultivos, que en consecuencia aumenta el costo de producción de algas.



Figura 2.3- Fotobiorreactores tubulares.

2) Fotobiorreactores planos, “flat plate”

Uno de los tipos de sistemas cerrados que han sido investigados con especial atención son los fotobiorreactores planos, debido a la gran área de superficie expuesta a la iluminación y la alta densidad ($> 80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) de las células. En estos fotobiorreactores, una capa delgada muy densa de cultivo se mezcla a través de un panel plano transparente, que permite la absorción de radiación en los primeros milímetros de espesor. Son adecuadas para cultivos en masa de microalgas, debido a la baja acumulación de oxígeno disuelto y la alta eficiencia fotosintética alcanzada en comparación con los diseños tubulares. Por lo general, los paneles son iluminados principalmente por un lado por la luz solar directa, y tienen la ventaja adicional de que pueden colocarse en posición vertical o inclinada en un ángulo óptimo de cara al sol que permite una mayor eficiencia en términos de energía absorbida de la luz solar incidente (Fig. 10). Entre las limitaciones se incluyen la dificultad de controlar la temperatura de cultivo, cierto grado de crecimiento en la pared, el escalado requiere muchos compartimentos y materiales de apoyo, y presenta la posibilidad de estrés hidrodinámico para algunas cepas de algas.

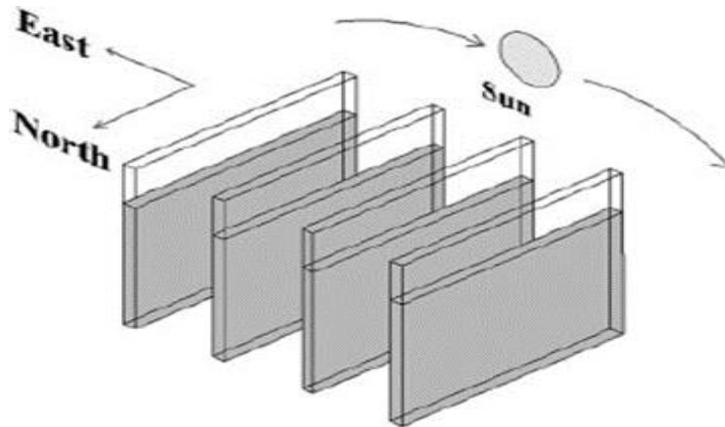


Figura 2.4- Esquema de orientación solar de un sistema de fotobiorreactores planos para el cultivo al aire libre.

3) Fotobiorreactores de columna

Los fotobiorreactores de columna a veces son de tipo tanque agitado, pero más a menudo columnas de burbujas o airlifts. Las columnas se colocan verticalmente, se airean desde el fondo, y se iluminan a través de las paredes transparentes, o internamente. Biorreactores de tipo columna ofrecen la mezcla más eficiente, las mayores tasas volumétricas de transferencia de gas, y las mejores condiciones de crecimiento controlables. Son de bajo costo, compactos y fáciles de operar. Su rendimiento (es decir, concentración final de biomasa y tasa de crecimiento específico) se compara favorablemente con los valores reportados para los fotobiorreactores tubulares típicos.

Las columnas de burbujeo verticales y cilindros airlift pueden alcanzar un aumento sustancial incrementando el movimiento radial del fluido que es necesario para la mejora en

los ciclos de luz-oscuridad. Estos diseños de reactores tienen una baja superficie/volumen. En consecuencia, los cultivos sufren menos de la fotoinhibición y de la foto-oxidación.

Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos han sido propuestos como una alternativa económica para la producción de biodiésel a gran escala. En términos generales, tales sistemas consisten en una etapa inicial de producción de biomasa en fotobiorreactores cerrados, en la cual los microorganismos son mantenidos en crecimiento continuo bajo condiciones de suficiencia de nutrientes, etapa que es seguida por una fase de acumulación de producto (lípidos) en estanques abiertos, inducida mediante la deficiencia de nutrientes.

2.13.-Métodos de recolección

Una vez que la biomasa de microalgas ha sido producida en alguno de los sistemas descritos, se da inicio a la etapa de cosecha o recolección, cuyo propósito es el de remover el agua y concentrar las células microalgales para su posterior procesamiento. Esta etapa influye notablemente en los costos de producción del biodiésel, por lo que la selección de una técnica de recolección eficiente y de bajo costo es trascendental.

Teniendo en cuenta la concentración de biomasa relativamente baja que se obtiene en los sistemas de cultivo de microalgas, debido al límite de penetración de la luz (típicamente en el intervalo de 1-5 g•L⁻¹), y el pequeño tamaño de las células de microalgas (en el intervalo de 2-20 μm de diámetro), los costes y el consumo de energía para la cosecha de la biomasa son una preocupación importante que debe abordarse adecuadamente. En este sentido, la recolección de cultivos de microalgas se ha considerado como un importante cuello de botella para el procesamiento a escala industrial de microalgas para la producción de biocombustibles. El costo de la recuperación de la biomasa del caldo puede suponer hasta el 20-30% del coste total de la producción de la biomasa. La centrifugación, sedimentación, filtración y floculación, ya sea individualmente o combinados, son los procedimientos de cosecha más comunes, cuya aplicación depende de las propiedades de la especie de microalga cultivada (morfologías particulares, presencia de vacuolas gaseosas, etc.), ya que algunas presentan características que facilitan su recolección.

Generalmente, la recolección de microalgas es un proceso que se lleva a cabo en dos etapas, que implica: i) Recolección masiva: etapa destinada a la separación de la biomasa de la suspensión. Los factores de concentración para esta operación son generalmente 100-800 veces para llegar a 2 a 7% de materia sólida total. Esto dependerá de la concentración inicial de biomasa y de las tecnologías empleadas, incluidas floculación, flotación o sedimentación por gravedad. ii) Espesamiento: el objetivo es concentrar la suspensión a través de técnicas tales como la centrifugación o filtración.

2.14.-Filtración

La filtración es el método de cosecha que ha demostrado ser el más competitivo en comparación con otros métodos de recolección. Hay distintos tipos de filtración: i) microfiltración, ii) ultrafiltración, iii) filtración a vacío, iv) filtración de flujo tangencial, etc. La filtración resulta conveniente para especies de microalgas de tipo filamentosa o capaces de

formar colonias; cabe mencionar que esta operación a gran escala presenta inconvenientes tales como la obstrucción de los filtros, formación de tortas de filtración compresibles y altos costos de mantenimiento, y requisitos previos de concentración.

2.15.-Centrifugación y sedimentación

La centrifugación implica la aplicación de fuerzas centrífugas para separar la biomasa de microalgas del medio. Una vez separada, las microalgas pueden separarse por drenaje del medio de cultivo. La aplicación de la sedimentación o de la centrifugación podría ser factible en microalgas con diámetros mayores a los 5 μm y paredes celulares relativamente gruesas. A pesar del frecuente empleo de la sedimentación en la acuicultura, su principal desventaja es la larga duración de esta operación. Por su parte, la centrifugación sólo resulta conveniente para productos de alto valor agregado, ya que implica altos costos y demanda un elevado consumo de energía. Además, las altas fuerzas de gravedad y de corte durante el proceso de centrifugación pueden dañar la estructura celular.

2.16.-Flotación

Algunas cepas tienden a flotar naturalmente en la superficie del medio de cultivo como en el caso de un aumento en el contenido de lípidos. A pesar de mencionar la flotación como método de posible método de cosecha, son muy pocas las pruebas de su viabilidad técnica o económica.

2.17.-Floculación

La floculación es otro procedimiento común de cosecha, el cual consiste en la aglomeración y posterior sedimentación o flotación de la biomasa de microalgas. Puede ser inducida de diversos modos. La floculación mediante la adición de sales inorgánicas (alúmina, cloruro férrico, óxido de calcio) no es recomendada por su alto costo y por contaminar la biomasa, de manera tal que ésta no puede ser utilizada posteriormente como alimento. El uso de polímeros orgánicos catiónicos como floculantes no presenta estos inconvenientes, sin embargo su efectividad puede ser disminuida en aguas salobres como consecuencia de la elevada fuerza iónica que las caracteriza. Por su parte, la biofloculación es un procedimiento alternativo de cosecha que consiste en el uso de especies de microalgas que naturalmente floculan o cuya aglomeración puede ser inducida mediante la aplicación de condiciones de estrés tales como cambios de pH, temperaturas extremas y restricción de nutrientes. No obstante, la modificación de las condiciones de cultivo puede alterar la composición bioquímica de la microalga y por tanto el rendimiento lipídico. Finalmente, se ha propuesto la floculación microbiana o co-biofloculación, procedimiento en el cual se adicionan microorganismos autofloculantes (tales como levaduras) al cultivo microalgal, de manera tal que se promueve la aglomeración conjunta de éstos con la biomasa que se desea cosechar.

2.18.-Extracción de lípidos de microalgas

A partir de la biomasa cosechada se extraen los aceites, pero antes hay que llevar a cabo un secado de la biomasa. El secado al sol es probablemente el método más barato empleado para el tratamiento de la biomasa de microalgas. Sin embargo, este método requiere largos tiempos y grandes superficies de secado, y corre el riesgo de la pérdida de algunos

productos biorreactivos. Tecnologías de secado más eficientes pero más costosas, incluyen i) secado en tambor, ii) secado por pulverización, iii) secado en lecho fluidizado, iv) secado por congelación y v) tecnología de deshidratación de ventana refractante.

Existen numerosos métodos para la extracción de lípidos de las microalgas, los más comunes son: i) prensado, ii) extracción líquido-líquido (extracción con disolventes), iii) extracción con fluidos supercríticos (SFE) y iv) técnicas de ultrasonido.

2.19.-Métodos mecánicos

El prensado para obtener el aceite es un método mecánico que utiliza alta presión para apretar y romper las células. Para que este proceso sea efectivo, primero las algas necesitan de secado. Aunque este método puede recuperar el 75% de aceite y no requiere ninguna habilidad especial, es menos eficaz debido al tiempo de extracción relativamente largo.

Otro método prometedor para ser utilizado en la extracción de microalgas es la aplicación de ultrasonidos. En este método se exponen las microalgas a una onda de ultrasonidos de alta intensidad, que crea pequeñas burbujas de cavitación alrededor de las células. El colapso entre las burbujas produce la emisión de ondas de choque, rompiendo la pared celular y liberando los compuestos deseados al medio. Aunque la extracción de aceite usando ultrasonido ya está en amplio uso a escala de laboratorio, no está disponible la información suficiente sobre la viabilidad o el coste de una operación a escala comercial. Este enfoque parece tener un gran potencial, pero se necesita más investigación .

2.20.-Métodos químicos

La extracción con disolvente ha demostrado tener éxito en la extracción de los lípidos de microalgas. En este enfoque, los disolventes orgánicos, tales como benceno, ciclo-hexano, hexano, acetona, cloroformo se añaden a la pasta de algas. El disolvente destruye la pared celular de las microalgas, y extrae el aceite debido a su mayor solubilidad en disolventes orgánicos que el agua. El extracto de disolvente se puede someter a proceso de destilación para separar el aceite del disolvente, y este último puede ser recuperado para uso posterior.

El disolvente más eficiente en la extracción es el hexano, en base a su mayor capacidad de extracción y de bajo coste. Sin embargo, algunos inconvenientes de esta técnica de extracción son los costos y la energía adicionales necesarios para la recuperación del solvente, además de la contaminación de la biomasa microalgal libre de lípidos, restringiendo así las posibilidades para el posterior aprovechamiento de este co-producto. En esta década, se han propuesto variantes para la lixiviación con solventes orgánicos, tales como la extracción in situ a partir de células vivas de microalgas o el acoplamiento de la etapa de extracción lipídica con la de transesterificación. No obstante, tanto su aplicación a gran escala, como su factibilidad económica, deben ser evaluadas.

La extracción supercrítica hace uso de altas presiones y temperaturas para la rotura de las células. Este método de extracción ha demostrado ser extremadamente eficiente en cuanto al tiempo y se emplea comúnmente.

CAPÍTULO 3 ESTRATEGIAS DE MODELADO Y CONTROL DE FOTOBIOREACTORES.

Tal y como se ha indicado anteriormente, las microalgas deben cultivarse en los biorreactores en condiciones totalmente controladas, de manera que su tasa de crecimiento sea alta permitiendo obtener gran productividad. En el caso de producción de biodiésel a partir de microalgas, los reactores más utilizados son los fotobiorreactores abiertos tipo raceway, Sin embargo, debido a la dificultad de controlar las condiciones de cultivo en éstos, los estudios que se han realizado sobre el modelado y control de biorreactores se centran en el uso de fotobiorreactores, principalmente, tubulares o planos y en algún caso columna de burbujeo. Ya que los sistemas cerrados permiten obtener microalgas de mayor calidad y se caracterizan por la regulación y el control de prácticamente casi todos los parámetros biotecnológicos, así como de presentar beneficios fundamentales: riesgo de contaminación reducida, pérdidas de CO₂ mínimas, condiciones de cultivo reproducibles, control de temperatura y diseño flexible; ventajas y características que los sistemas abiertos no pueden ofrecer. Presentándose como los diseños más escalables.

El diseño de fotobiorreactores cerrados debe ser cuidadosamente optimizado para cada especie de microalga individual, según sus características fisiológicas y de crecimiento. Pero en general, en cualquier diseño, será necesario prestar una especial atención a dos factores ambientales dominantes como lo son la luz solar y la temperatura. También parámetros de diseño, tales como el régimen de luz, de calor y transferencia de masa deben ser ajustados con precisión para un funcionamiento correcto.

En la perspectiva del cultivo de microalgas a gran escala, nuevas técnicas, tanto de biotecnología como del campo de control, deben ser implementadas para asegurar la robustez, la durabilidad y la optimización de estos nuevos procesos. Las microalgas tienen unas especificaciones que difieren en comparación con los microorganismos más utilizados actualmente en biotecnología, tales como bacterias o levaduras. La principal diferencia se refiere a la conversión de la energía solar en energía química, ya que cada célula debe tener acceso a la luz con el fin de mantener su crecimiento. El aumento de la concentración de biomasa conduce a una mayor absorción de luz. Por lo tanto, la cantidad de biomasa máxima alcanzable está limitada por un límite de concentración de ésta, para que todos los fotones que inciden puedan ser absorbidos. Sin embargo, establecer este límite no es sencillo debido a que las células intentan adaptar sus pigmentos a la luz incidente para optimizar su aprovechamiento, y por lo tanto la atenuación de luz (que se deduce de la concentración de pigmento) es dependiente de la luz. Por otra parte, en condiciones de inanición de nitrógeno (que se aplica para estimular la síntesis de lípidos), la composición de pigmento y la concentración disminuyen, lo que conduce a la reducción de la atenuación de luz reducida. Cuando el cultivo de microalgas se lleva a cabo al aire libre, estos organismos crecen en

condiciones inestables, ya que permanentemente se exponen a variaciones luz (y de temperatura). El principal desafío es diseñar un fotobiorreactor que sea capaz de utilizar la luz intensa y mantenga las concentraciones apropiadas de gas (CO_2 y O_2) en una escala comercial.

Los procesos basados en microalgas, por lo tanto, implican nuevos desafíos para el modelado y control. Además de las características clásicas no lineales y complejas, que caracterizan a la mayoría de los procedimientos biotecnológicos, el comportamiento no estacionario permanente junto con una fuerte realimentación desde el nivel de la población a nivel de la célula a través de la atenuación de luz, hace que el control de estos procesos no sea nada fácil. La optimización de procesos tan complejos podría llegar a ser mucho más eficiente si se lograsen desarrollar modelos precisos.

A continuación se hace una revisión de estudios y desarrollos de modelos que se han llevado a cabo para distintos fotobiorreactores. Estos modelos se corresponden con el crecimiento en los cultivos de suspensiones de células fotosintéticas, los cuales se usan para predecir la tasa de biomasa (producción) y el consumo de nutrientes en función del tiempo de cultivo para un conjunto dado de variables de entrada del proceso, entre las que se incluyen: las dimensiones del reactor, el tiempo de residencia, parámetros intrínsecos de crecimiento del cultivo, parámetros de iluminación y transferencia de masa de CO_2 , entre otros. Por otro lado, se considerarán factores como la capacidad de transferencia de calor en el cultivo para controlar la temperatura. Asimismo, se describirán modelos y procedimientos para el control del pH y las pérdidas de CO_2 . En resumen, el objetivo es conseguir un modelo que permita mejorar la producción de biomasa mediante el control de las variables clave: CO_2 y O_2 disueltos, pH y temperatura.

Prácticamente, los fotobiorreactores actuales son controlados mediante controladores clásicos on-off (encendido-apagado), debido principalmente a la simplicidad de este esquema de control, a la inexistencia de modelos dinámicos y a la falta de válvulas proporcionales idóneas para el suministro del gas inyectado en flujos de valores bajos. A continuación se describirán algunas estrategias de control avanzadas para estos fotobiorreactores que están siendo desarrolladas en la actualidad, así como la comparación de una serie de resultados obtenidos de aplicar distintas estrategias.

3.1.- Dinámica del sistema y modelos

El modelado matemático de un fotobiorreactor requiere conocer la relación entre el metabolismo de los microorganismos, la transferencia de luz dentro del cultivo y la dinámica de fluidos del reactor. Para ello se trata de combinar el modelo de transferencia de CO_2 , el modelo de transferencia de la luz y las ecuaciones de balance de masa. Para simplificar, se supone que todas las reacciones tienen lugar en fase líquida, y que el biorreactor es homogéneo. Por tanto, el desarrollo del modelo se puede dividir en tres subsistemas principales que interactúan entre sí, esto es la luz incidente en el reactor, la suspensión en el medio de las células de microalgas y el medio en sí mismo, tal y como proponen M.R. Buehner et al. en el experimento desarrollado Solix Biofuels (Fort Collins, Colorado). La cantidad de

luz incidente que las microalgas pueden utilizar es una función de la posición del sol y la cantidad de mezcla. A medida que las microalgas crecen, interactúan con el medio de cultivo con el fin de eliminar los nutrientes y el carbono disuelto, mientras se produce también la liberación del oxígeno disuelto.

Una mezcla gaseosa formada por aire y CO₂ se burbujea a través de los medios de cultivo para mantener el nivel apropiado de carbono disuelto y para eliminar el oxígeno disuelto producido a través de la transferencia de masa. Puesto que la cantidad de nutrientes y gases disueltos en los medios afectará a la tasa de crecimiento, estos parámetros necesitarán ser realimentados de nuevo desde el modelo del medio de cultivo (química del medio acuoso) hasta el modelo de las microalgas (fotosíntesis). En la Fig. 11 se muestra el esquema del modelo propuesto por M.R. Buehner et al. para un fotobiorreactor, el cual contiene los tres subsistemas principales: subsistema de la incidencia de luz (rojo), subsistema de la fotosíntesis (verde), y subsistema de la química del medio acuoso (azul). Todas las entradas del modelo, excepto la luz del sol, pueden ser impuestas. Esto hace el problema de control interesante, ya que la luz solar es la entrada principal que impulsa la fotosíntesis, sin embargo, entra en el sistema como una entrada exógena. Por lo tanto, el objetivo de control es ajustar los otros parámetros para maximizar la utilización de la luz solar.

3.2.-Subsistema de luz incidente: influencia en el crecimiento de las microalgas

Alrededor del 45% de todo el espectro de la luz es una radiación fotosintéticamente activa, que es la cantidad de luz (en el rango de 400 nm a 700 nm) disponible para la fotosíntesis en la Tierra. En el modelo propuesto por M.R. Buehner et al. [105], el subsistema correspondiente a la luz incidente determina la cantidad de PAR que le llega a las microalgas, la cual es una función del número de fotones de PAR que entran en el fotobiorreactor, el mezclado, y la geometría del fotobiorreactor. Se puede expresar como:

$$I_{PAR} = f(PAR_{fotobiorreactor}, \text{mezclado}, \text{geometría}) \quad (3.1)$$

La cantidad de PAR que entra en el fotobiorreactor es una función tanto de la luz directa y como de la luz difusa que inciden en él. Para obtener una simplificación del modelo presentado, tanto el mezclado (es decir, la tasa de flujo de gas) como la geometría se pueden considerar constantes. Por lo tanto, el modelo simplificado de la ecuación (1) resulta:

$$I_{PAR} = \eta_{PAR} PAR_{fotobiorreactor} \quad (3.2)$$

Donde la cantidad de PAR que entre en el fotobiorreactor se puede medir con un sensor PAR, resultando entonces: $PAR_{fotobiorreactor} = PAR_{sensor}$, y donde el parámetro $PAR\eta$ es la eficiencia del fotobiorreactor para una mezcla y geometría dadas. La variable PAR_{sensor} es el número de fotones PAR medidos por el sensor PAR. Sin embargo, como hay más información disponible acerca de los efectos de la mezcla y de la geometría, se podrá incorporar en el cálculo del término I_{PAR} de una manera más precisa.

En concreto, O. Bernard., hace un estudio y desarrolla modelos para el crecimiento en los que incluye el efecto de la radiación, que como se verá en el siguiente subapartado tienen

especial importancia para que se den los ciclos de fotosíntesis (crecimiento) y respiración en el medio de cultivo. Se incluyen modelos de fotoaclimatación, modelización de la dinámica de los pigmentos, modelos para la tasa de absorción del nitrógeno (en casos en los que éste puede limitar el crecimiento) inorgánico y respiración, todos ellos modelos que se ocupan de la limitación de la luz.

3.3.-Subsistema de la fotosíntesis: modelo del crecimiento de las microalgas

En este subsistema se engloban los modelos de la dinámica de crecimiento de las microalgas, ya que utilizan los fotones de la luz solar, CO₂ y nutrientes para producir O₂ y más microalgas. La velocidad a la que crecen las microalgas depende de su capacidad de utilizar la luz incidente y de la disponibilidad de nutrientes. Suponiendo que haya una amplia cantidad de nutrientes disponibles, el crecimiento de las microalgas es principalmente función de la luz de entrada.

Cuando hay ausencia de luz, las microalgas respiran (es decir, utilizan O₂ y el carbono almacenado como fuente de energía se libera en forma de CO₂). Como resultado de la respiración tiene lugar una pérdida de biomasa. En presencia de luz, las microalgas asimilan carbono del CO₂ disuelto y liberan O₂, ya que consumen el carbono almacenado. Cuando el medio de cultivo es escaso, hay un exceso de número de fotones aprovechables para la fotosíntesis que no se están utilizando. Bajo esta condición, las microalgas crecerán de manera exponencial, ya que la masa de algas producida no estará limitada por los fotones disponibles. En algún momento, la densidad de algas será lo suficientemente grande para que toda la luz incidente sea utilizada. A densidades superiores a esto, la tasa de crecimiento de microalgas será lineal.

Dado que la densidad continúa aumentando, sólo una fracción pequeña de la suspensión de microalgas será capaz de recibir la cantidad de luz necesaria para la fotosíntesis y la respiración será la actividad metabólica dominante. Mientras esto sucede, el crecimiento total de microalgas en el fotobiorreactor cesará y eventualmente comenzará a decaer. En función de este comportamiento, la mayoría de los modelos desarrollados establecen el crecimiento como una función de la luz mediante la cinética del modelo de Monod. Éste describe que el crecimiento de las microalgas pasa por tres fases de crecimiento: exponencial, lineal y descomposición, ajustándose a las distintas etapas descritas anteriormente. En cualquier caso se trata de un modelo empírico, el cual funciona bien para algunas situaciones.

Análisis químicos han puesto de manifiesto que la biomasa de microalgas se compone del 40% de carbono en peso seco. Un mol de CO₂ tiene una masa de 44 gramos y 12 de esos gramos corresponden al carbono, lo que implica que alrededor de 1,5 Kg de dióxido de carbono se requieren para producir 1,0 Kg de biomasa, lo cual se obtiene de la expresión siguiente:

$$\frac{44\text{KgCO}_2/\text{Kmol}}{12\text{KgC}/\text{Kmol}} \cdot \frac{0,4\text{KgC}}{\text{Kg biomasa}} \approx 1,5 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{Kg biomasa}} \quad (3.3)$$

El punto principal de todas las consideraciones relativas al CO₂ es que, por un lado, el contenido de CO₂ no debe llegar a la concentración superior que produce la inhibición, y por

otra parte, nunca debe caer por debajo de la concentración mínima que limita el crecimiento, estos valores máximos y mínimos varían de una especie a otra. En principio, la limitación de CO₂ se puede solucionar fácilmente mediante el suministro en exceso, pero el uso de dióxido de carbono representa un gasto importante operativo en el cultivo de microalgas, de ahí que la pérdida de CO₂ tenga que ser minimizada. En la práctica, se garantiza simultáneamente la suficiencia de fuente de carbono y la minimización de pérdidas con múltiples puntos de inyección de gas a lo largo de la longitud del tubo. En el caso de los fotobiorreactores tubulares, esto presenta un inconveniente importante debido a su elevado costo y la necesidad de realizar estudios para el diseño y espaciado de los puntos de inyección (dependiente de varios factores: velocidad de flujo del líquido, tasa de fotosíntesis, coeficiente de transferencia de masa gas-líquido, y tasa de inyección de dióxido de carbono). El dióxido de carbono suministrado para este fin (y para controlar el pH del cultivo, como se verá en el siguiente subapartado) es de aproximadamente un 30% de los costos de producción. Esto se debe a que las pérdidas de carbono son superiores al 75%, y a que podrían reducirse a menos de un 30% mediante el diseño y el funcionamiento de fotobiorreactor que describe F. Camacho et al.

Sin embargo, para reducir aún más dicho porcentaje sería necesario diseñar estrategias de control avanzadas que tengan en cuenta los fenómenos de transferencia de masa y el mezclado que se producen en el sistema. Todas estas características referentes al medio y a las distintas etapas en el crecimiento en función de la disponibilidad de luz, se puede recoger en el modelo mediante una densidad de biomasa de saturación en el término de crecimiento. Cuando la densidad sube por encima del valor de densidad crítica, el crecimiento resultante de la fotosíntesis se convierte en lineal mientras que la pérdida de densidad debida a la respiración sigue siendo exponencial. Estos efectos se pueden expresar según una ecuación diferencial no lineal:

$$\dot{m}_{algas} = P\bar{m}_{algas} - Rm_{algas} \quad (3.4)$$

donde

$$\begin{aligned} \bar{m}_{algas} &= \min(m_{algas}, m_{densidad}) \\ m_{densidad} &= f(m_{algas}, \text{mezclado}, \text{geometria}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

La variable de estado m_{algas} es la cantidad de microalgas dentro del fotobiorreactor y su derivada, \dot{m}_{algas} , es la tasa de crecimiento de microalgas dentro del fotobiorreactor. El parámetro de productividad P es la tasa de crecimiento específica para una intensidad de luz dada, y está relacionado con la ecuación (2). La constante R es la tasa de pérdida de biomasa debido a la respiración en la oscuridad. Las microalgas también respiran mientras se encuentran en exposición a la luz solar, por lo que sigue siendo adecuado incluir el término respiración durante períodos de crecimiento. Por último, el parámetro $m_{densidad}$ es la densidad crítica por encima de la cual el crecimiento se convierte en lineal.

Una expresión para la evolución del número de células de microalgas, según G. Becerra-Ceils et al., podría ser:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{F_{in}}{V} X_{in} + \mu X - \frac{F_{out}}{V} X_{out} \quad (3.6)$$

donde μ , X , F , y V son la tasa de crecimiento específico, la concentración de biomasa por unidad de volumen de cultivo, velocidad media de flujo y el volumen de la fase líquida en el fotobiorreactor, respectivamente. Los subíndices *in* y *out* se utilizan para asignar la entrada y la salida de las cantidades, respectivamente. De manera que se podrían aplicar las consideraciones dadas por la ecuación (3.4) en (3.6), incluyéndose así el término de una densidad de biomasa de saturación, y en la que también se tendría en cuenta la respiración. Según G. Becerra-Ceils et al., la tasa de crecimiento específico μ es influenciada, predominantemente, por la intensidad de la luz por célula (determinada por una variable que se denota como E) y la concentración total de carbono inorgánico (denotado como TIC , por sus siglas en inglés de Total Inorganic Concentration). Por lo tanto, la expresión resultante sería:

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{E}{E_{opt}} \right) \exp \left(1 - \frac{E}{E_{opt}} \right) \left(\frac{TIC}{TIC_{opt}} \right) \exp \left(1 - \frac{TIC}{TIC_{opt}} \right) \quad (3.7)$$

donde μ_{max} , E_{opt} , y TIC_{opt} son, respectivamente, la velocidad de crecimiento específica máxima, la intensidad de la luz disponible por célula y la concentración total de carbono inorgánico para la que $\mu = \mu_{max}$.

Sin embargo, para O. Bernard, el incluir un mecanismo de fotoaclimatación es la característica clave para los modelos propuestos en los que se introducen la densidad de clorofila (denotada por Chl) como una variable del modelo (además del carbono y nitrógeno). El mecanismo de fotoaclimatación (Θ) permite adaptar la síntesis de pigmento a la intensidad de la luz.

Por otro lado, en el crecimiento de las microalgas, además del consumo de CO_2 , se libera O_2 . Una ecuación simplificada para la fotosíntesis es:



Esta ecuación establece que por cada gramo de CO_2 consumido, se produce un gramo de O_2 . Si bien esto es cierto, no es la causa de todo el O_2 que se produce. Esto resulta del hecho de que las moléculas de O_2 provienen de la división del agua, que proporcionan la energía para todos los procesos metabólicos dentro de la microalga. Por lo tanto, no hay una correspondencia uno-a-uno de moléculas de O_2 producidos a moléculas de CO_2 fijados.

3.4.-Subsistema de la química del medio.

Los modelos del subsistema de la química del medio incluyen tanto a los gases disueltos y nutrientes disponibles para las microalgas en el medio. Los gases disueltos son una función tanto de los gases que se introducen en los biorreactores y los gases internos que son consumidos y generados por las microalgas. El propósito principal de burbujeo es regular las concentraciones de O₂ y el CO₂ disueltos a través de la transferencia de masa. En general, las tasas de transferencia de gas puede ser modelado localmente como un sistema dinámico de primer orden. Debido a la naturaleza distribuida del sistema, el modelo requeriría muchos sistemas de primer orden en cascada, que es común con los modelos de proceso. Este fenómeno puede ser esencialmente capturado mediante el uso de un modelo de primer orden más tiempo muerto. Cuando el medio en el PBR está en equilibrio con el aire, hay alrededor de 7mg/mL de O₂ disuelto en el medio, que se mantiene a través de burbujeo cuando no hay crecimiento. Durante los períodos de alto crecimiento, el O₂ disuelto (DO) se acumulará en el sistema y eventualmente será purgado por la noche. Esto es descrito por el modelo dinámico siguiente:

$$\dot{m}_{DO}(t) = \frac{w_{burb}}{\tau_{DO}} \left(m_{DO,gas}(t - \tau_{d,gas}) - m_{DO}(t) \right) + \dot{m}_{O_2}(t) \quad (3.8)$$

Aquí, w_{burb} es la tasa de oxígeno producido mediante la fotosíntesis. Cuando el burbujeo está desactivado (es decir, w_{burb} es la tasa de flujo de gas que se burbujea hacia el PBR, τ_{DO} es el tiempo muerto para la transferencia de masa de DO entre el medio y las burbujas de aireación, $m_{DO,gas}$ es el nivel de DO que el medio equilibrará, m_{DO} es el nivel de DO que hay en el sistema y $w_{burb} = 0$), entonces el DO se acumulará en el sistema a la velocidad que es producido por la fotosíntesis. Una vez que el burbujeo se vuelve a encender, los niveles de DO se equilibrarán de nuevo a $m_{DO,gas}$ con un tiempo de retardo de τ_{DO}/w_{burb} . La corriente de entrada de gas es aire más una corriente de gas de CO₂, donde la cantidad adicionada de CO₂ varía. Esta variación puede cambiar el equilibrio de $m_{DO,gas}$. Hay un retraso desde que se produce el cambio de concentración de CO₂ y cuando la mezcla de gas nueva llega al, que es capturado por el retraso $\tau_{d,gas}$.

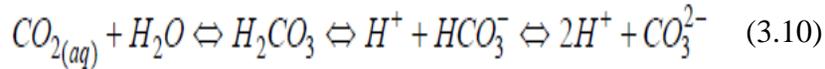
Un método análogo se puede utilizar para modelar el carbono inorgánico disuelto (DIC), que se da en la ecuación:

$$\dot{m}_{DIC}(t) = \frac{w_{burb}}{\tau_{DIC}} \left(m_{DIC,gas}(t - \tau_{d,gas}) - m_{DIC}(t) \right) + \dot{m}_{CO_2}(t) \quad (3.9)$$

Aquí $m_{DIC,gas}$ es la concentración de CO₂ requerida para un pH específico y m_{DIC} es la concentración de CO₂ en el sistema. Como el CO₂ se retira del medio a través de la fotosíntesis (es decir, m_{CO_2}), el valor $m_{DIC,gas}$ se incrementará para ayudar a reemplazar el CO₂ consumidos. Por lo tanto, este valor es siempre cambiante durante el crecimiento activo para mantener un

pH constante. Debido a la naturaleza distribuida del sistema, hay un retardo de $\tau_{d,gas}$ entre el momento en el que cambia la concentración de CO_2 y cuando el CO_2 llega al medio.

Como el CO_2 se disuelve en el medio, se descompone en diferentes especies, en CO_2 acuoso ($CO_{2(aq)}$), ácido carbónico (H_2CO_3), bicarbonato (HCO_3^-), y carbonato (CO_3^{2-}). La combinación de todas estas especies representa el DIC total. La cantidad de $CO_{2(aq)}$ es una función de la temperatura y la presión, que se rige por la ley de Henry. Basándose en la cantidad de DIC y la ley de Henry, el equilibrio químico que se alcanza es el siguiente:



La cantidad de cada una de las especies de ácido carbónico, bicarbonato, y especies de carbonato determina el pH. Cuando el pH aumenta el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, y hacia la derecha a medida que disminuye el pH. A medida que las microalgas crecen, el $CO_{2(aq)}$ se retira del medio, lo que provoca que el equilibrio se desplace hacia la izquierda y el pH experimente una subida. Algunas cepas de microalgas también utilizarán bicarbonato como fuente de carbono. Las microalgas aún requieren CO_2 , el cual llega por la división del bicarbonato en $H^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons CO_2 + OH^-$. La liberación de iones también hace que el OH^- aumente. No está claro qué método de asimilación de carbono domina el aumento del pH. Éste sería el primer paso en el proceso de modelado del pH, la caracterización del sistema y el comportamiento que experimenta el pH dentro de los reactores. Ha quedado de manifiesto que el pH de un cultivo de microalgas se ve influenciado por dos fenómenos. Por un lado el aporte del CO_2 como nutriente provoca la formación de ácido carbónico y éste un descenso del pH en el cultivo.

Por otro lado, las microalgas realizan la fotosíntesis en presencia de radiación solar consumiendo el CO_2 y generando O_2 , lo que provoca una subida paulatina del pH. Para mantener el crecimiento máximo y por lo tanto maximizar el rendimiento de los cultivos se requiere que ciertas variables del entorno sean mantenidas en los valores óptimos. Entre ellas, el pH es una de las variables críticas, la cual tiene que ser regulada adecuadamente. Esto se lleva a cabo por la interacción con el sistema amortiguador de bicarbonato a través de la inyección de una corriente de CO_2 puro. De manera que la inyección de CO_2 como acción reguladora tiene dos objetivos: en primer lugar, se produce una acidificación del medio de cultivo recuperando la capacidad del tampón y llevando el pH al punto óptimo de equilibrio para la microalga, y en segundo lugar proporciona una fuente de carbono inorgánico indispensable para el crecimiento. La adición de CO_2 puede tardar de 2 a 3 segundos para que el carbono se disuelva completamente y sólo una fracción de la entrada de CO_2 se disuelve antes de salir de la rejilla de ventilación.

Los modelos existentes que relacionan la dinámica del pH con la inyección de CO_2 en fotobiorreactores son en estado estacionario, basados en balances de masa diferenciales, tal y como se describen. Estos modelos permiten la determinación de la influencia de las condiciones de cultivo sobre el comportamiento del sistema, especialmente los requerimientos

de carbono, la concentración de oxígeno disuelto y la variación de pH, pero no se pueden utilizar para propósitos de compensación dinámicos. El comportamiento del pH en el medio puede ser capturado por la dinámica de primer orden en la ecuación (17). El modelo de pH se linealiza alrededor de un pH de referencia, 7,3 según M.R. Buhner et al. o 7,7 según M. Berenguel et al.

$$p\dot{H}(t) = \frac{1}{\tau_{pH}} \left(K_{pH} m_{DIC}(t) - pH(t) \right) \quad (3.11)$$

Aquí, τ_{pH} es el tiempo de retraso asociado con el DIC en las especies apropiadas y K_{pH} es el factor de conversión de DIC a unidades de pH.

El CO_2 no es el único factor que afecta el pH. Autores han encontrado que el pH también se ve afectado por la precipitación de carbonato de calcio en el medio y la asimilación de nitrógeno, el exceso de afluencia de cationes, exceso de aniones, y la asimilación orgánica y la excreción por la microalga. Sin embargo, la entrada de CO_2 no es la variable principal controlable y medible que tiene el efecto más significativo sobre el pH. Esta característica crea algunos problemas relacionados con el control independiente de CO_2 y pH, que es un tema de investigación en curso.

Para M. Berenguel et al., en el caso concreto de fotobiorreactores tubulares, el problema es controlar el pH del cultivo usando como variable de manipulación la apertura de una válvula discontinua de inyección de CO_2 , y tomando como variable de entrada el pH a la salida del lazo externo del fotobiorreactor. Desde un punto de vista teórico, el control del pH es un problema no lineal que puede ser linealizado bajo ciertas circunstancias [109]. Este proceso de neutralización ácido-base podría ser modelado por un modelo lineal si el intervalo de pH se encuentra alrededor del punto de referencia (Fig. 13).

Se propone un modelo en el que se relaciona el pH con la inyección de CO_2 y la radiación solar a través de dos funciones de transferencia de tercer orden con retardo y otra de primer orden:

$$V_{pH} = \underbrace{\frac{\overbrace{K_1}^{FT1_1}}{(1 + \tau_1 s)}}_{FT1} \cdot \underbrace{\frac{\overbrace{K_{1_2} \omega_n^2}^{FT1_2}}{(s^2 + 2 \delta \omega_n s + \omega_n^2)}}_{FT1}}_{FT1} \cdot e^{-m_1 s} \cdot V_{CO_2} + \underbrace{\frac{K_2}{(1 + \tau_2 s)}}_{FT2} \cdot VI \quad (3.12)$$

donde V_{pH} es el pH del cultivo, V_{CO_2} es el porcentaje de apertura de la válvula de CO_2 e VI es el valor de la radiación global. La primera función de transferencia, que relaciona el pH con el CO_2 inyectado (FT1) se divide a su vez en otras dos funciones de transferencia. Por un lado FT1_1 que es de primer orden y que representa la dinámica principal del sistema,

y por otro lado FT1_2 que es de segundo orden y representa la pequeña dinámica oscilatoria que se observa sobre la dinámica principal debido a la recirculación que se produce en los fotobiorreactores tubulares. Como el sistema tiene retardo, también se debe añadir éste a la función ($e^{-tr1 \cdot s}$).

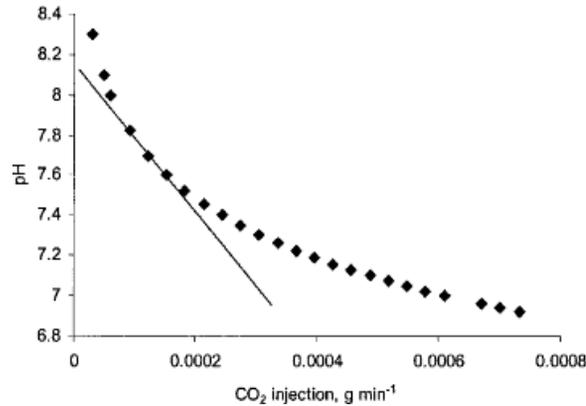


Figura 3.1- Dependencia del pH con la inyección de CO₂. La línea recta representa la regresión lineal de los datos alrededor del valor de set- point 7.7

La función de transferencia FT2 relaciona el efecto de la radiación solar en el pH y también se trata de una función de transferencia de primer orden, pero en este caso sin retardo, ya que este es despreciable. Las funciones de transferencia de primer orden tienen como parámetros la ganancia (K) y la constante de tiempo (τ). La función retardo tiene como parámetro tr que es el tiempo de retardo. En las funciones de transferencia de segundo orden, los parámetros son la ganancia (KI_2), la frecuencia natural no amortiguada (w_n) y el coeficiente de amortiguamiento (δ).

El objetivo final del modelado del sistema mediante esta metodología, es la obtención de los valores de cada uno de estos parámetros. Para ello, se realizan ensayos en la planta que permiten observar los efectos tanto de la inyección de CO₂ como de la radiación solar, de manera que estos datos permitan correlacionar los resultados experimentales obtenidos en la planta con el modelo teórico en (18). Estos parámetros del modelo pueden ser obtenidos mediante la simple observación de las respuestas temporales en la ejecución de los experimentos, mientras que otros se podrían calibrar utilizando el método de mínimos cuadrados. En la Figura 11 se observa como las inyecciones de CO₂ producen un descenso en el valor de pH debido a la formación de ácido carbónico y su consiguiente acidificación del medio. También se observa como durante los tiempos de no inyección se produce un aumento del pH, producido por acción fotosintética y consumo de carbono inorgánico disuelto anteriormente.

En la Figura 12 se representa el efecto de la radiación sobre el pH de un cultivo de microalgas. Se observa como un descenso brusco en los valores de radiación solar provoca un descenso en el ritmo de crecimiento del pH. En este ensayo no se inyecta CO₂ por lo que la tendencia natural del pH del cultivo será aumentar hasta un valor de equilibrio. La fotosíntesis sólo se realiza en presencia de radiación solar, por lo que durante la noche el pH se mantiene

constante o sube ligeramente. En la Figura 12 se aprecia claramente cómo a valores bajos de radiación el pH del cultivo aumenta muy lentamente.

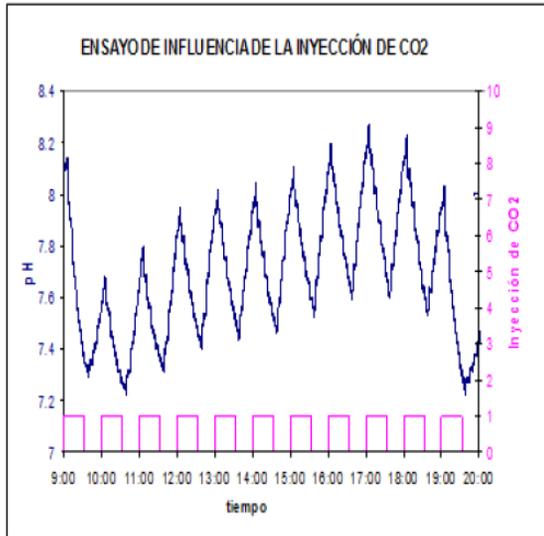


Figura 3.2.- efecto de la inyección de CO₂ sobre el PH en el cultivo de

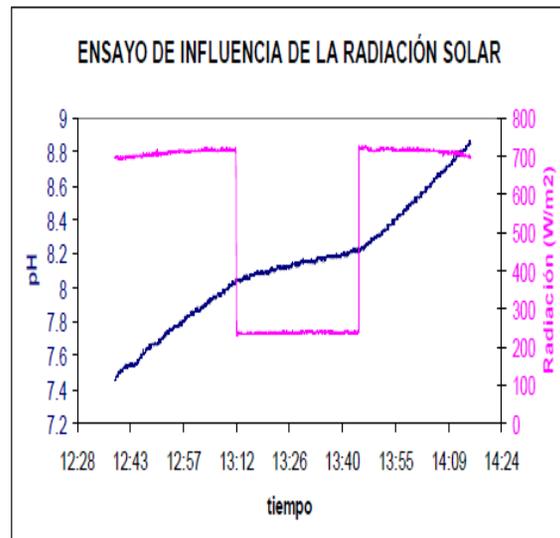


Figura 3.3.- efecto de la radiación de CO₂ sobre el PH en el cultivo de

Por tanto, durante el funcionamiento diurno, se tiene que inyectar una alta cantidad de CO₂ para adaptarse a la requerida por el cultivo y para evitar el aumento de pH rápido que se rige por la tasa de fotosíntesis (con saturación y niveles de inhibición) determinado por la radiación solar (Figura 12).

El modelo fue calibrado y validado con datos de un fotobiorreactor tubular a escala piloto, pero se puede extender a otros diseños. Se puede utilizar para determinar, a partir de medidas experimentales, los valores de los parámetros característicos. El modelo también permite una simulación del comportamiento dinámico del sistema en respuesta a la radiación solar, lo que lo convierte en una herramienta útil para el diseño y optimización de la operación de fotobiorreactores. Además, el modelo permite la identificación de gradientes locales de pH, de oxígeno disuelto y de dióxido de carbono disuelto; que pueden dañar el crecimiento de microalgas. Además, el modelo desarrollado puede asignar las diferentes escalas de tiempo de los fenómenos característicos dentro de cultivos de microalgas en fotobiorreactores tubulares, lo que significa que es una herramienta valiosa en el desarrollo de estrategias de control avanzadas para cultivos de microalgas.

3.5.-Identificación del sistema con datos experimentales y resultados

Para abordar la problemática de la validación del modelo matemático se realizó una identificación de sistemas con el fin de construir un modelo matemático a partir de las entradas y salidas con datos experimentales mediante el algoritmo N4SID (Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification) de Matlab R2018a.

Se utilizaron 4 salidas (temperatura, pH, oxígeno disuelto, y gas oxígeno) estas variables se midieron dentro del fotobiorreactor con un tiempo de muestreo de 1 h por 11 días

en modo discontinuo (batch). Se consideró como única entrada la intensidad de luz (3000 lux) en un fotoperiodo 12:12 h (Figura x).

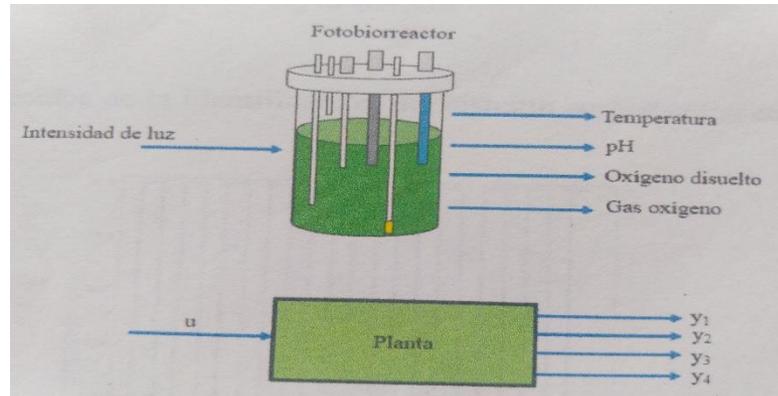


Figura 3.4 entradas y salidas del sistema

$$A = \begin{bmatrix} 0.9973 & 0.0003613 & -0.000377 & -6.578e-5 \\ 0.1188 & 0.9444 & 0.006706 & 0.01887 \\ -0.07692 & 0.02408 & 0.9578 & -0.03673 \\ -0.08111 & 0.08151 & 0.02933 & 0.7442 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.81e-7 \\ -1.397e-5 \\ 7.678e-6 \\ 1.453e-5 \end{bmatrix} u$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + [0]u$$

Con eigenvalores:

$$\lambda_1 = 0.7413$$

$$\lambda_2 = 0.9989$$

$$\lambda_3 = 0.9407$$

$$\lambda_4 = 0.9628$$

Los resultados obtenidos de la identificación del sistema se presentan en las siguientes gráficas.

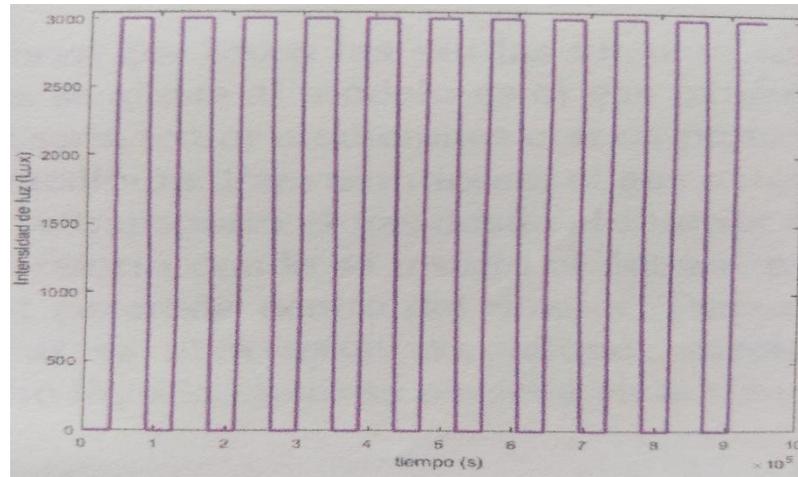


Figura 3.5.- Señal de entrada u

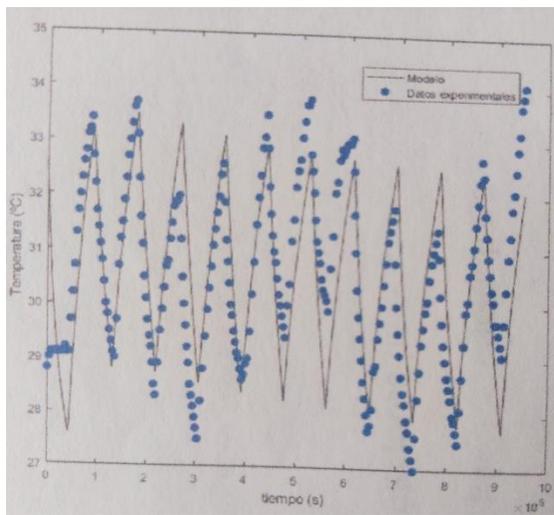


Figura 3.6.- Salida y1 con un ajuste de 75.65%

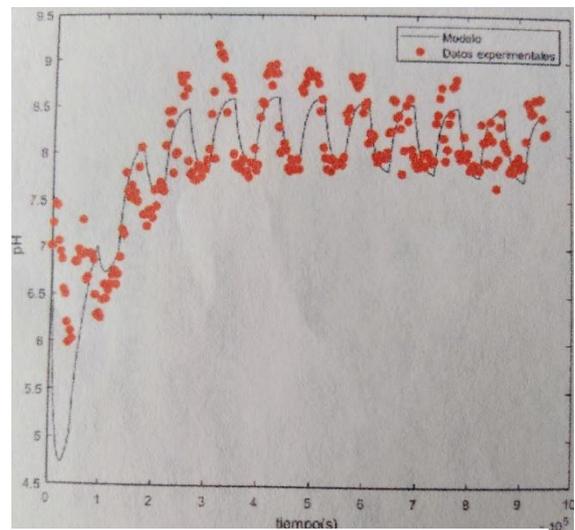


Figura 3.7.- Salida y2 con un ajuste de 52.23%

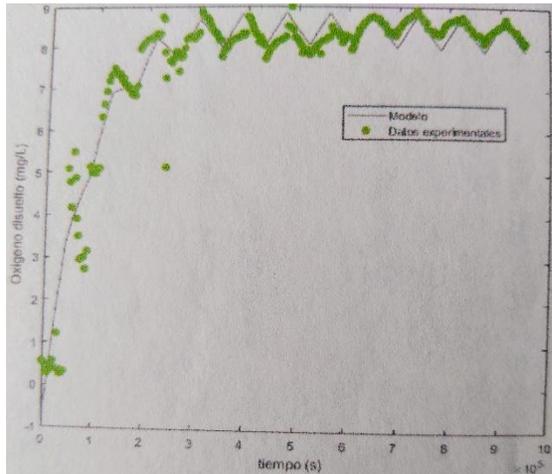


Figura 3.8.- Salida y3 con un ajuste de 75.19%

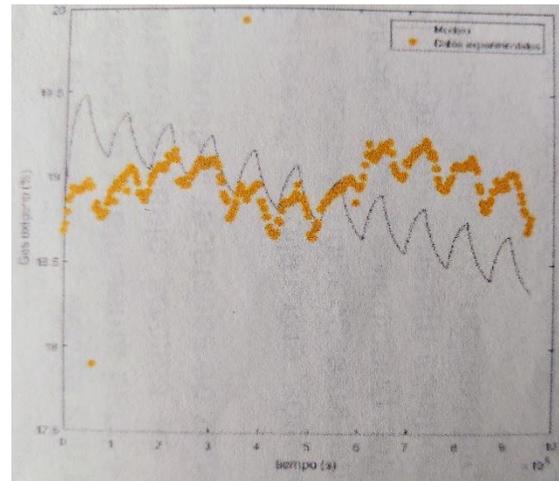


Figura 3.9.- Salida y4 con un ajuste de 13.17%

En las gráficas se observa que todas las salidas intentan seguir la señal de entrada, sin embargo, la que menos se ajusta al modelo es el gas oxígeno, una de las opciones para reducir la discrepancia sería tomar mediciones con un periodo de muestreo más pequeño y mejorar la forma de medición. Para monitorear el gas oxígeno se empleó una manguera transparente en la que se transportó el gas desde el interior del fotobiorreactor hacia una botella de plástico de laboratorio donde se insertó el sensor, esto con el fin de no dañar el sensor por la humedad generada dentro del reactor. Probablemente esta fue una de las razones por la cual no se obtuvieron mediciones precisas, los demás sensores se introdujeron en el medio líquido como se observa en la figura 13.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El agotamiento de los recursos y el incremento en el precio de los combustibles fósiles hacen de los recursos renovables una alternativa interesante. En el caso de la producción de biodiésel, se emplean especies vegetales como materias primas; sin embargo, las microalgas han demostrado sus potencialidades y varias ventajas en relación a los vegetales superiores. Por sus características particulares de crecimiento, brindan la oportunidad de utilizar terrenos y cualquier tipo de agua que hoy en día son inadecuados para realizar los cultivos alimenticios convencionales. La tecnología microalgal presenta limitaciones diversas, siendo las más destacadas la dificultad para mantener monocultivos con altos rendimientos de biomasa, la selección de cepas de microalgas oleaginosas, la escasez de información relativa al escalamiento de sistemas de producción y el consumo elevado de energía por procesos de bombeo, transferencia de gases, mezclado, recolección y deshidratación de la biomasa. No obstante, los costos de producción de biodiésel microalgal pueden ser aminorados a través de distintas estrategias. Avances en la ingeniería de fotobiorreactores, además del desarrollo de procesos económicos para la recolección de biomasa y su posterior transesterificación sin el requerimiento previo de procedimientos de deshidratación, son aspectos trascendentales para la reducción de costos. Con tal propósito, también se ha sugerido el acoplamiento de los cultivos de microalgas a los flujos ricos en CO₂ derivados de emisiones industriales y al

tratamiento de aguas residuales. Asimismo, se ha propuesto el aislamiento y selección de especies oleaginosas, además de su modificación mediante procedimientos de ingeniería genética y metabólica con propósitos diversos, tales como incrementar la eficiencia fotosintética, mejorar la productividad, aumentar la fracción oleaginosa, reducir los fenómenos de fotoinhibición y daño fotooxidativo, entre otros. Resulta imprescindible la consideración de la posibilidad de una estrategia productiva basada en el concepto de biorefinería, que permita obtener biodiésel, además de subproductos y utilizar la biomasa residual para generar otros, y hasta el uso de la digestión anaerobia para obtener biogás o metano. Desde el punto de vista ambiental, la tecnología basada en el cultivo de microalgas, contribuye a la disminución del calentamiento global, generando un eficiente sistema de depuración de CO₂.

Por todo ello, el desarrollo y avances en el modelado y control de los fotobiorreactores es sumamente importante. Los modelos se deberían desarrollar en base a relaciones teóricas o experimentales, de manera que sean independientes del tamaño real del PBR o cepa de microalgas. Esto permitiría que el mismo modelo se pudiese usar para evaluar el rendimiento de una variedad de PBR de diferentes tamaños, arquitecturas, orientaciones y cepas de microalgas. Cabe señalar que las diferentes cepas de microalgas requieren distintos niveles de mezcla, pH, temperaturas y de nutrientes. Algunas líneas de investigación en curso se centran en desarrollar métodos para determinar los parámetros del modelo a partir de primeros principios y experiencias con PBRs. Como parte del proceso de desarrollo, se necesita de una mayor comprensión de cómo los parámetros se mantienen constantes en las ecuaciones (1) y (5) y en qué medida afectan el crecimiento. La determinación de estos efectos, y usando el modelo para probar varias condiciones de operación y diseños de PRB, es crucial para el éxito comercial.

Las microalgas son organismos fotosintéticos que son más difíciles de manejar que las bacterias, levaduras u hongos; lo cual motiva el uso de modelos más complejos que el modelo cinético de Monod. Además deben adaptar sus pigmentos a la intensidad de la luz, lo que hace que el comportamiento de los biorreactores sea difícil de entender y predecir sin modelado. Por último, tales organismos están lejos de cumplir las hipótesis clásicas de crecimiento necesarias para aplicar los resultados clásicos de la ingeniería metabólica. Algunos modelos existentes pueden describir por separado algunos de estos procesos, pero hay un claro incentivo para el desarrollo de nuevos modelos de predicción, especialmente en el marco de la producción de bioenergía a partir de energía solar. Estos modelos admitirían la supervisión y optimización de los procesos. También ayudarían a cuantificar de manera más real las productividades alcanzables, dependiendo de la especie, el tipo de proceso de cultivo, época del año y el lugar y, por tanto, calibrar las inversiones correspondientes. Por otro lado, contribuiría a mejorar la evaluación de impacto ambiental con una mejor cuantificación del balance de energía entre la energía requerida para mantener las algas en suspensión e inyección de CO₂, y la energía recuperada a través de los biocombustibles.

REFERENCIAS

- Brennan, Liam, & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae--A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557-577.
- Gao, Y., Gregor, C., Liang, Y., Tang, D., & Tweed, C. (2012). Algae bio diésel - a feasibility report. *Chemistry Central Journal*, 6, 1-16.
- Ho, S.-H., Chen, C.-Y., Lee, D.-J., & Chang, J.-S. (2011). Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems-A review. *Biotechnology Advances*, 29(2), 189-198.
- Milledge, J. (2011). Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10(1), 31-41.
- Molina Grima, E., Belarbi, E.-H., Ación Fernández, F. G., Robles Medina, A., & Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, 20(7-8), 491-515.
- Q., Du, W., & Liu, D. (2008). Perspectives of microbial oils for bio diésel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(5), 749- 756.
- Slade, R., & Bauen, A. (2013). Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy*. Volume 53, June 2013, 29–38
- Yusuf Chisti. (2007). Bio diésel from microalgae. *Biotechnology advances*, 25(3), 294–306.
- Yusuf Chisti. (2008). Bio diésel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 126-131
- Hernandez, E., Revah, S. y Morales, M. (2011). Producción de biomasa de microalgas en un fotobiorreactor tubular arlift (fbta) en condiciones ambientales.
- Huang, G. Chen, F., Wei, D., Zhang, X., y Chen, G. (2010). Biodiesel production by microalgal biotechnology.
- Infante, C., Angulo, E., Zárate, A., Florez, J. Barrios, f. y Zapata, C. (2012). Propagación de la microalga *Chlorella* sp. En cultivo por lote: cinética del crecimiento celular.
- Kommareddy AR and Anderson GA. 2003. Study of light as a parameter in the growth of algae in a photo-bio reactor (PBR). ASAE Paper No. 034057. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Linden JS and Hartmut. 2001. Regulation of two carotenoid biosynthesis genes coding for phytoene synthase and carotenoid hydroxylase during stress-induced astaxanthin formation in the green alga *Haematococcus pluvialis*. *Plant Physiology* 125: 810-817.
- Li Y and Huang J. 2009. High-light and sodium chloride stress differentially regulate the biosynthesis of astaxanthin in *Chlorella zofingiensis*. *Journal of Phycology* 45: 635-641.
- Marcos, F., Almazan J. y Palomino M. (2008). Biodiesel de algas.
- Martin FPH. 2010. Optimization of photobioreactor for astaxanthin production in *Chlorella zofingiensis*. Tesis de Maestría en Ingeniería. National University of Singapore.

- Mehlitz TH. 2009. Temperature influence and heat management requirements of microalgae cultivation in photobioreactors. Tesis de Maestría. California Polytechnic State University, USA.
- I. Fernández, J. Peña, J.L. Guzmán, M. Berenguel, F.G. Acién (), “Modeling and Control Issues of pH in Tubular Photobioreactors”. *Computer Applications in Biotechnology* 11 (1), Pág. 186–191.
- M. Berenguel, F. Rodríguez, F.G. Acién, J.L. García (2004), “Model predictive control of pH in tubular photobioreactors”. *Journal of Process Control* 14 (4), Pág. 377-387.
- M.R. Buehner, P.M. Young, B. Willson, D. Rausen, R. Schoonover, G. Babbitt, S. Bunch (Junio 2009), “Microalgae Growth Modeling and Control for a Vertical Flat Panel Photobioreactor”. *American Control Conference*, St. Louis, MO, USA, Pág. 2301-2306.
- J.R. Beneman, D.M. Tillet, J.C. Wcissman (1987), “Microalgar biotechnology”. *Trends in Biotechnology* 5 (2), Pág. 47-53.
- F. Camacho, F.G. Acién, J.L. Sánchez, F. García, E. Molina (1999), “Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture”. *Biotechnology and Bioengineering* 62 (1). Pág. 71-86.
- J.L. García, M. Berenguel, F. Rodríguez, J.M. Fernández, C. Brindley, F.G. Acién (2003), “Minimization of carbon losses in pilot-scale outdoor photobioreactors by model-based predictive control”. *Biotechnology and Bioengineering* 84 (5), Pág. 533-543.
- F.G. Shinsky (1996), “Control of pH. In the Control Handbook”. CRC-IEEE Press.
- E.F. Camacho, C. Bordons (1999), “Model Predictive Control”. Springer-Verlag.
- E. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio (1997), “Advanced Control of Solar Plants”. Springer.
- G.L. Rorrer, R. K. Mullikin (1999), “Modeling and simulation of a tubular recycle photobioreactor for macroalgal cell suspension cultures”. *Chemical Engineering Science* 54 (15-16), Pág. 3153-3162.
- G. Becerra-Celis, G. Hafidi, S. Tebbani, D. Dumur, A. Isambert (2008), “Nonlinear Predictive Control for Continuous Microalgae Cultivation Process in a Photobioreactor”. *10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Hanoi, Vietnam, 17-20 December 2008, Pág. 1373-1378.
- E. Sierra, F.G. Acién, J.M. Fernández, J.L. García, C. González, E. Molina (2008), “Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae”. *Chemical Engineering Journal* 138 (1-3), Pág. 136-147.
- F.G. Acién Fernández, F. García Camacho, J.A. Sánchez Pérez, J.M. Fernández Sevilla, E. Molina Grima (1997), “A Model for Light Distribution and Average Solar Irradiance Inside Outdoor Tubular Photobioreactors for the Microalgal Mass Culture”. *Biotechnology and Bioengineering* 55 (5), Pág. 701-714.

