

Trabajo de Fin de Máster

Máster en Ingeniería Química

Diseño de un fotobiorreactor tubular para la producción
de *Chlorella vulgaris*

MEMORIA

Autor: Paula López González

Director: Jordi Bou

Convocatoria: Septiembre 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

El desarrollo de la actividad humana ha crecido de forma exponencial en los últimos siglos y es bajo este contexto que se desarrollan así como ventajas claras y palpables efectos sobre el medioambiente que causan problemas irreversibles en las presentes y futuras generaciones. Es importante por lo tanto tomar consciencia de la necesidad de la reducción de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y de la utilización de fuentes de energía alternativas a las energías fósiles altamente instauradas y en proceso de agotamiento. En esta línea se encuentra el desarrollo de las biorefinerías de segunda generación, que pretenden la obtención de combustibles a partir de biomasa de aplicación no alimentaria. Un ejemplo de materia prima para este tipo de centrales energéticas serían las microalgas, microorganismos que se alimentan de forma principal de luz, una fuente de carbono generalmente inorgánica como es el CO₂ y agua con otros nutrientes. Teniendo en cuenta esto, queda patente que la implantación de procesos de producción de microalgas supone un alternativa más que interesante en lo que a medioambiente se refiere, pudiéndose utilizar como entradas al sistema corrientes de gases de combustión de procesos industriales y contribuyendo a la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Hasta día de hoy se han desarrollado procesos de este tipo a escala de laboratorio y en algunas ocasiones de planta piloto. El proceso industrial impone ciertos problemas en el escalado y la optimización de los parámetros de control para asegurar la viabilidad económica de dicha actividad desde el punto de vista comercial.

Bajo esta situación el presente proyecto presenta el diseño de un fotobiorreactor para la producción a escala piloto de la microalga *Chorella vulgaris*, que destaca por su alto contenido lípidico y con ello su potencial aplicación como fuente de biodiesel, que se obtiene a partir de la transesterificación de dichos aceites. Al tratarse de una planta piloto, se fija un objetivo de producción reducido, que asciende a 18Kg de *C. vulgaris* al año. Bajo esta referencia y considerando la radiación solar como parámetro limitante, la productividad del proceso se calcula y se concluye que, trabajando en ciclos de 6 días, se debe diseñar un fotobiorreactor con una capacidad de 315l. Se opta por desarrollar un fotobiorreactor tubular horizontal totalmente recirculado, tratándose de un sistema compacto con una elevada relación de superficie volumen. El polimetil metacrilato será el material de construcción, ofreciendo una transparencia del 92%. Se define el diseño de forma detallada, pasando por la definición de condiciones de trabajo como la temperatura, intensidad lumínica y el pH, y determinando el detalle del proceso de desoxigenación, las necesidades de bombeo y el sistema de refrigeración. Se incorpora además un diseño en 3D y los correspondientes planos, trabajando con el software SolidWorks. Finalmente se introduce el proceso de extracción de lípidos como paso posterior a la obtención de las microalgas y se evalúa el coste de diseño y construcción del fotobiorreactor, incluyendo también la producción del primer lote, ascendiendo el total a 14832€.

Sumario

RESUMEN	2
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	5
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1 Motivación del proyecto	10
2.2 Objetivo del proyecto	10
2.3 Alcance del proyecto	11
3. LA QUÍMICA SOSTENIBLE Y LAS BIOREFINERÍAS	13
3.1 Tipos de biorefinerías	14
3.2 Materias primas en las biorefinerías	16
3.3 Productos obtenidos en las biorefinerías	18
3.4 Biorefinerías en el territorio Español	19
4. LAS MICROALGAS Y SUS APLICACIONES	21
4.1 Composición y metabolismo	22
4.2 Parámetros de influencia al crecimiento	23
4.3 Rutas de obtención de biocombustibles	27
5. SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS	29
5.1 Tipos de fotobiorreactores y materiales	31
6. ESTADO DEL ARTE DEL CULTIVO DE MICROALGAS	38
6.1 Cultivo de microalgas para la obtención de biocarburantes	39
7. RESULTADOS DEL DISEÑO	40
7.1 Elección del fotobiorreactor	40
7.1.1. Geometría	40
7.1.2. Descripción del régimen de trabajo	42
7.1.3. Material del fotobiorreactor	43
7.2 Objetivos de producción de <i>C. vulgaris</i>	44
7.3 Determinación de la productividad	44
7.4 Diseño del contenedor	47
7.4.1 Cálculo de volúmenes ideales	47
7.4.2 Válvulas y puertos	48
7.4.3 Planos generales	50
7.5 Circulación de corrientes de entrada	57

7.5.1 Alimentación del sistema	57
7.5.2 Sistema de desorción de oxígeno	61
7.6 Iluminación	63
7.7 Control de temperatura	64
7.8 Control parámetros bioquímicos	66
7.9 Seguridad y medioambiente	68
8. PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS	70
9. ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROCESO	73
CONCLUSIONES	75
AGRADECIMIENTOS	77
BIBLIOGRAFÍA	78
Referencias bibliográficas	78
Bibliografía complementaria	79

1. Glosario

Abreviatura	Significado
μ	Tasa de crecimiento específica (h^{-1})
μ máx	Tasa de crecimiento máxima (h^{-1})
lav	Radiación en la región fotosintéticamente activa ($\mu E/m^2s$)
n	Exponente empírico (adimensional)
Ik	Constante dependiente de la aivez de la microalga por la luz ($\mu E/m^2s$)
Iglobal	Radiación incidente global (MJ/m^2dia)
Ppv	Productividad volumétrica (g/l/d)
Cb	Concentración de biomasa (g/l)
Vm	Volumen del medio (l)
Ptarget	Producción semanal de <i>C. vulgaris</i> (g/semana)
Tciclo	Tiempo de ciclo (días)
Vr	Volumen de reactor (l)
L	Longitud del tubo (m)
UL	Velocidad del medio (m/s)
[O ₂]out	Concentración de O ₂ máxima a la salida del tubo (mol/m^3)
[O ₂]in	Concentración de O ₂ al inicio del tubo (mol/m^3)
RO ₂	Tasa de generación de oxígeno (mol/m^3s)
τ	Tiempo de residencia (h)
Dt	Diámetro del tubo (m)
ρ	Densidad del medio (kg/m^3)

μ_L	Viscosidad del medio (Pa s)
Φ	Fracción volumétrica de solidos
μ_w	Viscosidad del agua a 25°C (Pa s)
ht	Pérdidas de carga en el tubo (m.c.a)
f	Coefficiente de fricción (adimensional)
g	Gravedad (m/s ²)
Nt	Número de tubos
ϵ	Espesor absoluto del material (mm)
hc	Pérdidas de carga en los complementos; codos (m.c.a)
K	Coefficiente empírico para las pérdidas de carga de los complementos
Nc	Número de codos
ΔP	Pérdidas de presión (Pa)
P	Potencia de la bomba (W)
Q	Cabal de alimentación (m ³ /s)
At	Sección del tubo (m ²)
Vriser	Volumen del desoxigenador (m ³)
r	Cinética de transferencia de oxígeno (mol/m ³ s)
klal	Coefficiente volumétrico de transferencia gas-líquido (s ⁻¹)
[O₂]sat	Concentración de saturación de O ₂ en aire (mol/m ³)
Lriser	Longitud del desoxigenador (m)
Ariser	Sección del desoxigenador (m)
A	Superficie iluminada del fotobiorreactor (m ²)
Iglobal(máx)	Radiación global máxima (W/m ²)



e	Emisividad del agua
m	Peso del medio del reactor (kg)
Ce	Calor específico del agua (J/KgK)
Tf	Temperatura de salida (K)
Ti	Temperatura de entrada (K)
Σ	Constante de Stefan Boltzmann (W/m ² K ⁴)

2. Introducción

El efecto de la actividad humana sobre el medioambiente se engloba en lo que se conoce bajo el concepto de cambio climático. Éste término hace una referencia directa a fenómenos como la alteración de la flora y fauna de los ecosistemas, el aumento de la temperatura de la Tierra a nivel global con el consecuente deshielo de los polos, la depleción de la capa de ozono, el efecto invernadero, etc, que se ven promovidos por, principalmente, la obtención de energía por combustión de carbón y petróleo. Dicho sector de la industria genera una cantidad progresivamente mayor año tras año de gases contaminantes cuya concentración atmosférica incrementa abruptamente.

Las fuentes de recursos renovables son por lo tanto una rama de estudio y desarrollo en auge. Algunas de las opciones más implementadas a día de hoy pasan por la obtención de energía eléctrica/térmica a partir de la intensidad lumínica del Sol, la potencia que desarrollan las turbinas de los molinos a partir de la fuerza del aire o de la caída natural de agua, la energía térmica proveniente del centro de la tierra, y así un largo etcétera. Dentro de las fuentes no tan recurrentes, se encuentra el reaprovechamiento de biomasa, a partir de la cual pueden obtenerse biocombustibles con un poder energético más que aceptable que ya se utilizan en el mercado. A partir de procedimientos biológicos que pasan por ejemplo por las rutas de crecimiento de ciertos microorganismos se obtienen productos como el biogás, bioalcoholes, bioetanol y biodiesel. Recientemente y en relación a lo anterior, se están desarrollando estudios que introducen lo que se conoce como biocombustibles de segunda generación. Estos se obtienen a partir de cultivos de vegetales con tasas de crecimiento elevadas y aporte energético almacenado considerable; los llamados cultivos energéticos. Dentro de esta última rama se engloba la cosecha de maíz para la extracción del etanol de la celulosa vegetal, o la obtención de combustibles a partir de microalgas.

El cultivo de microalgas posa, según ciertas publicaciones (citar link microalgas-biocombustibles), claras ventajas sobre las tierras agrícolas. Por un lado se evita la utilización de tierras agrícolas para fines diferentes al de la alimentación, además los fabricantes de biodiesel afirman que las microalgas producen 30 veces más combustible que las oleaginosas terrestres, ya que las primeras tienen un contenido lipídico que representa en ocasiones más de un 50% del total de su peso. Sumándose a la lista de aspectos positivos, algunos expertos exponen que se necesitan 140.000 litros de biodiesel para competir con los combustibles obtenidos a partir de petróleo, pues bien para la producción de dicha cantidad se necesitarían 95.000.000 hectáreas de terreno ocupadas en plantas de cultivo de microalgas frente a los miles de millones requeridos para la cosecha de cultivos terrestres.

2.1 Motivación del proyecto

Si bien es cierto que el cambio climático es inevitable también lo es que resulta posible mitigar los efectos que sufrirá en un futuro nuestro hogar reduciendo las emisiones de gases y por lo tanto optando por la obtención de energía a partir de fuentes alternativas y renovables.

Éste proyecto por lo tanto pretende dar visibilidad a una de las fuentes de recursos incipientes, como es la bioenergía. Se trata en este caso de la obtención de biocombustibles a partir de biomasa, incluyéndose bajo éste término productos resultado de cultivos energéticos, residuos obtenidos de la explotación forestal, la actividad agrícola o de origen municipal y técnicas como la acuicultura. El presente documento se centra en la acuicultura entendida como una técnica de cultivo de microalgas a partir de las cuáles se obtendrá energía de forma limpia y alternativa, promoviendo a la vez la fijación de emisiones de CO₂.

2.2 Objetivo del proyecto

En este contexto por lo tanto se considera interesante desarrollar un estudio entorno a la utilización de microalgas como fuente alternativa de recursos, incluyendo un análisis de la situación y alcance actual así como sus resultados, e inspirándose en ello para proponer una alternativa de producción eficiente.

Concretando, el objetivo principal del proyecto es el diseño detallado y riguroso de un fotobiorreactor tubular a escala de planta piloto para la producción de *Chorella vulgaris*.

A partir del objetivo genérico se considera necesario desglosar el mismo en objetivos particulares que deben alcanzarse para la consecución del proyecto. Estos son:

- Estudiar la cinética de crecimiento de *Chorella vulgaris* para alcanzar una productividad favorable en función de los parámetros de proceso críticos.
- Seleccionar el tipo de fotobiorreactor que se adecua a las especificaciones de producción y justificar dicha elección.
- Presentar el diseño del fotobiorreactor especificando aspectos del mismo y del proceso de producción tales como:
 - Producción considerada.
 - Geometría y materiales del fotobiorreactor.



- Cálculo y elección del sistema de agitación e iluminación.
- Diseño del proceso de desoxigenación
- Definición de los sistemas de control del proceso: pH, Temperatura, etc.
- Realización del diseño mediante un software adecuado, SolidWorks.
- Presentación de los sistemas de extracción de lípidos
- Estimación del presupuesto para la construcción del fotobiorreactor y la operación del primer lote.

2.3 Alcance del proyecto

En el presente proyecto se ha pretendido desarrollar y presentar el diseño de un fotobiorreactor para la producción de *Chlorella vulgaris* a escala de planta piloto. Se considera como parte del diseño la definición de los volúmenes ideales del cuerpo del fotobiorreactor y del desoxigenador así como los materiales de construcción, la determinación del régimen y las condiciones de trabajo junto con la selección de los sistemas de mediciones de dichos parámetros y el cálculo de las necesidades de bombeo para mantener el sistema adecuadamente homogeneizado. Para el desarrollo de todos los cálculos previos se parte de datos empíricos tomados de otros estudios, dado que el presente proyecto no tiene como objetivo la simulación del comportamiento de dicho proceso y la obtención de datos experimentales. Además, el marco de aplicación del diseño realizado va dirigido hacia la obtención de biodiesel a partir de la biomasa obtenida, y es por eso que se introducen los métodos de extracción. Considerando que el objetivo principal es el del diseño del fotobiorreactor para la obtención de la microalga, no se entra en detalle con respecto a las etapas posteriores para la extracción de lípidos y la transesterificación para la obtención de biodiesel. Finalmente se representa el diseño propuesto en detalle mediante el software SolidWorks, y se determina el coste de diseño y construcción así producción y mantenimiento del fotobiorreactor en el primer ciclo de trabajo, quedando fuera de alcance el coste del proceso de extracción y los beneficios obtenidos, considerando que al tratarse de un proceso a escala piloto sus objetivos se encauzan hacia la investigación y la obtención de datos para un futuro escalado y no para la obtención de beneficios por la venta de producto final.

3. La Química sostenible y las biorefinerías

La Química sostenible se define como un filosofía que aplica el conocimiento científico para diseñar productos o procesos químicos reduciendo o eliminando la utilización de sustancias peligrosas para los seres vivos o/y el medio ambiente. Dicha rama de estudio sostiene por lo tanto ciertos principios tales como:

1. Prevenir la formación de residuos y en relación incorporar un alto porcentaje de materia prima en el producto final.
2. Diseñar productos que sean eficientes a la vez que escasamente tóxicos.
3. Las necesidades energéticas deben ser consideradas en relación a sus impactos ambientales y económicos; trabajar a temperatura y presión atmosférica es la mejor opción cuándo sea factible.
4. Las materias primas deben ser renovables y no extingüibles en la medida de lo económicamente viable.
5. Los productos químicos han de ser diseñados de tal manera que tras su utilización éstos se conviertan a residuos de degradación inerte que no persisten en el medio.
6. En la selección del proceso químico para la obtención de determinado producto se debe considerar la minimización de la probabilidad de accidentes y sus consecuencias.

La industria química es responsable de una cantidad infame de emisiones de gases tóxicos que generan problemas medioambientales irreversibles. Dentro del rango de estudio de la química sostenible se están por lo tanto investigando nuevos métodos más sostenibles y respetuosos con los ecosistemas, que permitan el desarrollo de la economía y la industria. Destacan entre estos los biocarburantes, producidos a partir de biomasa como pueden ser las microalgas.

En relación a lo anterior, las biorefinerías son la alternativa sostenible de las refinerías y tienen como objeto la producción de productos que aporten valor a partir de la implementación de operaciones unitarias de procesado de biomasa. Los biocombustibles como producto final pueden utilizarse para el reemplazo de una parte de los instaurados combustibles fósiles.

3.1 Tipos de biorefinerías

Se presentan a continuación un seguido de clasificaciones para las biorefinerías en función de diversos criterios (Cárdenas R., 2012):

- Según la materia prima utilizada:
 - Biorefinería Verde: En este tipo de plantas se trabaja con materiales biológicos de origen residual o provenientes de tierras dedicadas a la producción sustentable. El proceso general consiste en presionar la biomasa para obtener así la torta, que se puede utilizar como alimento para animales, y el conocido como zumo, que al contener proteínas se puede procesar para obtener bioetanol a partir de fermentación. Las corrientes residuales de procesos secundarios se pueden recircular a un digestor anaerobio para la producción de biogás, suficiente para abastecer de energía la propia planta.
 - Biorefinería de Cultivo Completo: En este tipo de procesos se trabaja con todo el material obtenido en cultivos agrícolas, destacan como ejemplo el maíz o centeno. En estos casos se debe extraer el almidón de la harina, proveniente a su vez del grano, e hidrolizarlo para la obtención de glucosa, que a diferencia del almidón sí es fermentable por microorganismos. A partir de ésta última se puede producir bioetanol y otros productos químicos de interés como el ácido láctico o succínico. Se extraen también los otros componentes del grano, reaprovechando la fracción protéica y la lignina, celulosa y hemicelulosa para transformarlos en otros productos de valor.
 - Biorefinería Lignocelulósica: En este tipo de biorefinerías se emplea madera, residuos agrícolas, cultivos energéticos y residuos municipales. El material lignocelulósico es fraccionado en lignina, celulosa y hemicelulosa. Estos componentes se hidrolizan obteniéndose sacáridos como la glucosa o xilosa. Estas sustancias ya son transformables a productos de valor añadido. Los residuos del procesado se utilizan para la obtención de energía eléctrica y térmica de suministro para la propia planta.
 - Biorefinería Marina: En estas se trabaja con biomasa de origen acuático, representando este tipo un 50% de la producción total. Dependiendo del tipo de alga que se procese se producen diferentes productos. Para que la

utilización de microalgas como fuente de alimentación constituya un proceso económicamente viable a nivel industrial se deben incorporar sistemas adicionales al de producción de energía, tales como plantas de tratamiento de aguas residuales o procesos de reaprovechamiento para la obtención de complementos alimenticios, productos de cosmética, etc.

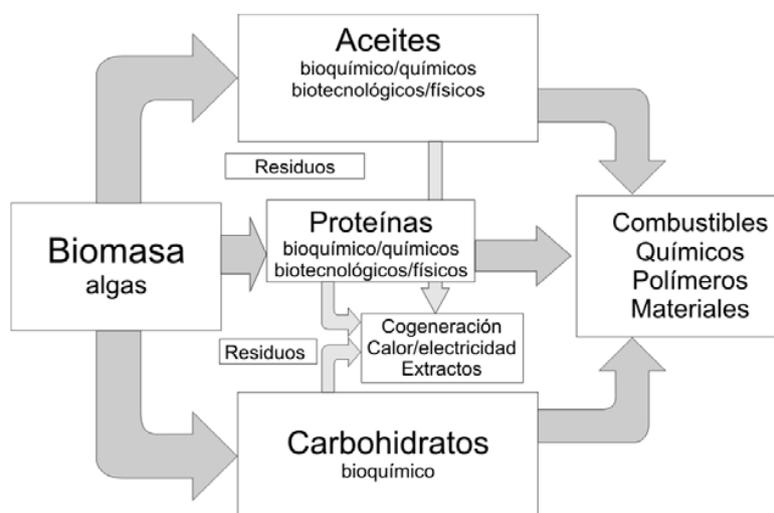


Figura 1: La biomasa algal y sus aplicaciones. Fuente: Cárdenas R., 2012

- Según el tipo de tecnología implementada:
 - Biorefinería Termoquímica: Se trata de instalaciones basadas en la descomposición por procesos termoquímicos de la biomasa. Constan de las siguientes etapas, pretratamiento (secado, triturado, etc), alimentación, conversión (pirólisis o gasificación), limpieza, acondicionamiento y producto final. La gasificación es el proceso de conversión más extendido y permite la obtención de una mezcla de compuestos como son el CO, CO₂, CH₄ y H₂, que debidamente acondicionada desembocará en lo que se conoce como gas de síntesis. El gas de síntesis, formado mayoritariamente por monóxido de carbono e hidrógeno, puede tratarse para la obtención de biocombustibles de segunda generación.
 - Biorefinería Biológica: En este tipo de plantas los procesos de transformación de la biomasa son bioquímicos. Éstos ocurren normalmente, a diferencia de los procesos termoquímicos, a temperaturas más próximas a la ambiental. La biomasa se degrada por acción del crecimiento y desarrollo de procesos biológicos llevados a cabo por microorganismos. De entre los más conocidos destaca la fermentación, para la producción de etanol, y la digestión anaeróbica, para la producción

de biogás.

- Según la madurez de la tecnología utilizada:
 - Biorefinería de Primera generación: Se producen biocombustibles como el biodisel y biotetanol, la eficiencia de dichos procesos está demostrada.
 - Biorefinería de Segunda generación: Se producen en éstas carburantes cuya viabilidad aún se estudia, como pueden ser etanol, Etil-Terbutíl-Éter (ETBE) a partir de biomasa lignocelulósica (cuyo cultivo no compite con el de destino alimenticio), biocombustibles Fischer-Tropsch, biohidrógeno o biometano. La producción de estos biocombustibles presente una clara ventaja en cuanto al aprovechamiento de la biomasa y los recursos y es ahí donde yace el interés por su desarrollo.

Queda por lo tanto demostrado que el concepto de biorefinería engloba un mundo extenso en el que la variedad de materias primas, procesos de transformación y productos obtenidos es amplia.

3.2 Materias primas en las biorefinerías

La biomasa se define como aquella materia orgánica de origen vegetal o animal susceptible de ser aprovechada energéticamente. En general, está constituida por un 95% de carbohidratos, lignina, grasas y proteínas y un 5% de vitaminas, colorantes, aromatizantes y pequeñas moléculas. La mayoría de dichos componentes son extraíbles por diferentes rutas de transformación de la materia prima, objeto de trabajo de las biorefinerías.

Para continuar profundizando en el tema se presenta un resumen de cuáles son los distintos tipos de alimentación propios de una biorefinería. La biomasa puede tener en general tres procedencias: la naturaleza, la corriente residual de un proceso industrial o el desarrollo de cultivos energéticos. También se puede hacer una clasificación a partir del sector de origen, así:

- Sector agrícola: cultivos energéticos y residuos agrícolas.
- Sector forestal: madera, cultivos energéticos y residuos de la industria maderera.

- Sector industrial: subproductos/residuos de los procesos industriales.
- Actividades domésticas: residuos orgánicos municipales.
- Acuicultura: algas y microalgas.

Se puede clasificar también según el producto que se quiere obtener a partir de su procesado. Se encuentran:

- Materias primas cultivadas
 - Cultivos lignocelulósicos: madera, cultivos energéticos leñosos de corta duración (chopa, eucalipto) o cultivos energéticos herbáceos (miscanto, caña común).
 - Cultivos de biomasa azucarada: remolacha azucarera y caña de azúcar.
 - Cultivos de biomasa amilácea: trigo, maíz, sorgo dulce.
 - Cultivos oleaginosos: colza, soja, palma, etc.
 - Cultivos acuáticos: algas y microalgas.
- Residuos:
 - Residuos lignocelulósicos: residuos de cultivos y aserraderos.
 - Residuos con alta composición de aceite: grasa animal de la industria alimentaria y aceite usado del sector de la restauración o de hogares.
 - Residuos orgánicos: procedentes de hogares (residuos municipales) o del sector agrícola (purines, estiércol).

Todas las variedades mencionadas son susceptibles de utilización en las biorefinerías ya que, por naturaleza, albergan un elevado porcentaje de energía (en diferentes presentaciones) en su interior. Dicha energía será extraída a partir del uso de tecnologías adecuadas de procesado.

3.3 Productos obtenidos en las biorefinerías

Con el fin de representar de forma clara cuál es el interés por el desarrollo de las biorefinerías se presenta a continuación un resumen de la gran variedad de productos con valor añadido obtenidos en las mismas.

Tras el tratamiento de la biomasa utilizada como alimentación en estas plantas de producción se obtienen productos englobados en dos categorías:

- Productos de base biológica:
 - Productos químicos: propios de la industria química fina, productos aromáticos, aminoácidos, polialcoholes, ácidos (succínico, láctico, furfural...), fenoles, etc, de gran importancia para la industria química y farmacéutica.
 - Polímeros y resinas: producidos por la conversión bioquímica de monómeros de biomasa con ácido poliláctico (PLA), resinas fenólicas y furánicas.
 - Biomateriales: fibras de celulosa y papel; fibras de madera.
 - Productos para la alimentación animal y humana.
 - Fertilizantes.
- Productos energéticos:
 - Biocombustibles gaseosos: biogás, gas de síntesis, hidrógeno y biometano.
 - Biocombustibles sólidos: pelets, lignina, carbón vegetal.
 - Biocombustibles líquidos: bioetanol, biodiesel, biocombustibles Fischer-Tropsch y bio-aceites.

Como ya se ha comentado con anterioridad, existen los biocombustibles denominados de primera generación se elaboran a partir de cultivos de interés alimentario, y los de segunda generación son aquellos obtenidos a partir de material lignocelulósico o algas y que en este caso no interfieren en el conflicto ético de tratarse de alimentos.

3.4 Biorefinerías en el territorio Español

Como se ha comentado en anteriores apartados del presente documento, la instalación de plantas para la producción de productos de interés comercial a partir de la transformación de biomasa ha incrementado sorprendentemente a lo largo de los últimos años. Se considera apropiado en relación, puntualizar cuáles son los progresos en el sector de las biorefinerías y el estado actual del mismo.

Por su parte la UE financia proyectos de investigación e innovación relacionados con este tipo de industrias, como es el caso del programa Horizonte 2020. De hecho, la iniciativa tecnológica Bio-Based Industries (BBI), con un presupuesto de casi 3.000 millones de euros hasta 2020 ha abierto convocatoria para recibir propuesta y potencia así el sector de las biorefinerías englobado bajo el sector de la bioeconomía, en auge a nivel Europeo.

Queda por lo tanto patente el interés de las entidades Europeas para la financiación de proyectos novedosos que impulsen el sector de las biorefinerías vistas como una alternativa que pretende reaprovechar residuos de origen natural para extraer de ello un beneficio económico.

A nivel del estado Español y tomando parte del consorcio Internacional privado BBI, cabe destacar la actividad de la empresa Abengoa que toma como uno de sus focos principales la producción de biocombustibles de segunda generación y biorefinerías. Dicha empresa ha puesto en marcha plantas situadas a lo largo del mundo. Destaca en estados unidos una biorefinería situada en el estado de Kansas, EEUU, que tiene una capacidad de producción superior a los 100 millones de litros anuales. En el continente europeo existen plantas en diversos países entre los cuáles se encuentran Francia y los Países Bajos además de España. En éste último, tomando como materia prima los residuos sólidos urbanos la compañía cuenta con una planta en Salamanca con el objetivo de validar y analizar la tecnología para ver si resulta reproducible y económicamente viable en cualquier lugar del mundo. Dicha planta puede tratar en la actualidad biomasa de base lignocelulósica y residuos urbanos procesando hasta 25.000 toneladas anuales. Las demás plantas, enfocadas a la producción y comercialización, se encuentran en las comunidades de Galicia y Murcia.

Tabla 1: Plantas de producción de Abengoa en España. Fuente <http://www.abengoabioenergy.com>.

Nombre	Cons. biomasa (Tn)	Prod. bioetanol (Tn)	Prod. electricidad (MWh)
Bioetanol Galicia	340.000	130.000	204.000
Ecocarburantes Españoles	300.000	110.000	135.000
Biocarburantes Castilla y León	585.000	120.000	204.000

Se muestra en la Tabla 2 el listado de las principales plantas de producción de biodiesel en España y su producción anual correspondiente.

Tabla 2: Principales plantas de producción de biodiesel, España. Fuente <http://www.biodieselspain.com>.

Nombre	Provincia	Prod. (Tn)
Biocarburantes CLM (Natura)	Toledo	105.000
Biocombustibles de Ziérbana (BZ)	Vizcaya	200.000
Bioenergética Extremeña (Bionex)	Badajoz	250.000
Infinita Renovables Castellón	Castellón	300.000
Linares Biodiesel Technologies	Jaen	100.000
Saras Energía	Murcia	200.000
UTE Isolux Infinita Renovables Corsan Covian	Sevilla	150.000

En resumen en este apartado queda representado el creciente interés en el desarrollo de este tipo de plantas de producción y las grandes posibilidades que las mismas ofrecen.

4. Las microalgas y sus aplicaciones

En este apartado se pretende introducir el mundo de las microalgas, desde su definición más básica hasta las ventajas que la impulsan como producto cuyo desarrollo está en pleno auge pasando por los modos de cultivo y las aplicaciones finales de dichos organismos.

La importancia de las microalgas para el desarrollo de la humanidad es clara, estos organismos nos proporcionan, a través de la conocida fotosíntesis, el oxígeno que los seres humanos utilizamos para respirar. A su misma vez y mediante su proceso de respiración, consumen y fijan en su interior hasta 2kg de CO₂ por kg de microalga.

Además, a la vez que crecen y se desarrollan ofreciendo las ventajas comentadas también aumenta en peso la cantidad de biomasa y con ello la cantidad de componentes que la forman, resultando en una fuente rica en proteínas, carbohidratos y lípidos. Esta última característica transforma a las microalgas en una base de producto consumido en el sector alimentario, de la acuicultura, cosmético y energético. En línea con éste último, la comunidad científica internacional coincide en que, en un futuro no muy lejano, las microalgas generarán de manera competitiva energía limpia y biocombustibles de segunda generación, contribuyendo con ello al desarrollo sostenible en términos medioambientales y económicos al tratarse de un recurso inagotable, que necesita de pocos recursos y con una productividad muy elevada que además no presenta ningún conflicto ético al no ocupar tierra agrícola para su cultivo.

Para acabar, algunas de las características que hacen de las microalgas un producto de biomasa con elevado interés son:

- Crecen rápidamente, las células se duplican en un periodo de 1 a 10 días.
- Son ricas en lípidos; niveles de aceite de entre el 20 % y el 50 % son bastante comunes.
- Son los microorganismos con mayor capacidad de fijación de CO₂.
- No son un recurso alimentario común, su producción no supone un conflicto ético y sus condiciones de crecimiento permiten el reaprovechamiento de aguas residuales no potables.

Queda por lo tanto justificado el interés por el desarrollo de procesos productivos a base de microalgas y en línea con ello se profundizará a continuación en el mundo de las mismas.

4.1 Composición y metabolismo

Como se ha comentado con anterioridad, la composición de las microalgas define los intereses de dicho organismo como producto, le dan la utilidad que tienen. Es por eso que resulta interesante mencionar cuales son los principales componentes de este tipo de biomasa y como varían. La composición química de las microalgas se basa de proteínas, carbohidratos, grasas y ácidos nucleicos, variando las proporciones de cada uno en función de la especie y las condiciones del medio de cultivo.

En función de las necesidades a cubrir con el producto final se optará por lo tanto por el cultivo de un u otro tipo de alga. De entre los géneros más estudiados destaca *Chlorella* y *Spirulina*. Por su parte, *Chlorella* es una microalga verde eucariota cuya composición destaca por un elevado porcentaje de lípidos en masa, de un 20-30%, por lo que suele resultar interesante en la producción de biocombustibles. Por otro lado, *Spirulina* corresponde a un tipo especial de microalgas al tratarse realmente de cianobacterias procariontes cuya composición se compone mayoritariamente, en un 50-60%, de proteínas por lo cuál la producción de dicho género se centra mayormente en la industria farmacéutica y alimenticia.



Figura 2: Imagen microscópica de *Chlorella*, Fuente: google imágenes.



Figura 3: Imagen microscópica de *Spirulina*. Fuente: google imágenes.

Cabe también comentar que los diferentes géneros de microalgas pueden desarrollarse a partir de diferentes tipos de metabolismo. Generalmente se trabaja en condiciones fotoautótrofas en los cuáles el alga posee el potencial para convertir el dióxido de carbono como fuente de carbono inorgánico en biocombustibles, alimentos y especialidades químicas de alto valor añadido mediante la utilización de luz como fuente de energía. Si bien es cierto, existen microalgas cuya fuente de energía es el carbono orgánico proveniente en muchos casos de glucosa y que se desarrollan en ausencia de luz, como es el caso de *Chlorella protothecoides* que se englobaría en el grupo de las heterótrofas. Finalmente, los cultivos mixotróficos toman como fuente de energía tanto el carbono orgánico, ya sea en forma de almidón hidrolizado, glicerol, etanol o azúcares, como la energía lumínica, se trata por lo tanto de una combinación de metabolismo heterótrofo y fotoautótrofo complejo que podría bajo las condiciones adecuadas desencadenar en una concentración final de biomasa duplicada.

4.2 Parámetros de influencia al crecimiento

Existen en relación factores del medio que influyen al crecimiento de las microalgas y que pueden variarse en función de la composición deseada de las mismas, que vendrá influida por su utilización final. Las condiciones del medio de cultivo son un factor determinante que puede ajustar el contenido de la biomasa, los parámetros de control críticos son:

- Luz

Se trata del factor más crítico y limitante para el crecimiento de las microalgas. Los nutrientes, tanto a base de compuestos orgánicos como inorgánicos, pueden ser incorporados al medio en exceso mientras que la intensidad lumínica debe ser

continuamente suministrada al cultivo, al tratarse de una energía no acumulable.

Los organismos que llevan a cabo la fotosíntesis toman la luz del sol como alimentación al proceso, dicha luz se absorbe en este caso en el rango de 350 a 700nm de longitud de onda llamada región fotosintéticamente activa, limitando esto a un aprovechamiento del 42% de la radiación solar global.

Cabe también considerar que existe un máximo de intensidad aprovechable, a partir del cual el crecimiento se limitaría al ocasionarse un daño de los sistemas que intervienen en la fotosíntesis.

Con el afán de superar dichas limitaciones existe por lo tanto la posibilidad de incorporar iluminación artificial con la finalidad de contribuir a una producción continua a cambio de una inversión energética y económica también a considerar.

En el desarrollo de sistemas de cultivo de microalgas, es importante por lo tanto conocer el espectro de absorción de la especie con la que se trabaja para poder así seleccionar la fuente de luz más apropiada. Dicho espectro depende de los pigmentos mayoritarios presentes en el organismo. De entre las tipologías de luz artificial, el sistema LED es el que ofrece una opción más eficiente y económica, emitiendo más del 98% de su luz en longitudes de onda absorbibles y aprovechables para el crecimiento.

- Nutrientes

Los principales nutrientes que las microalgas toman del medio para su desarrollo son:

- Carbono

Las microalgas autótrofas emplean el CO_2 como fuente de alimentación, siendo útil el presente en la atmósfera o proveniente de la actividad industrial. Son capaces de tolerar concentraciones elevadas de CO_2 . Siguiendo con los compuestos inorgánicos se pueden también alimentar dichos organismos de Na_2CO_3 Y NaHCO_3 como fuente de iones bicarbonato.

Por otro lado existen microalgas heterótrofas, cuya fuente de carbono son los compuestos orgánicos y mixotróficas, que se alimentan de compuestos orgánicos e inorgánicos.

➤ Nitrógeno

Se trata de otro de los nutrientes principales para el crecimiento de algas. Éstas pueden tomar nitrógeno del medio generalmente en forma de urea, nitrato, nitrito, amonio, nitrógeno gas y óxidos de nitrógeno. Todavía no se ha demostrado cual es la forma de nitrógeno más beneficiosa energéticamente, pero si se opta por el amonio, cabe comentar que el crecimiento de biomasa algal se puede ver limitado para elevadas concentraciones ya que el compuesto inhibe partes del proceso fotosintético y compite con el agua en las reacciones de oxidación para la producción de oxígeno. En función de la especie seleccionada, las concentraciones máximas de amonio varían entre los 200mg/L para *Spirulina* y 400mg/L para *Chorella sorokiniana* (Cárdenas R., 2012)¹.

➤ Fósforo

Este compuesto, también esencial para el desarrollo de las microalgas aunque en cantidades menores que los anteriores, se toma del medio en forma de ortofosfatos, la concentración de las formas protonadas depende del pH del medio. Factores como un pH excesivamente alto o bajo, o la ausencia de iones como potasio, sodio o magnesio, ralentizan la toma de fosfatos.

Con relación a la concentración de fósforo, cobra importancia la relación N:P en el medio de cultivo. Dicha relación debe ser próxima a la propia de la especie, tratándose en el caso de *Chorella* de 8:1.

Aunque el carbono, nitrógeno y fósforo son los componentes esenciales, el medio de cultivo debe contener también macronutrientes/micronutrientes. Estos últimos elementos traza resultan importantes en el desarrollo de reacciones enzimáticas y en la biosíntesis de compuestos necesarios para el metabolismo. Al igual que el fósforo, estos micronutrientes tienen tendencia a la unión con otros componentes del medio y en consecuencia la precipitación es habitual. Para evitarlo se añaden al medio agentes quelantes de metales como el EDTA (Na-EDTA más concretamente al ser fácil de disolver).

■ pH

Este factor tiene influencia directa sobre la forma química de los nutrientes en disolución. Además, en el proceso de fijación del CO₂ el pH del medio aumenta debido a la acumulación de grupos hidroxilo, y debido a este aumento puede ocasionar la eliminación de parte del nitrógeno en forma de amoníaco a la atmósfera y del fósforo disponible por precipitación del mismo.

El pH en la mayoría de especies debe mantenerse entre 7 y 9. Es por lo tanto imprescindible

el control de dicho parámetro, realizándose el mismo mediante aireación o inyección controlada de dióxido de carbono o corrección del valor mediante incorporación de ácidos y bases.

- Oxígeno

El nivel de oxígeno disuelto en el medio de cultivo debe ser controlado ya que a elevadas concentraciones dicho oxígeno puede inhibir la acción de la enzima que participa en el proceso de fijación de CO₂, complementándose con un déficit de este gas o una irradiación y temperatura demasiado elevadas.

En cultivos de alta densidad, las microalgas pueden llegar a producir elevadas tasas de oxígeno que en combinación con una irradiación adecuada, se puede dar la formación de radicales libres que son tóxicos para las células. En definitiva, puede ser recomendable ajustar y disminuir la presión parcial de oxígeno en medio mediante un aumento de turbulencia y *stripping* de aire.

- Agitación

Un buen sistema que mantenga el nivel de agitación en el medio en un rango adecuado permite impedir la sedimentación y acumulación de las algas, homogeneiza el pH y la distribución de nutrientes y luz. El flujo turbulento es propio para cultivos de moderada densidad, aunque si bien es cierto que debe considerarse que en ocasiones la agitación fuerte supone daños sobre las algas que son sensibles al estrés hidrodinámico.

- Temperatura

Como es sabido, la temperatura tiene una relación exponencial con las constantes cinéticas que controlan la velocidad de reacciones fotosintéticas. Algunas de las especies de microalgas se adaptan con facilidad a temperaturas en un rango de 5-42°C, como es el caso de *Chorella* Cárdenas R., 2012)¹.

Para el control de la temperatura son importantes los sistemas de irradiación de luz y los sistemas de refrigeración, pudiéndose aprovechar en ocasiones el calor recuperado del mismo proceso de producción. El sistema de refrigeración puede ser substituido si se incorpora un mecanismo que proporcione un control sobre la cantidad de luz transmitida, como pueden ser los sistemas de sombra o dilución de luz.

4.3 Rutas de obtención de biocombustibles

Una vez clarificadas las características principales de las microalgas como microorganismo, las que le otorgan un interés como producto de comercialización o procesado, cabe también dar una breve reseña a las vías de obtención de biocombustibles a partir de dicha biomasa, encuadrándose esto en el objetivo principal del diseño del fotobiorreactor del presente proyecto.

Se presenta una clasificación que diferencia entre aquellas rutas que producen biocombustibles de forma directa de aquellas que deben contar con un posterior procesado.

Para la producción directa de biocombustibles a partir de algas se puede optar por el desarrollo de:

- Fermentación heterotrófica: A partir de la fermentación heterotrófica del almidón las microalgas producen alcohol y alcanos. El almidón puede acumularse en el interior de las células o bien ser incorporado en el medio de forma directa, una vez obtenido, las rutas metabólicas de las microalgas en ausencia de luz propiciará la obtención de etanol.
- Biofotólisis: Se trata un proceso desencadenado por la luz en algunos sistemas biológicos que da como resultado la disociación del agua en oxígeno e hidrógeno moleculares. La intensidad de la luz y la privación de nutrientes en condiciones anaerobias son factores ambientales clave para inducir la producción de hidrógeno en el caso de las microalgas.

Existen otros procesos biológicos que van acompañados de un procesado completo de la biomasa para la obtención de biocarburantes. Los principales son:

- Pirólisis: La pirólisis de biomasa es la descomposición térmica de la misma en ausencia de oxígeno para producir líquido, carbón y gas. La fracción líquida es el aceite de pirólisis o "bio-oil". Según ciertos estudios, este tipo de aceite exhibe un contenido en carbono e hidrógeno más alto, un contenido en oxígeno más bajo y un poder calorífico mayor que el que se obtiene a partir de materias primas lignocelulósicas.
- Gasificación: Consiste en someter a la biomasa a degradación térmica en presencia de un agente oxidante (aire, vapor u oxígeno) para obtener gas de síntesis, siendo este formado principalmente por hidrógeno y monóxido de

carbono. Dicho producto es parte intermedia en el proceso de producción de gas natural sintético y otros combustibles introduciéndolo por ejemplo al proceso de Fischer Tropsh para la producción de hidrocarburos líquidos.

- Licuefacción: Consiste en la descomposición en moléculas más pequeñas de la biomasa algal a partir del uso de agua en condiciones subcríticas. El producto principal de la licuefacción es un bio-petróleo que puede ser procesado posteriormente de manera similar al petróleo convencional.
- Digestión anaerobia: Los métodos actuales de producción de biocombustibles a partir de algas producen un 60%-70% de biomasa residual como subproducto. La digestión anaerobia de dicho subproducto puede producir biogás y nutrientes esenciales.

Para finalizar, se comentan los procesos desarrollados para la obtención de biocarburantes a partir de los componentes algales como los lípidos y carbohidratos:

- Transesterificación de aceite: Los triglicéridos reaccionan con metanol en presencia de un catalizador para dar lugar a los FAME (biodiesel) y glicerol como subproducto a partir de los lípidos extraídos de la biomasa.

5. Sistemas de cultivo de microalgas

En el apartado 4.2 se introducían los principales requerimientos para el crecimiento de microalgas y los parámetros críticos de control en dicho proceso. En línea con ello se introducen los sistemas de cultivo en los cuales se puede llevar a cabo el proceso de producción de la biomasa dando mención a las ventajas de las diferentes alternativas (Lamiot, F. et al., 2014)².

Existe una diferenciación genérica entre sistemas abiertos, naturales o artificiales, y los sistemas cerrados.

- Sistemas abiertos

Se distinguen entre aguas superficiales naturales (estanques, lagunas y lagos) y estanques artificiales. De entre los sistemas artificiales destacan el de diseño inclinado, los circulares y los canales.

- Piscinas inclinadas

En este tipo de sistemas la turbulencia necesaria es creada por la propia gravedad. No suele ser la alternativa de cultivo más utilizada ya que comporta problemas de evaporación y aumenta la probabilidad de sedimentación en zonas cuya velocidad de flujo sea menor. Los inconvenientes más claros de este tipo de sistemas son el aprovechamiento ineficiente del terreno y el coste energético del bombeo de cultivo desde la parte inferior a la superior de la piscina.

- Tanques circulares

Se trata de construcciones circulares de hormigón de diámetro variable y cuyo sistema de agitación consta de una pala sobre un eje de rotación que recorre toda la superficie. Sería probablemente el segundo tipo de sistema abierto artificial más utilizado aunque sigue sin salvar algunas claras desventajas como el poco aprovechamiento del terreno, los costes energéticos y de construcción.

- Canales

Son los sistemas abiertos más extendidos. Suelen ser canales de hormigón ovalados y con una profundidad entre 15-20cm para fomentar la captación de luz y CO₂ atmosférico. Aunque el diseño del estanque lo propicie, se pueden incorporar difusores en el fondo y reflectantes de luz si se utilizan estanques de mayor profundidad. El canal resulta un circuito cerrado con sistemas de recirculación y

mezclado. Los mecanismos más utilizados para la homogeneización del cultivo son los rodetes, hélices e inyectores de aire.

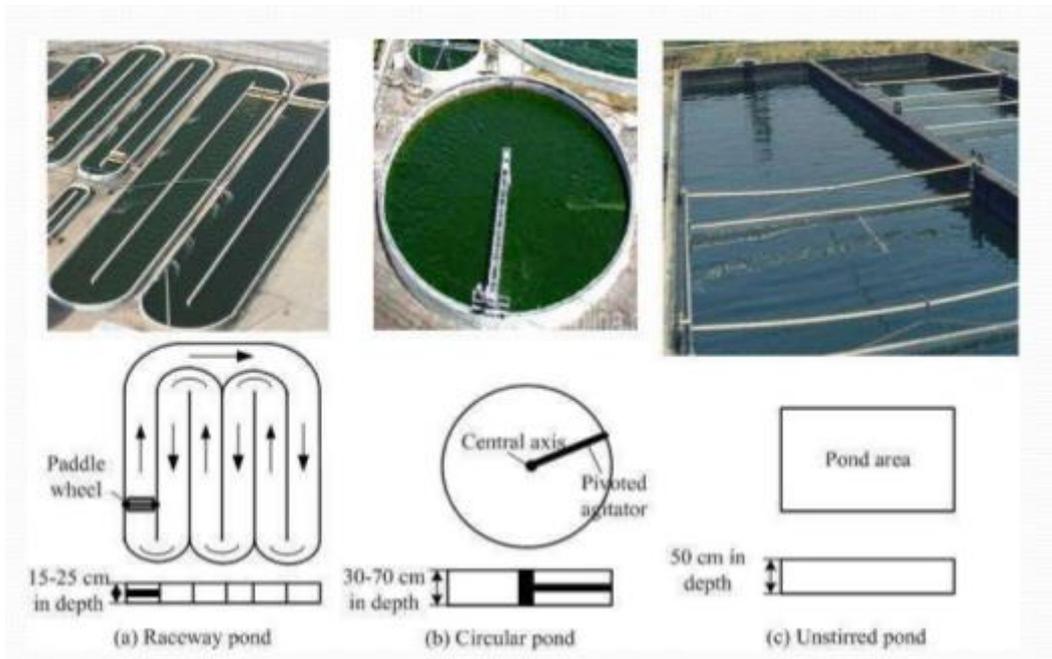


Figura 4: Principales tipos de sistemas abiertos. Fuente: google imágenes.

- **Sistemas cerrados:** Se encuentran en total aislamiento con respecto a la atmósfera. Los principales son los fotobiorreactores; sistemas cerrados diseñados para la optimización del crecimiento microalgal. Al tratarse, en parte, de reactores al uso incorporan sistemas de regulación y control de los parámetros de crecimiento comentados en el apartado 4.1 con lo que la producción deseada se ve fortalecida y será reproducible. Además su naturaleza de sistema cerrado hace que disminuyan el riesgo de contaminación y las pérdidas de CO_2 . Los diseños más ampliamente utilizados se comentarán con detalle en el apartado 5.1 del presente documento.

En definitiva los tipos de cultivo para el crecimiento de microalgas se deben seleccionar considerando criterios económicos y de productividad, resultando unas u otras alternativas más interesantes en cada ocasión. A continuación se puede observar, en la Tabla 3, el conjunto de desventajas y ventajas para cada tipo de sistema, punto a partir del cual la selección puede resultar más fácil.

Tabla 3: Comparativa entre los sistemas abiertos y cerrados.

	Sistema abierto	Sistema cerrado
Tecnología asociada	Sencilla	Compleja
Coste de inversión/mantenimiento	Bajo	Alto
Coste de consumo energético	Bajo	Alto
Riesgo de contaminación	Muy alto	Muy bajo
Riesgo de estrés hidrodinámico	Bajo	Moderado
Control de parámetros de proceso	Difícil	Fácil
Eficiencia fotosíntesis	Moderada	Elevada
Capacidad fijación CO ₂	Moderada	Elevada
Productividad	Moderada	Elevada
Coste de recolección de la biomasa	Elevado	Bajo
Escalado	Fácil	Difícil
Optimización del proceso	Limitada	Posible

5.1 Tipos de fotobiorreactores y materiales

Como se ha comentado en el apartado 5 del presente documento, existen dos tipos principales de sistemas de cultivo de biomasa algal; los sistemas abiertos o estanques, y los sistemas cerrados o fotobiorreactores. Entrando en detalle en este último tipo, en consonancia con el objetivo de diseño de este proyecto, se describen a continuación los principales tipos de fotobiorreactores y sus respectivas ventajas e inconvenientes desde el punto de vista productivo y económico.

- Fotobiorreactor de película

Los reactores de placas planas o “Flat Plat Reactors” están formados por paneles, generalmente de plástico ya sea flexible o rígido, estrechos de hasta 2m de altura y

separados entre sí de 1 a 20cm. El diseño de este tipo de reactores permite que la relaciones de área/volumen y superficie irradiada/superficie sean elevadas. Las placas están conectadas entre ellas, y es en la zona de unión donde se incorporan los sistemas de introducción de gas y nutrientes. En cuanto al bombeo de CO₂ éste se suele realizar por la parte baja del panel para asegurar el contacto con las algas. Se resumen a continuación las ventajas e inconvenientes más notorios para este tipo de sistemas cerrados:

Tabla 4: Ventajas e inconvenientes del fotobiorreactor de placas planas.

Ventajas	Inconvenientes
Concentración de oxígeno disuelto baja	Dificultad de escalado
Alta rel. superficie iluminada /volumen	Control de la temperatura difícil
Diseño simple	Riesgo de estrés hidrodinámico

En resumen se trata de reactores económicos y con datos de productividad satisfactorios, aunque la simplicidad del sistema induce a una dificultad en el control de parámetros de crecimiento y escalado. En la Figura 5 se puede observar un ejemplo de reactor de película.



Figura 5: Fotobiorreactor de película. Fuente: Centro de i+d+i Universidad Politécnica de Madrid.

- Fotobiorreactor de columna con burbujeo

Los fotobiorreactores de columna vertical o “Airlift” constan de un tubo vertical de material transparente, de altura generalmente entre 1 y 3m y un diámetro que oscila entre 5 y 50cm, en el que se burbujea aire desde el fondo como sistema de agitación. Son compactos y de bajo coste, y muy sencillos de esterilizar y de operar monosépticamente. Se estima que pueden ser adecuados para el cultivo a gran escala, sin embargo, tampoco existen aplicaciones comerciales.

Por su posición vertical absorben menos radiación que los dispuestas horizontalmente, pero no acumulan oxígeno. Estos reactores suelen utilizarse como sistemas de producción de inóculos debido al elevado control de las condiciones de operación.

Tabla 5: Ventajas e inconvenientes de los reactores de columna con burbujeo (Airlift).

Ventajas	Inconvenientes
Baja acumulación de oxígeno	Descenso de la radiación solar incidente
Fácil de esterilizar	Limitada relación superficie/volumen
Elevado control de parámetros de operación	-

La Figura 6 muestra un ejemplo de aplicación este tipo de diseño para el cultivo de microalgas.



Figura 6: Fotobiorreactor de columna. Fuente: <http://www.nanovoltaics.com/content/algae-photobioreactors>

- Fotobiorreactor tubular

Los reactores tubulares se forman de haces de tubos, bien sean verticales, horizontales o inclinados, conectados como un sistema de tuberías mediante codos. El diámetro de los tubos suele oscilar entre los 5 y 20cm y la longitud del sistema varía ampliamente. El fluido algal es capaz de circular por esta línea de tuberías gracias a los sistemas de bombeo que se incorporan a la entrada del sistema. Los tubos se suelen fabricar, de forma similar a los casos previos, de plásticos transparentes o vidrio de borosilicato. Debe incorporarse un sistema de stripping del oxígeno acumulado para reducir los niveles del gas, para ello se pueden incorporar un sistema tipo airlift como el que se describirá posteriormente en el presente proyecto.

Este tipo de reactores gozan de una alta relación área iluminada/volumen reactor. La transferencia de materia así como el grado de agitación son limitados, causando altas concentraciones de O₂. En consecuencia, los problemas de fotoinhibición son comunes, ya que si no hay un buen grado de mezcla las células de la superficie reciben grandes cantidades de luz, mientras que a las interiores no les llega la suficiente.

Se resumen a continuación las ventajas e inconvenientes más notorios para este tipo de sistemas cerrados:

Tabla 6: Ventajas e inconvenientes de los fotobiorreactores tubulares.

Ventajas	Inconvenientes
Alta relación superficie iluminada/volumen	Acumulación de O ₂
Elevada productividad	Elevada necesidad de potencia de bombeo
Sistema altamente compacto	Complejidad de diseño



Figura 7: Fotobiorreactor tubular vertical. Fuente: www.algaenergy.es



Figura 8: Fotobiorreactor tubular horizontal. Fuente: google imágenes.

Con respecto a los materiales, se trabajará con aquellos que sean translúcidos y permitan así la absorción de la luz, ya sea natural o artificial. Además, es importante que el material no sea tóxico para los microorganismos en crecimiento y que ofrezca una resistencia mecánica elevada. La facilidad para la limpieza del reactor también será un factor a considerar junto con el precio. A continuación se presenta una tabla resumen de los principales pros y contras para los materiales de uso más común.

Tabla 7: Ventajas y desventajas de los dos grandes grupos de materiales para la construcción de fotobiorreactores. Fuente: Cárdenas R., 2012.

	Ventajas	Desventajas
Plástico	Alta productividad Control básico del cultivo	Requiere limpieza intensiva 4 años de vida útil Adherencia de algas al material
Cristal	Alta productividad Posibilidad de producción continua Tiempo mínimo de mantenimiento Vida útil 30 años Bajo consumo energético Bajos coste de mantenimiento	Mayor coste por inversión

De entre los materiales más utilizados, se debe proceder al estudio de sus propiedades (al menos las más relevantes para el tipo de aplicación que se le va a dar), para poder proceder a una selección con un grado aceptable de objetividad.

En el presente proyecto se desarrolla el diseño de un fotobiorreactor para la producción a nivel de escala piloto. Considerando que los fines son científicos no resulta necesario realizar una inversión elevada en un fotobiorreactor de vidrio. Por ello se opta por profundizar en las propiedades de los diferentes tipos de plástico utilizados, que se puntualizan en la Tabla 8.

Tabla 8: Propiedades de los plástico utilizados en fotobiorreactores. Fuente: Cárdenas R., 2012.

Propiedad	Plástico acrílico rígido	LPDE
Calor específico (J/Kg·K)	1465	2936.7
Conductividad térmica (W/m·K)	0.18	0.29
Transmisividad de la luz (%)	92	80
Energía retenida (MJ/Kg·m)	13.5	72.8

En la sección de cálculos del presente proyecto se determinará la elección final del material de construcción del fotobiorreactor a diseñar.

6. Estado del arte del cultivo de microalgas

Remontándose a los inicios del cultivo de microalgas destacan los estudios de Beijerinck, de 1890 que estudió las condiciones de crecimiento de una de las algas más extensamente implantadas hoy en día y objeto de estudio en este proyecto; *Chlorella vulgaris*. Por otro lado, el salto hacia el cultivo de estos microorganismos a gran escala, ya una vez descubierto su enorme potencial para la comercialización de diferentes productos en diferentes ámbitos de la industria, tuvo su origen en Alemania en los años cuarenta, donde se llevó a cabo el cultivo masivo de diatomeas que acumulaban grandes cantidades de lípidos cuando el medio era pobre en nitrógeno. Este fue el precedente principal a partir del cual se desarrollaron otras investigaciones con el fin de explotar el potencial de las microalgas, destacan las llevadas a cabo en Stanford, Essen y Tokio. A principios de los 60, precisamente en Japón, se prosiguió con los estudios sobre la producción de *Chlorella* a nivel industrial (Tsukada et al. 1977)³. En cuanto a otra de las microalgas de interés principal, la especie denominada como *Spirulina*, se estableció también en los años setenta en México una instalación para su recolecta (Durand-Chastel et al., 1980)⁴. En Tailandia en 1977 dos grandes compañías, Dai Nipón Ink. Y Chemicals Inc., invirtieron en una planta comercial de *Spirulina*.

Como se ha comentado las dos especies de microalgas de uso más establecido son *Chlorella* y *Spirulina*, pues bien, el lugar de implantación pionero en cuanto al cultivo de estas y otras especies de microalgas a nivel industrial es sin lugar a dudas Japón. En 1996 se comercializaron allí cerca de 200t de *Chlorella* (Lee et al., 1997)⁵ y sobre unas 400t de *Spirulina* (Borowitzka et al., 1999)⁶, creciendo la producción de esta última hasta aproximadamente 1000t en el 2000 (Borowitzka et.al., 1999)⁶.

En resumen, aunque el estudio de las microalgas tienen sus primeras referencias en el siglo pasado, es a partir de los años 70 cuando aparecen las primeras plantas comerciales dentro del sector de la industria biotecnológica de las microalgas. Dicho sector crece significativamente con el paso de los años, gracias a la incipiente optimización de los procesos para que el cultivo a gran escala y el tratamiento de la biomasa para obtener productos finales de interés comercial sea económicamente provechoso.

6.1 Cultivo de microalgas para la obtención de biocarburantes

La idea original de utilizar los gases de combustión como fuente de carbón inorgánico para el crecimiento microalgal y su conversión a biocombustible surgió por primera vez en el año 1955, durante una reunión de la Solar Energy Society (Arizona, USA) tomando como precedente el cultivo para el tratamiento de aguas residuales urbanas (Oswald et al. 1957)⁷.

Después de la crisis energética de los 70, el cultivo de microalgas como fuente de energía tomó un especial interés y por ello se financiaron en EEUU diversos programas centrados en el estudio de los procesos de conversión de la biomasa algal hacia biocarburantes.

En los 80, se siguieron desarrollando proyectos relacionados especialmente en EEUU y Japón. Destaca el programa “Aquatic Species” del National Renewable Energy Laboratory de EEUU, donde se demostró que los fotobiorreactores exteriores son factibles para la utilización eficiente de corrientes de salida, ricas en CO₂, de industrias y por otro lado la posibilidad de aislar especies altamente afines a la biofijación de dichos gases de combustión y de aquellas que tengan un contenido lipídico elevado y adecuado por lo tanto para la producción de biocarburantes.

En la actualidad se siguen impulsando proyectos centrados en el desarrollo a escala industrial de microalgas como fuente de energía con el objetivo de encontrar alternativas a las fuentes actuales y frenar así el impacto medioambiental manteniendo la economía mundial. En concreto toma especial interés la selección de genotipos de microalgas y su modificación genética para la biofijación de grandes cantidades de CO₂. La Agencia Internacional de la Energía, ha creado la Red Internacional de Investigación para la biofijación de CO₂. Dicho entramado de industrias y centros de investigación supone una productividad de alrededor de 100 toneladas de biomasa/ha y año en cultivos tipo *raceaways* de poca profundidad y con un alto rendimiento en la posterior producción de biodiesel y otros biocombustibles.

Finalmente, en Europa, se financiaron en los últimos años proyectos como “Aqualfuels” (2010) o “Enerbioalgae”. El primero de ellos recopila los resultados de diversos estudios llevados a cabo en Europa en materia de producción de biocombustibles de algas. Por otro lado “Enerbioalgae”, pretende tomar el cultivo de microalgas para la depuración de aguas residuales y de gases de combustión de manera conjunta.

El reto hacia el futuro se centra también en la optimización en el escalado de los procesos para tratar esta alternativa como una fuente de ingresos reduciendo el consumo energético de partes del proceso a escala industrial.

7. Resultados del diseño

Se presentan a continuación los resultados del diseño de un fotobiorreactor para la producción, a escala piloto, de la microalga *Chorella vulgaris*.

7.1 Elección del fotobiorreactor

En este apartado se seleccionará el tipo de fermentador a diseñar, considerando las bases conceptuales que se han introducido en el punto 5.1 del presente proyecto. En dicho apartado queda patente la clara mejora para el proceso que supone optar por sistemas cerrados en vez de abiertos, destacando el control sobre los parámetros de proceso y con ello sobre la productividad, y la reducción del riesgo de contaminación.

A partir del estudio de la información que se especifica en el apartado 5.1 se opta por desarrollar el diseño de un fotobiorreactor tubular, sacando provecho de las ventajas que el mismo impone sobre otros diseños, especialmente la elevada relación de superficie iluminada con respecto al volumen de reactor y lo compacto que resultan estos sistemas.

Una vez decidido el tipo de reactor con el que trabajar, cabe destacar cuáles son sus particularidades a nivel de diseño y requerimientos.

7.1.1 Geometría

Tal y como se ha especificado previamente, los fotobiorreactores tubulares se forman de un conjunto de tubos de diámetro reducido unidos por codos formando así una estructura conjunta. Dicho conjunto forma la parte del sistema por la que circula el cultivo y se produce la captación de radiación solar para el crecimiento de las microalgas, en este caso de *Chlorella vulgaris*.

Una de las desventajas destacadas de este tipo de fotobiorreactores son las elevadas tasas de acumulación de oxígeno como consecuencia de la alta velocidad de crecimiento de las microalgas y el largo recorrido que da el cultivo durante ciclo de trabajo. Con el fin de subsanar dicho inconveniente se incorpora un equipo desgasificador que se encargará por lo tanto de retirar del medio de cultivo el exceso de oxígeno generado, dado que una vez alcanzado el 300% (Molina et al., 2001)⁸ sobre el nivel de saturación del aire puede causar la inhibición de la propia fotosíntesis. En lo que se asemejaría a un "airlift" se burbujea aire para provocar así la transferencia del oxígeno gaseoso del medio líquido a dichas burbujas. Es además en el "airlift" donde se inyecta el medio cultivo con todos los

nutrientes necesarios para el crecimiento de la microalga. De este modo, y solo contando con las partes constituyentes que permiten el desarrollo del proceso, el captador solar y el desgasificador serían las partes destacadas de un reactor tubular como el que se puede observar en la Figura 9.

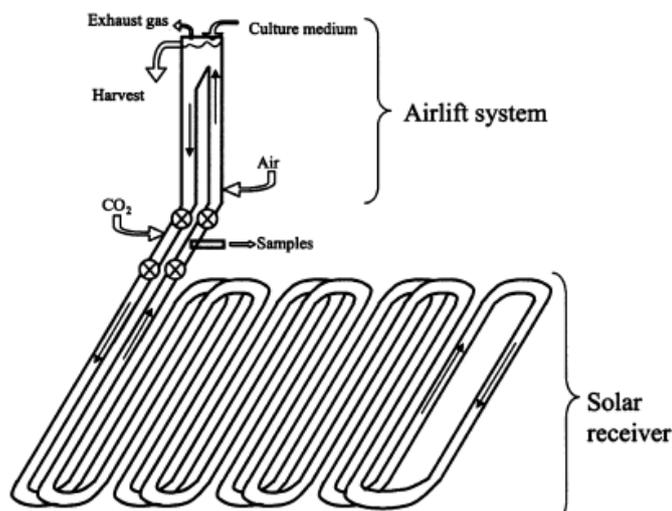


Figura 9: Aspecto general del reactor a diseñar. Fuente: Molina et al., 2001 [8]

Una vez puntualizadas las partes principales del reactor, es también imprescindible detallar cuales son los sistemas incorporados al cuerpo del mismo que permiten que el proceso de crecimiento de *C. vulgaris* no solo se dé sino que sea lo más eficiente posible. Es aquí donde toman protagonismo los sistemas de control de proceso. Para un reactor de estas características y dadas también las características del proceso y sus necesidades, se mencionan a continuación ciertos detalles de diseño a considerar.

Para medir la eficiencia de un proceso de este tipo se suele considerar como parámetro decisivo el de la productividad. La misma se puede calcular sobre el volumen, área o superficie iluminada del reactor pero en todos los casos dependerá de parámetros del medio como los que se han comentado en el apartado 4.2.

Por lo tanto, y con el objetivo de alcanzar la productividad deseada, se incorporarán:

- Sistemas de inyección de medio de cultivo, aire y CO₂.

Se trata de bombas, cuya potencia deberá ser apropiadamente calculada en posteriores puntos del documento, que incorporarán a un flujo adecuado tres de los componentes principales necesarios para el desarrollo de la fotosíntesis y la extracción del exceso de oxígeno: fuente de carbono, CO₂ y aire para burbujear.

- Sistema de refrigeración

Es también importante asegurar el control sobre la temperatura del sistema. Para el crecimiento de las microalgas el rango de temperaturas ideal, y en función de la especie, se encuentra entre los 15° y 30°C. La captación de radiación solar influye directamente en el incremento de temperatura del medio de cultivo, a mayor la radiación mayor la temperatura y también la productividad. El control de la temperatura toma una importancia destacada ya que se debe encontrar un balance que permita mantener tasas de radiación elevadas pero sin sobrepasar una temperatura máxima a partir de la cual el crecimiento de las microalgas se viera afectado negativamente.

- Sistema de toma de muestras y extracción del medio

Se especificará la localización de una serie de válvulas de muestreo que permitirán tomar muestras para el análisis a diferentes fases del ciclo de trabajo, así como extraer el cultivo una vez se acabe el mismo.

- Sistemas de medición de los parámetros críticos del proceso

Para proceder a la corrección de los niveles de ciertos parámetros se debe previamente realizar una monitorización de dichos parámetros. Será el caso de la temperatura, el pH y la concentración de O₂. La selección de los sensores correspondientes se desarrolla en los apartados 7.7 y 7.8 del documento.

7.1.2 Descripción del régimen de trabajo

Una vez definido el reactor a diseñar y sus principales partes constituyentes cabe especificar también el régimen de trabajo del proceso.

Por su parte, el reactor tubular en conjunto puede ser recirculado o sin recircular. En este proyecto se diseña un reactor tubular totalmente recirculado de tal manera que el cultivo entra por un extremo de un tubo y recorre el camino completo que le lleva de nuevo al inicio del sistema pasando antes por el desgasificador.

Además es importante determinar el régimen de trabajo del fotobiorreactor. En este caso se diseña un reactor por lotes, lo que quiere decir que su actividad será continuada durante un ciclo de días determinado al final del cual se extraerá el medio de cultivo con la

producción de microalga correspondiente. El ciclo de trabajo será en este caso de 6 días, para alcanzar una concentración de *C. vulgaris* adecuada y permitir así que el séptimo día se dedique a realizar las tareas de limpieza y adecuación del sistema para poner en marcha un nuevo ciclo.

Para el diseño del reactor es también fundamental especificar algunos aspectos previos generales como lo es la inclinación del cuerpo del reactor. En el presente proyecto y con el objetivo de maximizar la captación de la irradiación, se opta por diseñar un tubular horizontal.

7.1.3 Material del fotobiorreactor

Como parte de la elección del fotobiorreactor a diseñar cabe seleccionar el material de construcción del mismo. Para completar dicha decisión se presenta a continuación un resumen de la información básica relativa a los materiales más comunes para este tipo de aplicación y se considera también la información aportada en el apartado 5.1 del presente documento en el que se descarta el uso del vidrio considerando el objetivo científico del diseño a proponer.

Tabla 9: Características de los plásticos en el uso en fotobiorreactores. Fuente: www.oilgae.com

	Polietileno	Acrílico (Plexiglas)
Detalle	LDPE/HDPE (Low/High Density PolyEthylene)	PMMA (PolyMethyl MethylAcrylate)
Grosor (mm)	0.18	3.0
Densidad Kg/m³	920	1180
Contenido energético (MJ/Kg)	78	131
Vida útil	3	20
Transmisividad	Adecuada, transmisión UV reducida	92%

En cuanto al criterio de selección, se considera que para el objetivo experimental del fotobiorreactor diseñado en el presente proyecto el plástico acrílico (polimetil metacrilato) resulta la alternativa más apropiada. Este material ofrece una vida útil suficiente para el desarrollo de estudios experimentales, por sus características permite la transmisión de luz a eficiencias elevadas, del 92%, y conlleva un coste reducido. Se opta por trabajar con una monocapa del polímero con un grosor de 3mm.

7.2 Objetivos de producción de *C. vulgaris*

Previo paso al diseño del reactor, y una vez conocidos los requerimientos del proceso y con ello las partes constituyentes del equipo, se marca un objetivo de producción anual a partir del cual se podrá determinar el volumen de reactor necesario.

Considerando que el objetivo es diseñar un reactor a escala de planta piloto, la producción anual presentada como objetivo será moderada. En el presente estudio no se pretende obtener un beneficio económico de la venta para el procesado del producto sino estudiar el comportamiento del reactor para proceder a un potencial escalado del mismo para desarrollar una producción industrial, en la que sí se pretendería comercializar un producto final.

Una vez dicho esto, cabe mencionar que el reactor a diseñar pretende simular el comportamiento de un fotobiorreactor industrial que produzca *Chorella vulgaris* para la extracción de su contenido lipídico y su procesado hacia la obtención biocarburantes, siguiendo así la línea de trabajo de una biorefinería de segunda generación.

Teniendo en cuenta la información sobre estas líneas se ha estipulado un objetivo anual de producción de lípidos, realizando a partir de este dato el cálculo de productividad de *Chlorella* necesario y con ello el cálculo del volumen de reactor, considerando también los datos generales del reactor que se mencionarán en el próximo apartado.

Así pues, los datos de partida son los siguientes:

Tabla 10: Datos de producción objetivo anual.

Objetivo de obtención de lípidos	4.0000	Kg/año
Eficiencia del proceso de extracción⁹	74.000	%
Producción de lípidos	0.0119	Kg/día
Contenido lipídico¹⁰	30.0000	%
Producción de <i>Chorella vulgaris</i>	0.05362	Kg/día

7.3 Determinación de la productividad

Como se ha ido puntualizando anteriormente, el crecimiento de microalgas viene principalmente limitado por la cantidad de radiación solar global, constituida por la radiación

directa y la difusa, dentro de la región fotosintéticamente activa percibida por el medio de cultivo. Se presenta a continuación la relación entre ambos parámetros (Molina et al., 2001)⁸ utilizada en el presente proyecto.

$$\mu = \frac{\mu_{max} * I_{av}^n}{I_k^n + I_{av}^n} \quad (1)$$

Se diseña el fotobiorreactor acorde con los datos de irradiación de la provincia de Barcelona. De este modo y tomando los datos del Instituto Catalán de Energía (ICAEN)¹¹ se procede a la aproximación de cálculo de la irradiancia en el interior del reactor.

En la tabla 11 se muestran los valores de radiación y la media anual, para trabajar con la ecuación 1 se deberá hacer una conversión de unidades de irradiación.

Tabla 11: Datos de radiación global media en la provincia de Barcelona. Fuente: Instituto Catalán de Energía.

Mes	Radiación total
Enero	6,8 MJ/m ² día
Febrero	9,65 MJ/m ² día
Marzo	13,88 MJ/m ² día
Abril	18,54 MJ/m ² día
Mayo	22,25 MJ/m ² día
Junio	24,03 MJ/m ² día
Julio	23,37 MJ/m ² día
Agosto	20,42 MJ/m ² día
Septiembre	16,05 MJ/m ² día
Octubre	11,4 MJ/m ² día
Noviembre	7,73 MJ/m ² día
Diciembre	6,04 MJ/m ² día

Debe especificarse que del total de radiación solar tan solo la integrada entre los 400nm y 700nm de longitud de onda será aprovechada para el desarrollo de las microalgas. A este tipo de radiación útil se le denomina PAR (Photosynthetically Active Radiation). Considerando el detalle del proceso que se diseña en el presente proyecto, será por lo tanto este tipo de radiación la que deba tomarse en cuenta.

Es importante mencionar que las unidades de la PAR más habituales son los $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$. Los Einsteins se utilizan para representar la cantidad de energía radiante en relación al número de avogrado de fotones, es decir, se establece que un Einstein equivale a un mol de fotones. Este tipo de unidad no forma parte del Sistema Internacional de Unidades y es por ello que se toman datos en MJ/m²día que se convierten a $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ considerando la siguiente relación:

$$1800 \mu E/m^2 s = 1800 \mu moles/m^2 s = 427 W/m^2$$

Además se estima que en Europa el PAR corresponde al 42% de la radiación global que incide sobre el medio. En resumen entonces:

$$I_{global} (media\ anual) = 15,04 MJ/m^2 dia = 174,07 W/m^2$$

$$PAR = I_{av} = 0,42 * 0,92 * I_{global} = 67,26 W/m^2 * \frac{1800}{427} = 283,54 \mu E/m^2 s$$

Los demás valores para el cálculo de la productividad deben ser tomados en base a experimentos, cuyo desarrollo queda fuera del objetivo del presente proyecto, por lo tanto se toman como referencia estudios desarrollados al respecto (García Cubero, 2014)¹⁰. En el estudio experimental de *Chlorella vulgaris* se obtuvieron valores para I_k de $30 \mu E/m^2 s$ (García Cubero, 2014)¹⁰, el exponente n toma un valor de 2 (García Cubero, 2014)¹⁰ y la tasa de crecimiento máxima, μ_{\max} , $1d^{-1}$ (García Cubero, 2014)¹⁰. Con ello y aplicando la ecuación 1 la velocidad específica de crecimiento será por lo tanto de $0,988d^{-1}$, se observa por lo tanto que este valor es muy similar al máximo. Esto es debido a la estructura de la ecuación propuesta (Molina et al., 2001)⁸ y el reducido valor de I_k , que simboliza la elevada avidez de la microalga con respecto a la luz, con respecto a I_{av} (que resulta ser elevada en la provincia de Barcelona), la velocidad de crecimiento alcanzada corresponde prácticamente a la máxima a las condiciones de trabajo, y la expresión queda prácticamente reducida a $\mu_{\max} = \mu$.

Para seguir con el cálculo de la productividad será necesario encontrar una ecuación que relacione los parámetros del proceso con ésta. Por un lado la productividad volumétrica se ve relacionada de forma directamente proporcional con la velocidad de crecimiento específica, μ , y la concentración de biomasa alcanzada en el fotobioreactor, C_b . Así pues:

$$P_{pv} = \mu * C_b \quad (2)$$

De este modo y tomando una concentración de biomasa media de $0,25 g/l$ (García Cubero, 2014)¹⁰ para medio de cultivo en régimen fotoautótrofo sin glucosa la productividad volumétrica final será $0,247 g/l d$.

Una vez determinada la productividad volumétrica para las condiciones de trabajo y los objetivos de producción, se puede determinar el volumen de reactor requerido según la expresión 4 y estableciendo un ciclo de trabajo de 6 días, un sobredimensionamiento del 25% del volumen del reactor sobre volumen del medio y una producción objetivo semanal

de 375,375 g de *Chlorella Vulgaris*.

$$Vm = \frac{P_{target}}{T_{ciclo} * P_{pv}} \quad (3)$$

$$Vr = (1 + 0,25) * Vm \quad (4)$$

El volumen final de medio será de 253l y el del reactor de **316,31 litros**.

7.4 Diseño del contenedor

En el presente apartado se procederá a especificar el diseño del reactor a partir del volumen calculado en el apartado 7.3.

7.4.1 Cálculo de volúmenes ideales

Con respecto a la geometría de un fotobiorreactor tubular recirculado, se trata de un tubo de longitud considerable y diámetro reducido, para aumentar la relación superficie/volumen y así la captación de radiación solar, que se retuerce sobre si mismo de acuerdo al conjunto de codos que imponen el cambio de dirección del flujo. Además el principio y final de dicho conjunto de tubos, situado horizontalmente, se unen a dos tubos verticales que funcionan a modo de sistema de extracción de oxígeno. Se inyecta en dicho sistema una corriente de aire y se realiza la retirada del exceso de oxígeno. A lo largo del cuerpo del captador solar se sitúan válvulas de muestreo y puertos de entrada para sondas de medición de ciertos parámetros de control.

Para continuar con el diseño del reactor una vez conocido el volumen necesario, se trata por separado la zona de captación solar de la de desorción del O₂. Este apartado se centra en el cálculo de la zona de crecimiento microalgal.

Así, se procede al cálculo de la longitud y diámetro del tubo que constituye el cuerpo del reactor donde realmente se desarrolla el crecimiento de *Chlorella vulgaris*.

Para la determinación de la longitud total del tubo se considera como factor limitante principal la generación de oxígeno como consecuencia del desarrollo de la fotosíntesis. De este modo, se restringe la longitud del tubo, a partir de la velocidad del proceso de generación de oxígeno, para no alcanzar una concentración total de oxígeno en el reactor que pueda comportar problemas de inhibición como los que se han ido comentando a lo largo del presente documento. La ecuación 5 (Molina et al., 2001)⁸ representa por lo tanto la expresión seguida para el cálculo de la longitud del fotobiorreactor.

$$L = \frac{U_L * ([O_2]_{out} - [O_2]_{in})}{R_{O_2}} \quad (5)$$

En dicha expresión se tomará la velocidad máxima de cultivo de 0,5m/s (Molina et al., 2001)⁸, correspondiendo a un máximo para evitar posibles daños por estrés hidrodinámico sobre las células. Además la concentración de oxígeno máxima a la salida del tubo con el fin de evitar inhibición del proceso es del 300% (Molina et al., 2001)⁸ sobre el nivel de saturación en el aire. A la entrada del captador solar la concentración de oxígeno se limita al 100% sobre el nivel de saturación en el aire y la tasa de generación del proceso de fotosíntesis corresponde a un valor de 0,003 mol/m³s (Molina et al., 2001)⁸.

Resolviendo la ecuación 5 la longitud máxima del captador solar será de **118,75m**. Se adoptará dicho valor con el fin de alcanzar el volumen requerido de reactor con un tubo de diámetro lo más reducido posible y así aumentar la relación superficie/volumen del sistema.

Resulta interesante determinar en este punto el tiempo que tarda el medio en recorrer el cuerpo del reactor, es decir, el tiempo de residencia. La expresión 6 determina el cálculo.

$$\tau = \frac{L}{U_L} \quad (6)$$

Se concluye que el tiempo de residencia será de **237,5s**, o, lo que es lo mismo, aproximadamente 4 minutos, lo cual se corresponde a un valor razonable.

Una vez determinado el volumen del tubo y su longitud, se puede extraer el valor del diámetro necesario a partir de la expresión 7.

$$Dt = \sqrt{\frac{4 * Vr}{\pi * L}} \quad (7)$$

A partir de la resolución de la ecuación 7 se concluye que para alcanzar el volumen de reactor requerido el diámetro del tubo que compone el captador solar debe ser de 5,8cm. El valor se adapta al diámetro nominal disponible para la comprar más cercano. Así, el diámetro será de **6cm**, tomando como volumen final de reactor reajustado **335,757l**.

7.4.2 Válvulas y puertos

Con el objetivo de aumentar las posibilidades de obtención de datos y mediciones, así como la diversidad de las mismas, y teniendo en cuenta que se trata de un fotobiorreactor

a escala de planta piloto, se opta por introducir puertos de medición de parámetros a lo largo del captador solar en diversos puntos. En concreto se sitúan tres puertos de entrada para la incorporación de las sondas de pH, temperatura y O_2 al inicio y al final del recorrido del conjunto de tubos en espiral. Además, se sitúan conjuntos de un puerto para mediciones esporádicas en diferentes puntos del reactor, a la entrada de codos alternantes en la dirección del flujo.



Figura 10: Representación de los puertos de incorporación de sondas.

Por otro lado se sitúan también válvulas de muestreo que servirán también para la extracción del medio si existen problemas en el ciclo de trabajo. Con el fin de conseguir una mayor seguridad y facilitar la gestión de problemas de producción así como poder obtener muestras de biomasa a diferentes condiciones se incorporan dichas válvulas de 3 salidas a la salida de codos alternantes en la dirección del flujo.

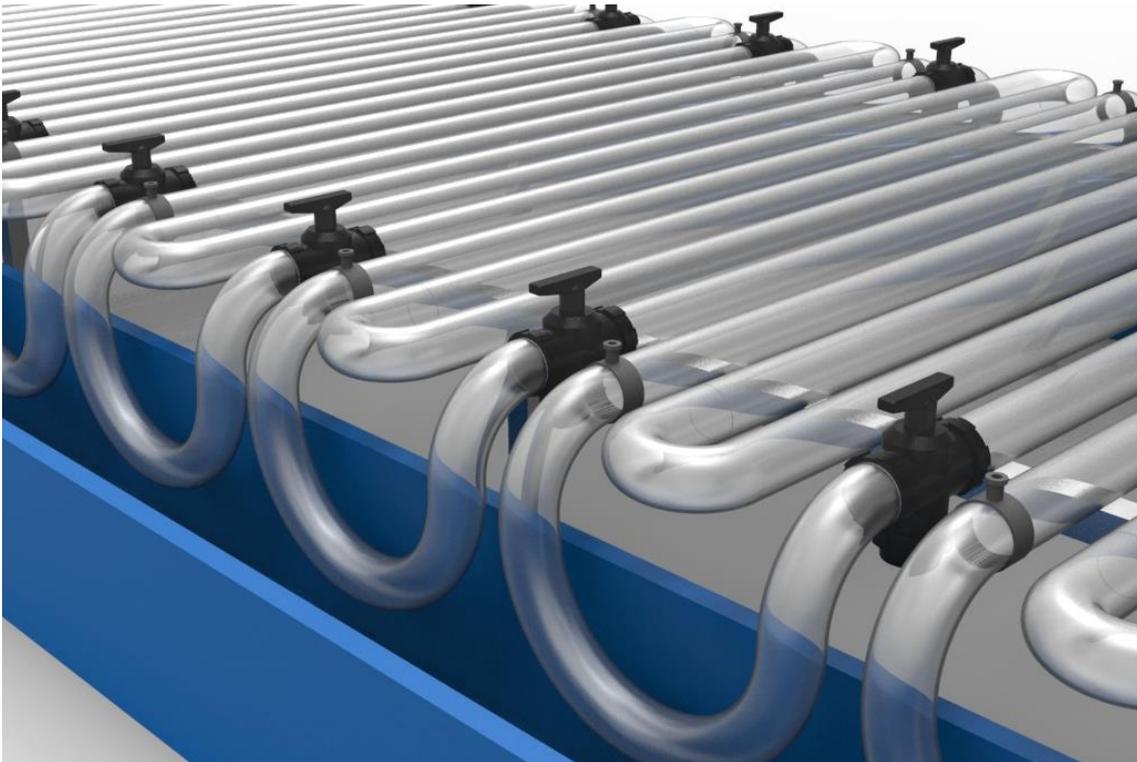


Figura 11: Representación de las válvulas de muestreo.

7.4.3 Planos generales

Una vez determinado el diseño del fotobiorreactor tubular acorde con el objetivo de producción establecido, se ha trabajado con el software de diseño SolidWorks para la representación en 3D y la realización de los planos correspondientes.

A continuación se presenta un conjunto de imágenes del fotobiorreactor diseñado tal y como se ha descrito con anterioridad. Los planos generales del mismo se presentan también en este apartado, incluyendo en el anexo todos los necesarios para la construcción del fotobiorreactor.

En la Figura 12 se muestra el cuerpo completo del reactor, incluyendo el captador solar y la zona de desoxigenación. Quedan representadas las entradas al sistema, la mayoría de ellas en la zona del desoxigenador, la situación de las válvulas y puertos como ya ha sido descrita, y los contenedores de agua a modo de sistema de refrigeración, de lo que se hablará en el apartado 7.7 del presente documento.

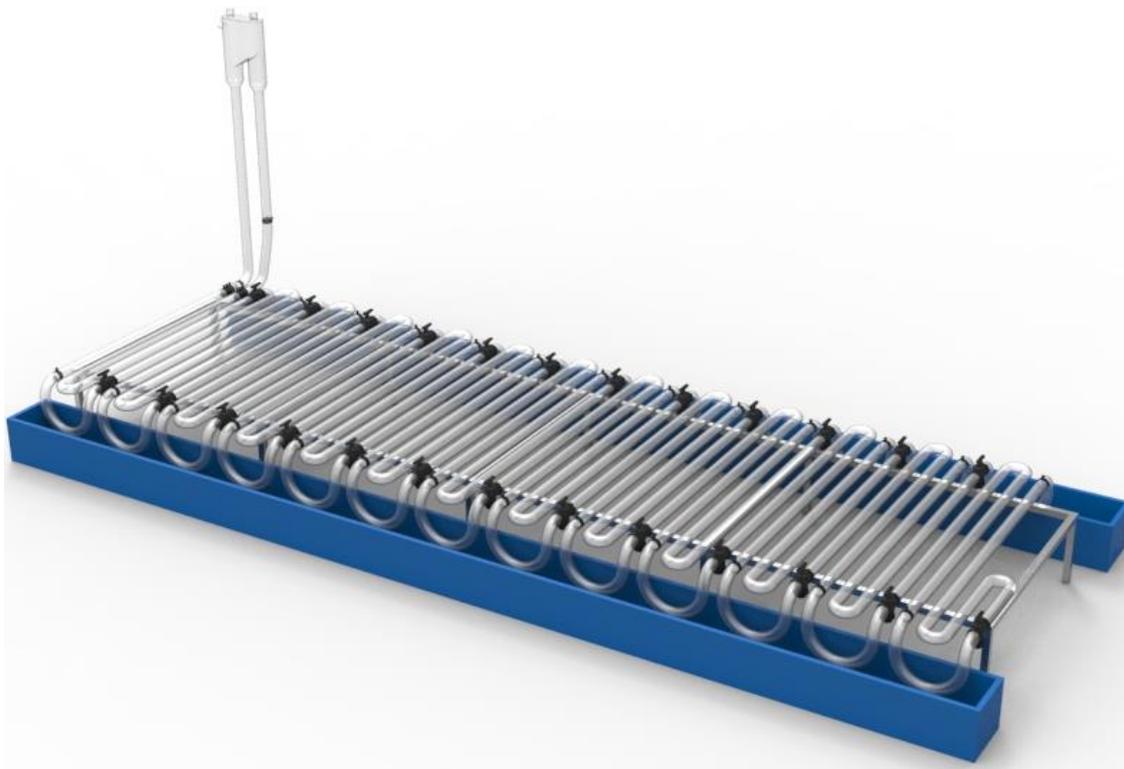


Figura 12: Vista 3D frontal del cuerpo del fotobiorreactor.

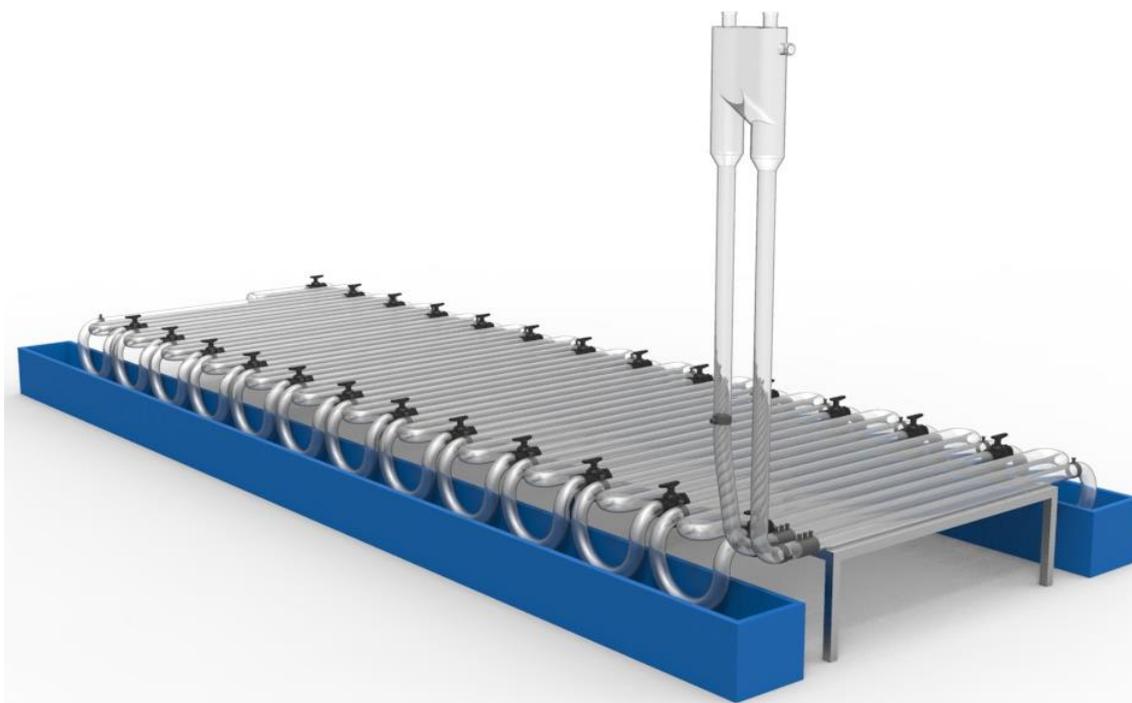


Figura 13: Vist 3D trasera del cuerpo del fotobiorreactor.

Además se ha debido diseñar una plataforma que soporte el diseño, optando por un sistema de soporte de aluminio sujetado por un total de 10 patas hacia el suelo. Debido a las grandes dimensiones del captador solar, con una longitud de 6,4m, y el peso del fotobiorreactor completo, ya solo considerando el medio de circulación son 251kg y se debería incluir el peso del conjunto de PMMA, se realiza este diseño que queda patente en la Figura 14.

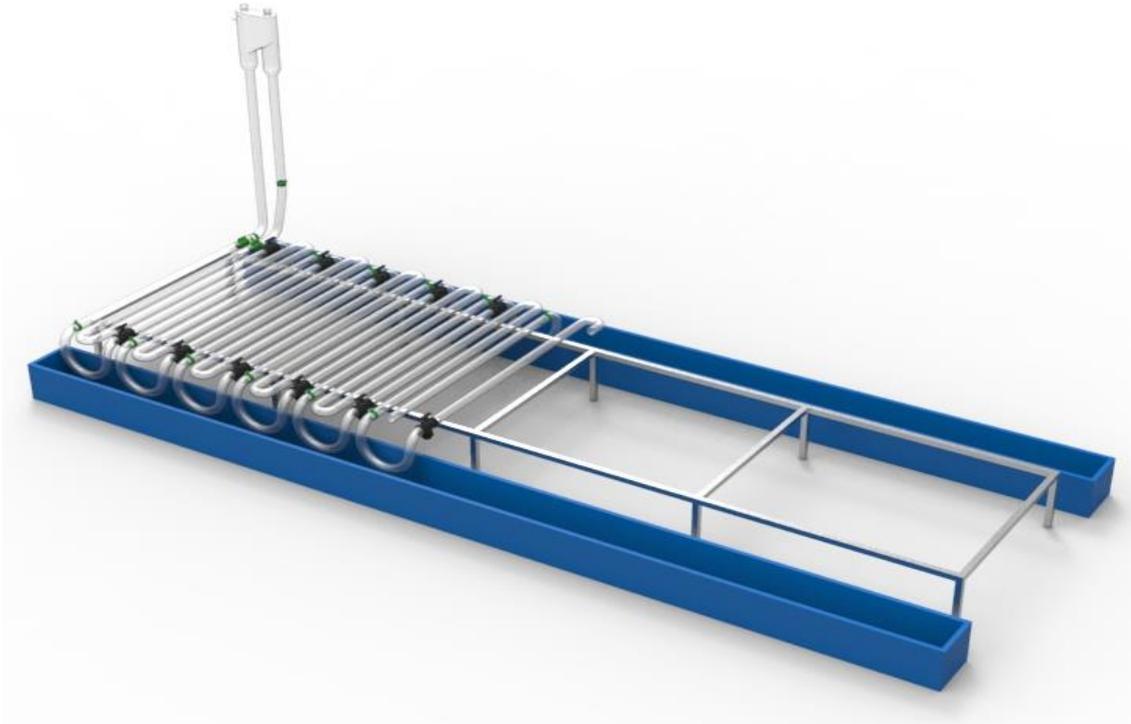
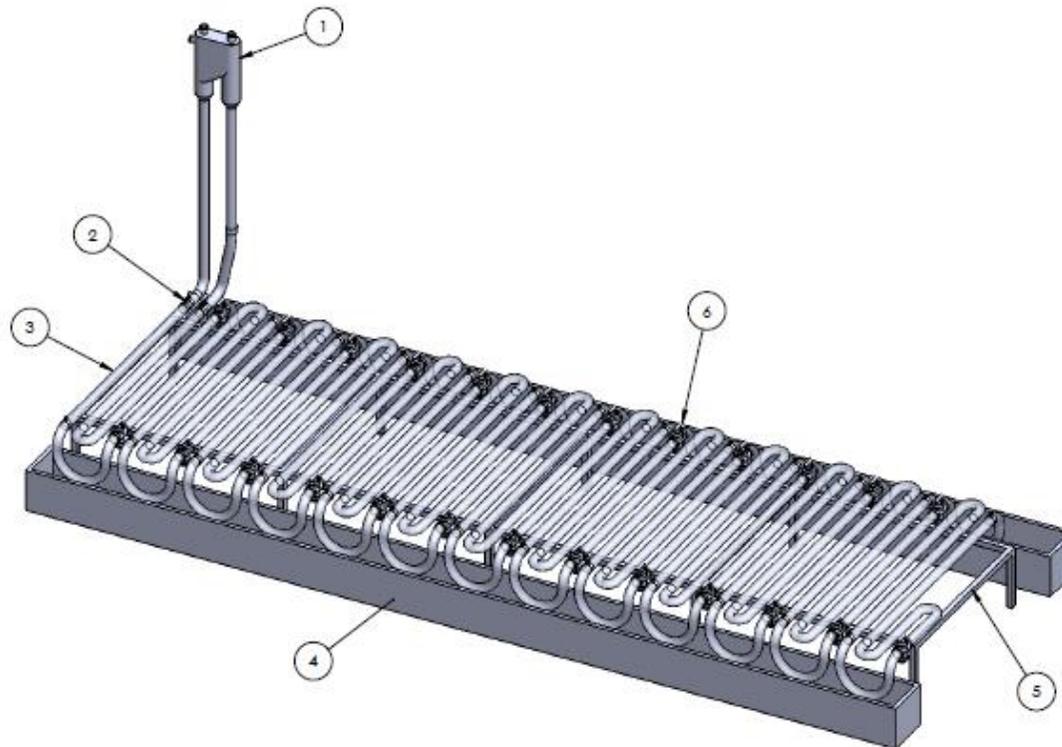


Figura 14: Detalle de la plataforma diseñada para soportar el cuerpo del fotobiorreactor.

Así se muestra a continuación el conjunto de planos más representativos del diseño realizado, especificando las medidas a conocer para la construcción del fotobiorreactor así como sus partes constituyentes. También se da el detalle de diseño por lo tanto de no solo el captador solar y del diseño del desoxigenador, cuyo diseño se especifica en el apartado 7.5.2, sino también de la plataforma de sujeción y el sistema de piscinas de refrigeración; estos dos últimos planos se adjuntan en los anexos del presente documento.

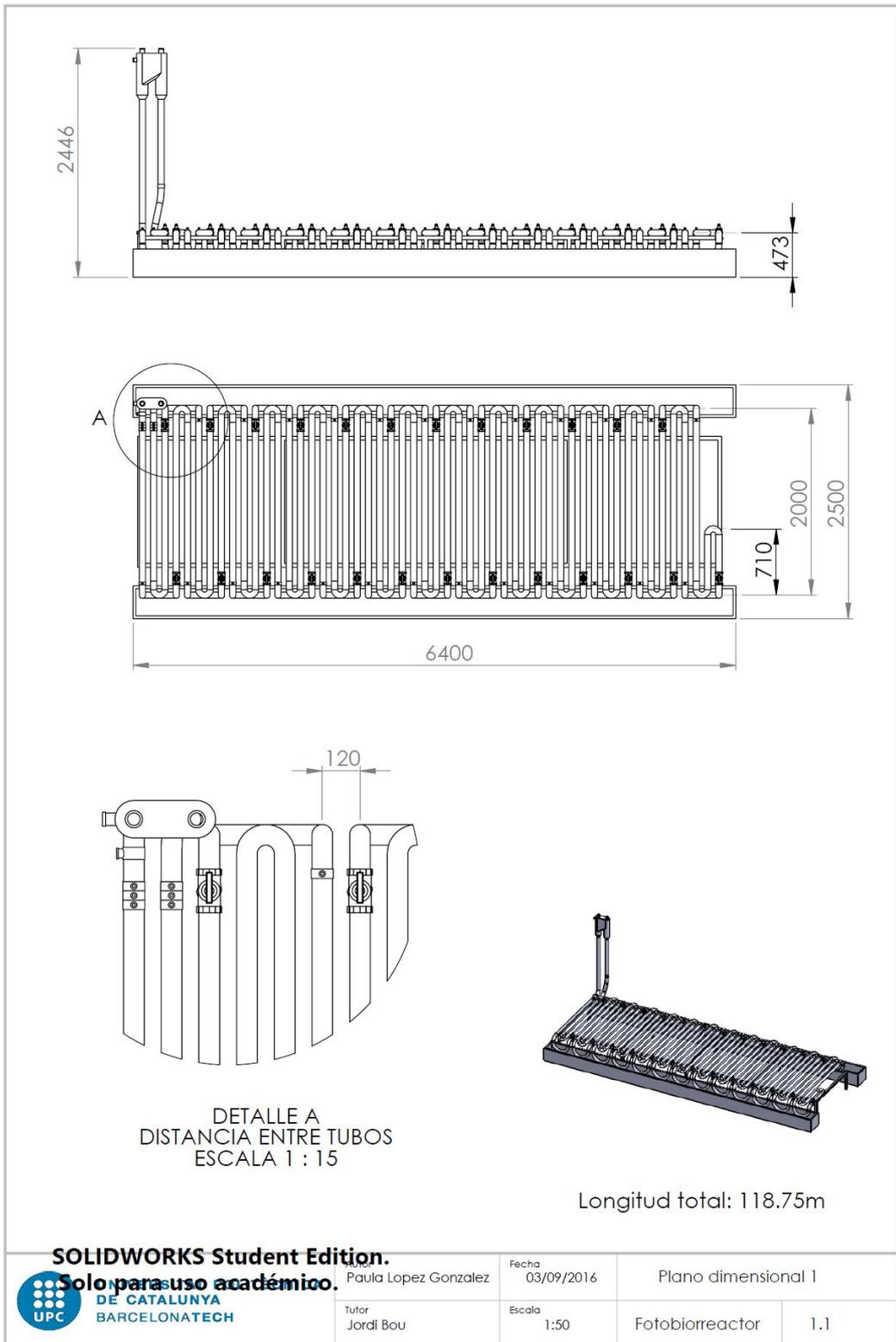


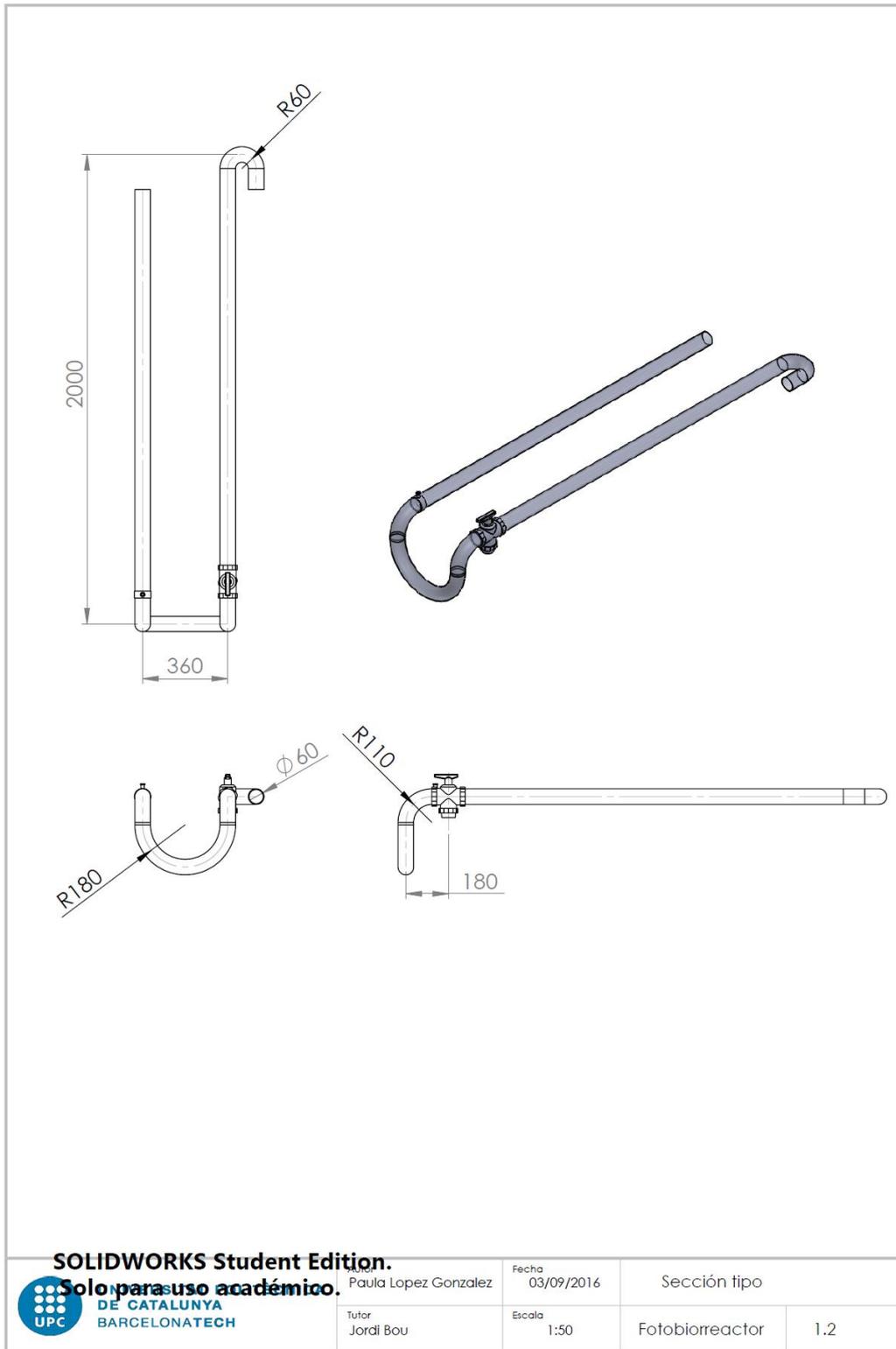
Num.	Denominación	Unidades	Material
1	Desoxigenador	1	PMMA
2	Puertos	31	PVC
3	Captador solar	1	PMMA
4	Sistema de refrigeración	2	-
5	Plataforma de soporte	1	Aluminio
6	Válvulas	25	PVC

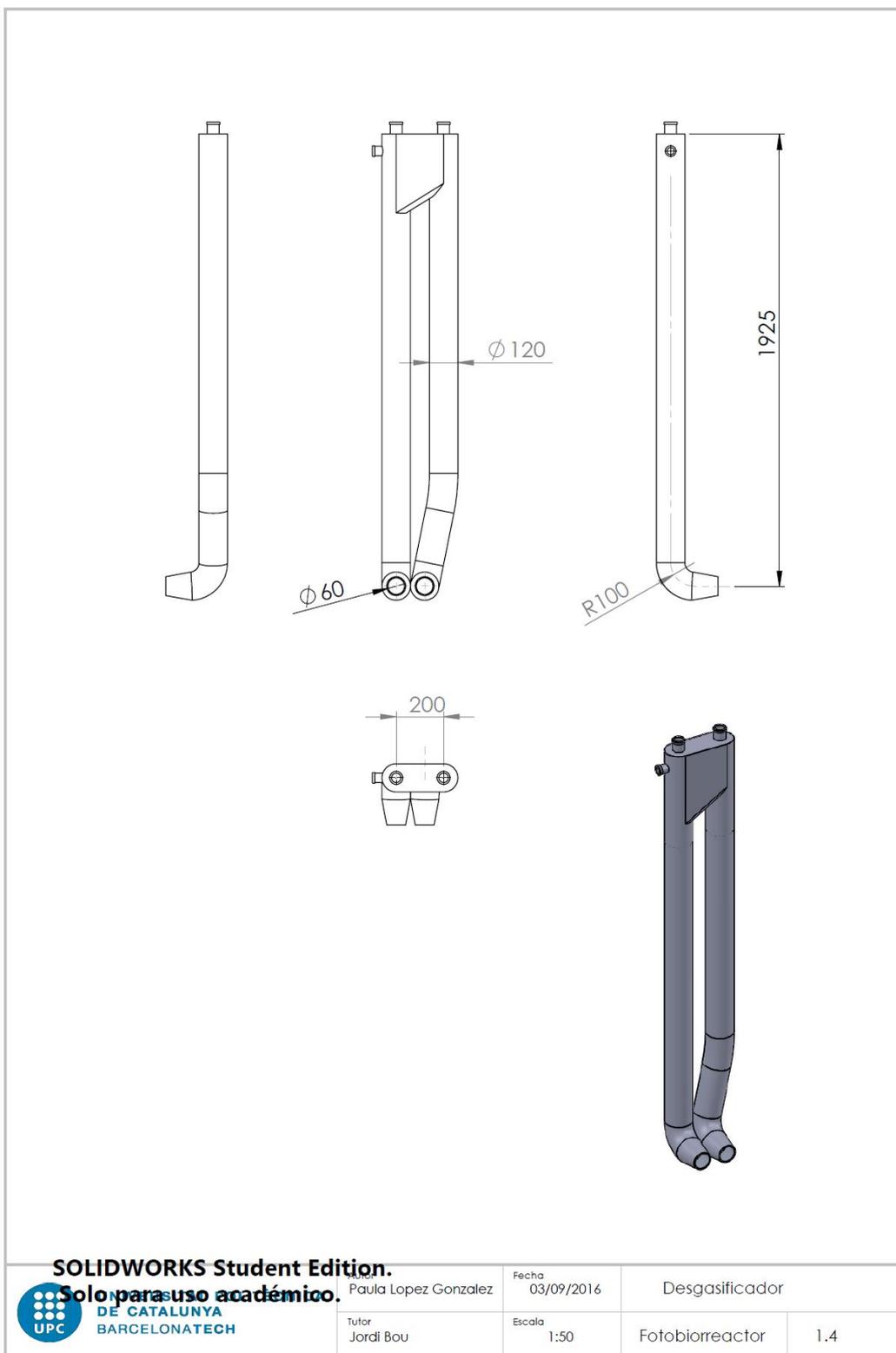
SOLIDWORKS Student Edition.
Solo para uso académico.

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Autor	Fecha	Plano de conjunto	
	Paula Lopez Gonzalez	03/09/2016	Título	Hoja 1 de 1
	Jordi Bou	Escala	Proyecto	
		1:50	Fotobiorreactor	









7.5 Circulación de corrientes de entrada

7.5.1 Alimentación del sistema

En la presente sección se especifican los cálculos pertinentes a las corrientes de entrada al sistema que permiten que empiece el ciclo de trabajo del mismo.

En cuanto a la alimentación del sistema cabe especificar que previa introducción a un fotobiorreactor de planta piloto se debe obtener una cepa, en este caso del Banco Español de Algas, a partir de la cual se ira acondicionando el medio a las condiciones de trabajo y aumentando progresivamente su volumen.

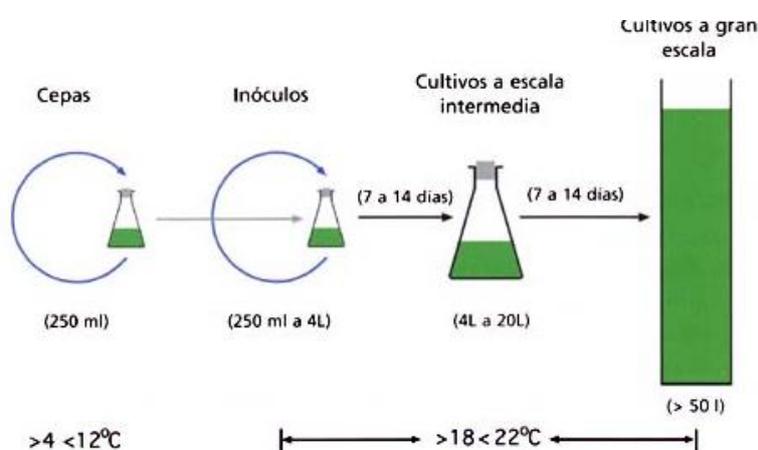


Figura 15: Etapas en la preparación del cultivo para gran escala. Fuente: www.fao.org

La figura 15 ilustra el proceso de adaptación de las cepas hacia el cultivo de gran escala. La cepa se mantiene aislada bajo luz y clima controlados (baja temperatura) y sólo se emplean cuando es necesario inocular. Ni se airean ni se añade dióxido de carbono. Por su parte, los inóculos crecen rápidamente durante un período de 7 a 14 días a temperaturas e intensidad de luz más elevada con un aporte de aire enriquecido con dióxido de carbono. Cuando están listos, una pequeña proporción del volumen se emplea para iniciar nuevos inóculos y la porción principal para comenzar un cultivo a escala intermedia. Los cultivos intermedios pueden emplearse como alimento para las larvas o para iniciar un cultivo a gran escala pasado un periodo de 7 a 14 días nuevamente.

La cepa de *Chlorella vulgaris* seleccionada, con código BEA0753B ¹², es apta para tomar como aplicación final la producción de biodiesel.

Una vez especificados los pasos de acondicionamiento, ya se puede incorporar el medio al fotobiorreactor. En este punto, y con el fin de mantener el medio en crecimiento y las condiciones del mismo distribuidas de forma homogénea, se debe mantener cierto régimen

de circulación del medio de cultivo. Para conseguirlo se debe incorporar una bomba de alimentación que incorporará al inicio del ciclo de trabajo el inóculo.

Tomando como referencia la geometría del reactor y la velocidad de circulación establecida, 0,5 m/s, se puede calcular el total de las pérdidas de carga y con ello la potencia de bombeo que permite cumplir con dicha velocidad.

Previo paso se determina el régimen de turbulencia, a partir del cálculo del número de Reynolds. Con ello se puede determinar si la velocidad de trabajo será adecuada para preservar el proceso.

$$Re = \frac{U_L * \rho * Dt}{\mu_l} \quad (8)$$

La viscosidad dinámica del medio a la temperatura de trabajo (25°C) se ha aproximado considerando el medio de *Chlorella vulgaris* como una emulsión diluida formada de partículas esféricas y aplicando la ecuación de Einstein. Así:

$$\phi = \frac{Cb}{\rho} \quad (9)$$

$$\mu_l = \mu_w + 2,5 * \phi \quad (10)$$

Así pues tomando la viscosidad del agua a 25°C como 0,000893 Ns/m² el valor corregido de la viscosidad del medio es de 0,000903 Ns/m².

Por otro lado la densidad del medio se asimilará, debido a que la concentración de biomasa no es elevada, a la del agua a 25°C es de 1000kg/m³ y con ello el valor de Reynolds es de 33227, lo cual corresponde a régimen turbulento.

Se trata entonces de un valor adecuado ya que para Reynolds por debajo de 3000 el medio podría quedar estancado y se darían acumulaciones de microalgas en los codos del reactor, y por encima de 10⁵ se podrían ocasionar daños sobre el medio (Molina et al., 2001)⁸.

Se procede ahora al cálculo de las pérdidas de carga asociadas a la pérdida de presión por fricción entre partículas del medio entre sí y con las paredes del reactor. Se sigue el método de cálculo de *Darcy Weisbach (1875)*, apto para Reynolds por encima de 3000. La expresión utilizada es la siguiente:

$$ht = f * \frac{L}{Dt} * \frac{U_L^2}{2g} * Nt \quad (11)$$

La pérdida de carga que corresponde a los tramos de tubería rectos se asocia a un factor de fricción, el cual se calcula a partir de iteración de la expresión de *Colebrook White* (1939), apta para todo tipo de flujos y rugosidades en el material de la tubería.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71 * Dt}\right) + \left(\frac{2,51}{Re * \sqrt{f}}\right) \quad (12)$$

Donde la rugosidad absoluta, ε , aplicable para plásticos es de 0,0015 mm.

A partir de la resolución iterativa de la expresión previa se obtiene un factor de fricción de 0,01242. Una vez obtenido el mismo se procede a la implementación de la ecuación 11 obteniendo así un total de pérdidas de cargas por fricción en los tramos rectos de 0,2641 mca.

Por otro lado, deben considerarse también las pérdidas de carga que se originan en singularidades del recorrido del fluido por la tubería, como es el caso de los codos. En el cálculo de dicho valor se implementa la expresión número 13:

$$hc = K * \frac{U_L^2}{2 * g} * Nc \quad (13)$$

El coeficiente empírico K, que toma un valor u otro en función del tipo de accesorio, se extrae de tablas. Para un codo de 180° se toma un valor de 1,8.

De la aplicación de la expresión 13 se obtienen una pérdida de carga para el total de codos de 0,7347 mca.

De este modo se obtiene un total de pérdidas de carga, sumando el resultado de las ecuaciones 9 y 11 de **1mca**.

Del cálculo de las pérdidas de carga en m.c.a se pasa a la pérdida expresada en caída de presión, en la ecuación 14, y de acuerdo a ello se calcula la potencia de la bomba mediante la ecuación 15.

$$\Delta P = (Nc * hc + Nt * ht) * \rho * g \quad (14)$$

$$P = Q * \Delta P \quad (15)$$

El caudal de medio a bombear, Q, se calcula como:

$$Q = U_L * A_t \quad (16)$$

De este modo, el caudal es de 0,0014 m³/s y la potencia de bombeo requerida considerando las pérdidas de carga es de **13,838W**.

Debido a que la potencia requerida es muy baja y para asegurar que el bombeo es suficiente en la práctica, se sobredimensiona el sistema tomando una bomba de potencia nominal de 200W.

La bomba seleccionada tiene una potencia de bombeo de 200W, 10 veces mayor a las pérdidas de carga a superar calculadas, y tiene un caudal de salida de aproximadamente los 5000l/h a tratar en el proceso diseñado.



Figura 16: Bomba HZS-200 de agua (200W y 5000l/h de salida). Fuente: www.alibaba.com

Por otro lado, otro de los componentes principales para la alimentación del sistema es la fuente de carbono, en forma de CO₂. En línea con un estudio que se centra en el análisis de la cinética de crecimiento de *C. vulgaris* a diferentes concentraciones de CO₂ (Powell E. et al., 2009) ¹³ se obtuvieron las mayores tasas de productividad a una corriente gaseosa de concentración 10% en volumen que equivale a una concentración en el medio de 150mg/L.

Considerando que la tasa de fijación de dióxido de carbono media para *C. vulgaris*, se encuentra en los 0,5g CO₂/g *C. vulgaris* (Powell E. et al., 2009) ¹³ y que la tasa de crecimiento de la microalga en nuestro reactor es de 0,247 g *C. vulgaris*/l al día se extrae que la concentración de CO₂ en medio variará de forma que para mantenerla en los 150mg/L deseados se deberá ir añadiendo dicha corriente gaseosa de CO₂ en función del pH del medio como medición de la concentración al momento. Cabe comentar que a modo teórico se espera que al descender la concentración de dióxido de carbono por su

biofijación aumentaría la concentración en hidroxilos y con ello el valor de pH, provocando la precipitación de fosfatos. Se deberá por lo tanto mantener el pH de la solución a 7,5 y modular la alimentación de dióxido de carbono acorde con ello.

7.5.2 Sistema de desorción de oxígeno

Con la finalidad de retirar el exceso de oxígeno generado en el proceso de crecimiento de la microalga, se incorpora un sistema sencillo de desorción que consiste en dos tubos verticales, por los que circula el medio y se burbujea aire. Las burbujas de aire, compuestas en un 21% en volumen de oxígeno, captan el oxígeno disuelto en la corriente líquida hasta alcanzar en ella la concentración de equilibrio entre ambas fases, que corresponderá en la mejor de las ocasiones a la concentración de saturación del O₂ en el aire. Además, el proceso de transferencia de masa entre las dos fases se rige por una cinética que deberá tomarse en consideración.

Para el cálculo del volumen de aire a burbujear, y con ello del volumen que debe ocupar el sistema de burbujeo, se desarrolla un balance de materia en el mismo con respecto a la fase líquida.

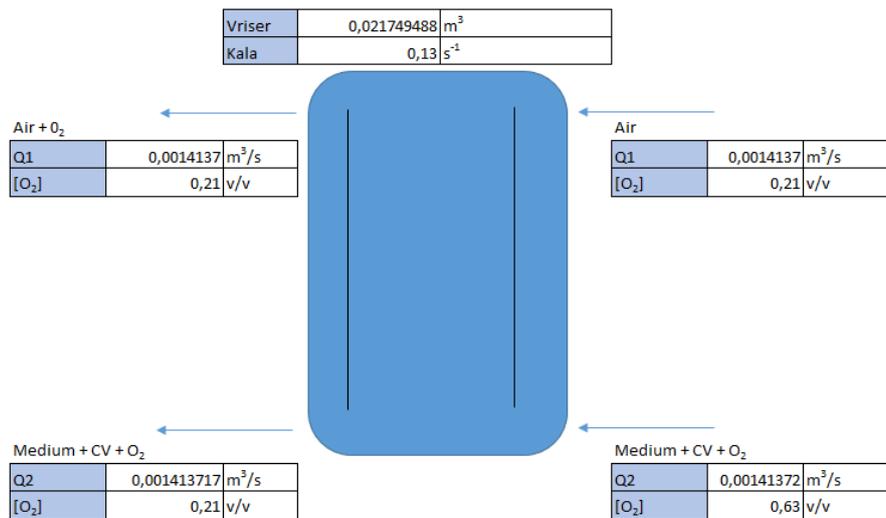


Figura 17: Esquema del balance de materia en el desoxigenador.

El balance de materia para la corriente líquida será:

$$Q [O_2]_{out} - V_{riser} * r = Q [O_2]_{in} \quad (17)$$

La cinética del proceso se comporta del siguiente modo (Molina et al., 2001):

$$r = klal * [O_2]_{sat} = 0,13 * [O_2]_{sat} \quad (18)$$

Además se considera que a la salida del reactor la concentración máxima de oxígeno que no debe superarse para no generar problemas de inhibición es de $[O_2]_s = 3 \cdot [O_2]_{sat}$ y se fija que a la entrada del sistema después de la aireación se consigue que $[O_2]_i = [O_2]_{sat}$. Con todo esto y tomando como caudal de líquido el valor ya previamente calculado de $0.0014 \text{ m}^3/\text{s}$ el volumen de agua ocupado en el tubo de burbujeo será de **0.0217 m^3** .

Consideramos que el volumen ocupado por el aire debe ser igual al del medio líquido y por lo tanto la sección del tubo de burbujeo deberá ser el doble que la del reactor con el fin de no perder velocidad de subida por el aumento del caudal de la corriente. Así pues la sección del *riser* será de $0,0113 \text{ m}^2$ y su diámetro de **12cm**.

Una vez determinada la sección del *riser* y conociendo el volumen del mismo se determina que la longitud de burbujeo necesaria para retirar todo el oxígeno necesario hasta llegar a la concentración de entrada al ciclo, igual a 21% v/v, es de **1,923m**. el cálculo se especifica en la ecuación 19.

$$L_{riser} = \frac{V_{riser}}{A_{riser}} \quad (19)$$

Para finalizar el diseño de este proceso de desorción es necesario calcular la potencia de bombeo de la corriente de aire a inyectar. Tratándose del mismo volumen y cabal que de medio, la potencia será por lo tanto la misma de 14W.

La bomba seleccionada para el burbujeo de aire será similar a las utilizadas para oxigenar acuarios, teniendo en este caso una capacidad de tratar un caudal de 6000l/h y una potencia nominal de 80W. El caudal de salida se encuentra por encima del del proceso diseñado, de 5000l/h aproximados, y la potencia por encima de lo requerido, teniendo así un margen mínimo requerido considerando las inexactitudes de los cálculos de pérdidas de carga.



Figura 18: Bomba de aire del fabricante Hailea, modelo HAP100. Fuente: www.hailea.com¹⁴

7.6 Iluminación

Como se ha comentado con anterioridad, el reactor diseñado se situará en una zona exterior al alcance de la radiación solar y por lo tanto se usará la misma como fuente de iluminación principal.

Una vez tomados los valores de referencia para el diseño del reactor a escala piloto tal y como se ha detallado en el apartado de cálculos, para la determinación exacta de los parámetros del proceso una vez el mismo esté en marcha, se deben tomar medidas de radiación incidente sobre el reactor de modo continuo. En concreto para el análisis del efecto en la productividad de *C. vulgaris* y como ya se ha comentado, interesa conocer la radiación solar correspondiente a la región fotosintéticamente activa, y por lo tanto se opta por comprar un sensor de radiación solar en el rango de 400-700nm y con una precisión en las medidas del $\pm 5\%$.



Figura 19: Sensor de radiación solar en la región del PAR. Fuente: <https://www.darrera.com/> ¹⁵

7.7 Control de temperatura

El proceso de crecimiento microalgal no supone como tal un aumento de la temperatura a consecuencia del desarrollo de la fotosíntesis. De todos modos la captación de radiación solar sobre la superficie del tubo en el interior del cual se encuentra el medio puede suponer pequeñas acumulaciones de energía calorífica que conlleven a un aumento de temperatura en el interior del reactor.

Se procede así a desarrollar el cálculo del calentamiento del medio, considerándolo agua debido a su baja densidad biomásica, en la situación más extrema; al recibir el flujo de radiación mayor diario. Para ello se estima que la radiación global recibida a mediodía en Barcelona es de $870\text{W}/\text{m}^2$ ⁹. Pues bien, considerando que en el equilibrio la cantidad de energía que llegará a la superficie del fotobiorreactor, ahora tomado a modo de captador solar, será igual a la que tome el agua por advección (la absorbida y transportada a lo largo del flujo de materia hasta la salida), la que emite y las pérdidas por conducción y convección.

El balance de energía alrededor de la zona de captación de radiación sería representado por la fórmula 20 ¹⁶.

$$A * I_{\text{global}}(\text{máx}) * e = mCe * (Tf - Ti) + A * 1,3 * (Tf - Ti)^{\frac{5}{4}} + A * e * \sigma * Tf^4 \quad (20)$$

Dónde el primer fragmento de la parte derecha de la igualdad se corresponde al calor por

conducción, la siguiente al término de advección y el último al término de radiación. Tomando el área iluminada del conjunto de tubos, $9,61\text{m}^2$, la emisividad del agua, 0,95, la cantidad de medio en el fotobiorreactor que es totalmente recirculado, 251Kg considerando la densidad del agua, el calor específico del agua, $4,18 \cdot 10^{-3}\text{J/KgK}$, la temperatura inicial, 25°C , y la constante de Boltzmann, $5,67 \cdot 10^{-8}\text{W/m}^2\text{K}^4$, se procede al cálculo iterativo de la temperatura final. Se concluye de este modo que a mediodía, en el momento de mayor radiación solar recibida, la temperatura del medio ascenderá hasta los 337K es decir **60°C** .

Queda así demostrado que se requiere de un sistema de refrigeración para bajar la temperatura del medio hasta los 25°C que propician una buena productividad. Debido a que hay momentos del día, en todos aquellos en los que la radiación global baja de los 450W/m^2 , en los que el medio no llega a calentarse no se especifican más cálculos ya que la cantidad y temperatura de agua para la refrigeración del sistema variará acorde con el momento, algo que se podrá gestionar a partir de las mediciones de temperatura de la sonda a seleccionar.

El sencillo sistema de refrigeración propuesto consta de contenedores de agua en los que se sumergirán los codos verticales que forman parte del cuerpo del reactor tubular. El detalle de esto se muestra en la Figura 20.



Figura 20: Diseño del sistema de refrigeración del fotobiorreactor.

Si bien puede resultar poco habitual el diseño de codos verticales se considera que el aumento de las pérdidas de carga es despreciable y que la superficie que pierde un contacto más directo con la luz del sol también lo es.

Para el control de temperatura es también imprescindible contar con un puerto en cuerpo del reactor para la incorporación de un sensor de temperatura. Este permitirá conocer la temperatura del medio a la entrada del reactor en todo instante y ajustar de este modo la misma mediante cambios en la temperatura del agua utilizada como sistema de refrigeración, aunque no se espera necesario. De este modo se selecciona una sonda de temperatura que será conectada a un sistema de control centralizado que recogerá las medidas tomadas para los diferentes parámetros a controlar.

La sonda seleccionada se corresponde al modelo pt100 14132820 de la marca Wika. La varilla esta recubierta de acero inoxidable para resistir a medios agresivos y tiene una longitud de 50mm y un diámetro de 6mm y esta acoplada a un cable de silicona de 2m que se conectaría adecuadamente al sistema de recopilación de datos.



Figura 21: Termómetro TESTO 905-T1. Fuente: <http://www.automation24.es>

7.8 Control parámetros bioquímicos

Para finalizar con el control de parámetros que influyen el proceso de crecimiento de *Chlorella vulgaris* resulta también imprescindible medir el pH del medio para el control de CO₂ disuelto en el mismo y disponible para ser tomado como fuente de carbono en la fotosíntesis.

La cantidad de CO₂ en medio influencia al pH del mismo. Según determinados estudios (García Cubero, 2014) que analizaron la productividad del medio en función del modo de suministro de dióxido de carbono, el aporte según demanda otorgaba mayor tasa de crecimiento. De este modo en el presente diseño se opta por la incorporación de pulsos de corriente de CO₂ al 10% cuando el valor de pH se desvie de 7,5.

Para monitorizar de manera indirecta las necesidades de dióxido de carbono del medio, mediante la medida de pH, se selecciona una sonda de pH a conectar al sistema de monitorización. Se trabajará con el modelo pH 651 suministrado por Tecnylab. El sensor seleccionado es resistente al ataque de medios agresivos y mide el pH en el rango de 0 a 14. Se constituye de un cuerpo de vidrio rellenable y un diafragma cerámico con una membrana esférica y un cable de 1m que servirá de medio de conexión al PC de control.



Figura 22: pH-metro pH 651. Fuente: <https://www.pce-instruments.com>.

Por otro lado se debe también controlar la concentración de O_2 disuelto en el medio, considerando la posibilidad de inhibición parcial del crecimiento microalgal si esta supera el 300% sobre el nivel de saturación del aire. Para desarrollar las mediciones de dicho parámetro bioquímico se incorpora a uno de los puertos una sonda

El principio de funcionamiento de las sondas polarográficas tipo Clark se componen de dos celdas separadas por un puente salino. Los electrodos son de platino y plata. Además una solución de cloruro potásico se utiliza como electrolito para recubrir ambos electrodos y separarlos de una membrana de teflón que es permeable a gases como el oxígeno y no a la disolución en la que se encuentran. A su paso por los electrodos, el oxígeno reacciona con ambos y carga negativamente el electrodo de platino y positivamente el de plata.

De este modo la diferencia de potencial medida por la reacción será directamente proporcional a la cantidad de oxígeno disuelto en el medio.

En concreto se selecciona una sonda polarográfica de oxígeno disuelto compatible dotada de un capuchón de protección y un cable de 4m que se deberá conectar al microprocesador que procesa las mediciones. Se trata del modelo H176407/4F de la marca hanna instruments. El sensor mide el oxígeno disuelto en medios líquidos en concentraciones que llegan hasta el 600% sobre el nivel de saturación, lo que se espera que estará por lo tanto dentro del rango en el que trabaja el reactor diseñado (entre el 100-300%).

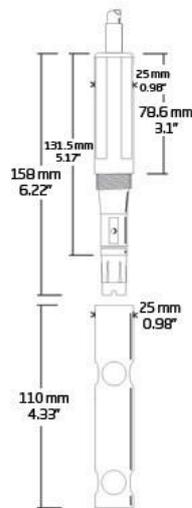


Figura 23. Sonda polarográfica H176407/4F de hanna instruments. Fuente: <http://www.hannainst.es> ¹⁷

Una vez seleccionados las sondas de medición se procede a detallar el sistema de procesamiento de los datos que se tomarán en el desarrollo del ciclo de trabajo del fotobiorreactor. Este sistema centralizado deberá recopilar las mediciones de los diferentes sensores y servirá por lo tanto para tomar acciones al respecto de las variaciones en las condiciones de trabajo. Los sistemas de adquisición de datos se constituyen de un acondicionador de la señal eléctrica generada por los sensores hacia una de características procesable por la tarjeta de adquisición de datos, y un PC convencional con el software incorporado capaz de implementar un control, a determinar, sobre la señal.

7.9 Seguridad y medioambiente

Con respecto a las condiciones de operación y seguridad deben especificarse las medidas de protección y los procedimientos de conducta esperados por parte del personal que trabaje con el fotobiorreactor o en su entorno, todo ello con el fin de reducir los riesgos a posibles accidentes.

Con lo que respecta a los riesgos de caída, el sistema de desorción tiene una altura de 2 metros con lo que para alcanzar su parte superior se deberá utilizar una plataforma de una altura adecuada y extremar la atención para evitar posibles caídas. Si existen pérdidas en el reactor y se ha generado un derrame de medio de cultivo la zona afectada deberá señalizarse apropiadamente. Además, si bien se trata de un proceso que presenta pocos riesgos dado que no se trabaja a condiciones de temperatura o presión elevadas el uso de

guantes y bata de laboratorio son recomendables.

Por otro lado, cabe también valorar el impacto ambiental del proceso diseñado, para ello se deberá analizar el impacto que causa la construcción del reactor y las sustancias utilizadas en el ciclo de trabajo. Así mismo el material del reactor, plástico acrílico, tiene un contenido energético de 131MJ/Kg lo que quiere decir que está es la energía requerida para la obtención de 1Kg de PET considerando desde el proceso de obtención del material hasta su eliminación. Tomando en consideración las necesidades del proceso y los contenidos energéticos de materiales alternativos se trata de la opción adecuada y con un impacto ambiental intermedio. En cuanto a las sustancias que toman parte del proceso, cabe destacar que tal y como se ha comentado el proceso que se estudia en el presente proyecto tiene como ventaja principal la reutilización de corrientes de CO₂, como salida de por ejemplo procesos industriales, para la obtención de un producto de valor como son los biocombustibles. El medio de cultivo por su parte, se constituye de agua y nutrientes básicos para el desarrollo de *Chlorella vulgaris*, por lo que no tendría que imponer ningún impacto ambiental al no tratarse de una sustancia contaminante.

8. Proceso de extracción de lípidos

Como se ha comentado a lo largo de la introducción a la motivación de desarrollo de este proyecto, las microalgas se consideran un buen candidato como biomasa para la producción de biofuel debido a su elevada eficiencia fotosintética y elevadas tasas y velocidades de crecimiento en comparación a otros cultivos energéticos que además suponen una ocupación del terreno y explotación de recursos alimenticios y con ello un conflicto ético.

Los procesos clave que rodean la producción del biodiesel son, a parte del cultivo de las microalgas y su secado, la extracción del contenido lipídico de las mismas una vez retirado el producto húmedo del fotobiorreactor. Este último es un proceso resulta costoso debido al elevado consumo energético que suponen las alternativas más explotadas que pasan por el uso de disolventes polares/apolares. Para tratar de conseguir que las biorefinerías de segunda generación resulten rentables es por lo tanto interesante estudiar con detalle el proceso de extracción de lípidos a implementar.

En línea con lo anterior, el presente apartado pretende resumir cuáles son los métodos para la recuperación de los aceites de las microalgas más implantados y cuáles son sus respectivas ventajas e inconvenientes. Finalmente se seleccionará uno de ellos en base a las necesidades del presente diseño y se detallarán a nivel teórico los pasos a desarrollar hasta la obtención del producto tomado como referencia de cálculo y objetivo en el proyecto, los lípidos algales.

De este modo, los métodos utilizados para la extracción de lípidos se categorizan como métodos químicos y mecánicos.

Entre los métodos mecánicos destacan los siguientes:

1. Prensado ¹⁸

Se utiliza una prensa mecánica para romper la pared celular y comprimir el producto microalgal forzando así la extracción de los aceites de su interior y dejando una torta de biomasa seca.

2. Extracción asistida por ultrasonidos ¹⁸

Este tipo de métodos facilitan el alcance a los intralípidos de difícil acceso al trabajar por ejemplo con procesos de extracción de tipo prensa o con disolventes. El principio

tras el mismo se basa en las ondas de sonido que se propagan al aplicar ultrasonidos sobre líquido. Se generan a partir de dichas ondas ciclos de elevada y reducida presión. Durante los ciclos de presión elevada las pequeñas burbujas de vacío generadas en ciclos de baja presión colapsan violentamente y resultan en el fenómeno conocido como cavitación. Mediante dicho fenómeno se forman alrededor de las células fuerzas de cizalla rompiendo así la estructura de la célula y facilitando el acceso de disolventes para la extracción de los aceites. Este soporte mejora el rendimiento de extracción entre un 50-500% con una reducción de tiempo de 10 veces.

3. Extracción asistida por microondas ¹⁸

Las microondas se definen como pulsos de radiación electromagnética entre los 0,3-300 GHz. Se trata así de una fuente de calor por contacto indirecto que puede penetrar en los biomateriales, interactuar con moléculas polares como el agua y la biomasa y calentar uniformemente el medio.

Por otro lado, los métodos químicos más estudiados son:

1. Extracción por uso de disolventes orgánicos ¹⁸

En el caso de dicho método el principio básico de la química que dice que “símil disuelve símil” es el que rige el desarrollo del proceso de extracción. Se debe seleccionar por lo tanto un disolvente con un nivel de especificidad elevado con respecto a los lípidos en especial a los acilglicérols, además se debe tratar de una disolución lo más volátil posible para asegurar un consumo energético lo más reducido posible en la posterior etapa de destilación para la recuperación del disolvente utilizado y su separación del aceite extraído.

Se utilizan un amplio rango de disolventes tanto polares, como el metanol, acetona, etil acetato y etanol, como apolares, tales como el n-hexano, cloroformo y benceno. Entre todos los posibles destacan por sus buenos resultados mezclas de cloroformo/metanol 2:1 en volumen, cuya utilización se asocia al método conocido como Folch method y mezclas de esos mismos disolventes y agua como codisolvente como es el caso del método de Bligh and Dyer.

2. Extracción con fluidos supercríticos; CO₂ ¹⁸

Consiste en la utilización de fluidos supercríticos para la extracción de lípidos tomando en cuenta que su capacidad como solventes varía con la densidad y que por lo tanto se puede controlar alterando las condiciones de trabajo (temperatura, presión y velocidad de flujo). El fluido de dichas características más utilizado es el CO₂ debido a su moderada presión crítica, de 7.4MPa, y baja temperatura crítica, de 31.1°C. En este

tipo de procesos es importante estudiar las variables hasta encontrar el óptimo que comporte un mínimo consumo de energía y maximizar el rendimiento de la extracción.

3. Extracción por líquidos iónicos ¹⁸

Se trata de nuevo de un método basado en la extracción por uso de disolventes. En este caso los líquidos iónicos tienen una reducida volatilidad y son térmicamente estables.

4. Extracción de aceites de microalgas en base húmeda ¹⁸

El previo secado junto con el proceso de extracción de lípidos del producto del fotobiorreactor supone un 90% del consumo energético del proceso completo de obtención de biodiesel. La implementación de este método permite ahorrar un 25% de dicha energía utilizando el producto húmedo.

Además, existen procesos de pretratamiento que se centran en la disrupción celular para mejorar el proceso de extracción al facilitar el acceso a los lípidos intracelulares. Algunos ejemplos son la hidrólisis enzimática y las técnicas de desestabilización por uso de ultrasonidos.

Así pues se han resumido las diferentes técnicas de extracción existentes considerando sus ventajas e inconvenientes pero queda fuera del objetivo de este trabajo realizar un estudio de cuál es la más adecuada para este proceso y proponer una metodología. De todos modos queda patente la existencia de métodos novedosos y con rendimientos elevados que evitan la utilización de disolventes orgánicos, lo cual puede por lo tanto resultar una alternativa interesante para un futuro estudio.

9. Estudio económico del proceso

En este apartado se presenta el resultado del presupuesto del que se debería disponer para la fabricación del fotobiorreactor diseñado y su puesta en marcha hasta alcanzar la producción anual. Al tratarse de un diseño a escala piloto, del cual se pretende analizar el comportamiento y extraer información para un futuro escalado a nivel industrial, no se desarrollan cálculos detallados con relación a la viabilidad del proceso considerando sus costes y beneficios.

Así mismo, se consideran entonces los costes de materiales y sistemas de control para la constitución y modo de trabajo del fotobiorreactor diseñado además de los honorarios del ingeniero de diseño y el operario de mantenimiento durante las horas de operación. Existirán también costes asociados al mantenimiento y limpieza del reactor y del medio de cultivo para el crecimiento de *C. vulgaris*.

Tabla 12: Presupuesto del proyecto.

Categoría	Material / Equipo	Coste unitario	Cantidad	Coste total
Cuerpo del fotobiorreactor	tubos de PMMA de 3mm de grosor ¹⁹	35€/m	120m	4200€
	Válvulas muestreo de 3 salidas ²⁰	20,25€/unidad	25 unidades	506,25€
Sistemas de control	pH metro ²¹	77,50 €/unidad	1 unidad	77,50 €
	Sonda de temperatura ²²	99,90 €/unidad	1 unidad	99,90 €
	Sensor de oxígeno ¹⁷	272,25 €/unidad	1 unidad	272,25 €
	Radiómetro PAR ¹⁵	220€/unidad	1 unidad	220€
	Tarjeta de adquisición de datos ²³	850 €/unidad	1 unidad	885 €
	PC para el control de parámetros	500 €/unidad	1 unidad	500€
Bombeo de alimentación	Bomba de agua HZS-200	100 €/unidad	1 unidad	100 €

Alimentación CO₂	Bombona CO ₂ (10kg)	200 €/unidad	1 unidad	200€
Sistema de aireación	Oxigenador HAP 100 ¹⁴	176€/unidad	1 unidad	176€
Tareas de construcción	Operario de instalación	12€/h	48h/operario	1152€
			2 operarios	
Total del coste de construcción + puesta en marcha				8388,9€
Horas de ingeniería	Ingeniero químico industrial Junior	15€ brutos/h	240h	3600 €
Coste ingenieril del diseño de proyecto				3600€
Operación	Cepa <i>C. vulgaris</i> ¹²	150 €/unidad	1 cepa/ciclo	150€
	Operación y mantenimiento (Operario de planta)	12€/h operario	56h/operario 2 operarios	1344 €
Coste total de producción de un lote (un ciclo de trabajo)				1494€/lote
Imprevistos (recambios y costes extra) – 10% del total				1348,3 €
Coste total final				14831,2 €

Conclusiones

A partir del desarrollo del objeto del presente trabajo se concluye que:

- Se han interiorizado los conceptos teóricos con respecto a las microalgas.
- Se ha resumido el estado de los estudios con respecto al uso de las microalgas como materia prima en las biorefinerías de segunda generación.
- Se ha diseñado un fotobiorreactor tubular recirculado a escala piloto para la producción de *Chlorella vulgaris*.
- Se han determinado los volúmenes ideales del cuerpo del fotobiorreactor para satisfacer una producción anual determinada.
 - El fotobiorreactor deberá tomar un volumen de 316l para producir 18Kg de *C. vulgaris*/año en ciclos de 6 días.
- Se ha diseñado el sistema de desoxigenación necesario para evitar la fotoinhibición del proceso, rebajando la concentración de oxígeno del 300% al 100% del nivel de saturación en aire.
- Se han determinado las condiciones de trabajo óptimas, T=25°C y pH=7,5, y los sistemas de medición correspondientes han sido seleccionados.
- Se han calculado las pérdidas de carga en el recorrido con el fin de mantener el régimen turbulento necesario para el correcto desarrollo del proceso.
- Se ha representado el resultado del diseño final en un software de diseño, SolidWorks.
- Se han presentado los sistemas de extracción de lípidos a poder desarrollar para la futura producción de biodiesel.
- Se ha estimado el coste de diseño y construcción del fotobiorreactor así como de la producción del primer lote de *C. vulgaris* en 14830€.

Agradecimientos

Agradecer el esfuerzo y apoyo de la gente que me ha rodeado a lo largo de mi formación y que ha contribuido con sus opiniones y consejos a la realización de este proyecto. El transcurso de esta etapa no hubiera sido tan enriquecedora sin la confianza y el constante soporte de parte de todos vosotros.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] CÁRDENAS VARGAS R., “*Biorefinerías para la producción de biocombustibles de segunda generación*”, Insituto de Ingeniería Energética, Universitat Politècnica de València, 2012.
- [2] LAMIOT F., “Uso y aplicaciones importantes de las microalgas”, *Anales de mecánica y electricidad*: 2014, p. 20-28
- [3] TSUKADA, O. AND KAWAHARA, T., “Mass culture of Chlorella in Asian countries”, In *Biological Solar Energy Conversion* ed. Mitsui, A., Miyachi, S., San-Pietro, A. and Tamija, H.:1997, p. 363–366.
- [4] DURAND-CHASTEL, H., “*Production and use of Spirulina in Mexico*”, *Algae Biomass Production and Use*, Amsterdam: Elsevier/North Holland Biomedical Press; 1980, p. 51-64
- [5] Lee, YK., “*Commercial production of microalgae in the Asia-Pacific*”, *rim. J Appl Phycol* 9: 1997, p. 403–411
- [6] BOROWITZKA, M.A., “*Commercial production of microalgae: ponds, tanks and fermenters*”, *Progress in Industrial Microbiology*, 35:1999, p. 313-321.
- [7] OSWALD W.J., GOTAAS H.B, “*Photosynthesis in sewage treatment*”, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 122: 1957, p. 73-105.
- [8] MOLINA E., FERNÁNDEZ J., ACIÉN F.G., CHISTI Y., “*Tubular photobioreactor design for algal cultures*”, *Journal of Biotechnology* 92: 2001, p. 113-131.
- [9] KIM. YOUNG-HOO, PARK, S., KIM, MIN HOO, “*Ultrasound-assisted extraction of lipids from Chlorella vulgaris using [Bmim][MeSO4]*”, *Biomass and bioenergy* 56(2013), 99-103.
- [10] GARCIA CUBERO R., “*Producción de biomasa de microalgas rica en carbohidratos acoplada a la eliminación fotosintética de CO₂*”, *Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis, Universidad de Sevilla*, 2014.
- [11] GENERALITAT DE CATALUNYA, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, “*Atlas de Radiació Solar a Catalunya*”, 2000.

- [12] [<http://bea.marinebiotechnology.org/es/productos/banco-de-cepas>; Julio 2016]
- [13] POWELL E., MAPIOUR M., EVITTS R., HILL G., “Growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and its use as a cathodic half cell”, *Biosurce Technology* 100:2009, p. 269-274
- [14][http://estanqueanibal.com/oxigenadores/24-oxigenador_jebo25w40lmin.html#/oxigenadores-hap_100 ; Agosto 2016]
- [15] [<https://www.darrera.com/detalle-producto.php?d=1&id=330> ; Agosto 2016]
- [16] COSTA LÓPEZ J., CERVERA MARCH S., CUNILL GARCIA F., ESPLUGAS VIDAL S., MANS TELXIDO C., MATA ÁLVAREZ J., “Curso de Química Técnica”, Editorial Reverte: 1991, 362-354.
- [17]<http://www.hannainst.es/catalogo-productos/oxigeno-disuelto/portatil/medidor-de-oxigeno-disuelto--hi-98186>; Agosto 2016]
- [18] MUBARAK M., SHAIJA A., SUCHITHRA T.V., “A review of the extraction of lipid from microalgae for biodiesel production”, *Algal Research* 7(2015), 117-123.
- [19]http://www.ebay.es/itm/60MM-X-3MM-TUBO-ACR-LICO-TRANSPARENTE-PLASTICO-PLEXIGLAS-TUBER-A-500MM/361195446813?_trksid=p2141725.c100338.m3726&_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIC.MBE%26ao%3D1%26asc%3D20150313114020%26meid%3D5c1bec20cb514048a21038c5025ebd70%26pid%3D100338%26rk%3D4%26rkt%3D18%26sd%3D361195454963
- [20] [<http://www.poolaria.com/valvulas-de-pvc/334-valvula-distribuidora-a-3-vias-pvc-encolar-manual.html>]; Agosto 2016]
- [21] [<http://www.tecnylab.es/es/electrodos-de-ph/3958-electrodo-ph-651.html> ; Agosto 2016]
- [22] [http://www.automation24.es/sensores-de-proceso/pt-100-wika-14132820-tf45-pt100/a/4-l/6mm/200c/20m-i51-25680.htm?refID=adwords_shopping_ES&qclid=Cj0KEQjwwry8BRDjsbjMpPSDvagBEiQAoW0nAXkl_c3YQGcqiL4Fp-Qg_GkW1cxzz_4qFltRc13c7oaAo_d8P8HAQ ; Agosto 2016]
- [23] [<http://es.omega.com/pptst/INET-100.html>]; Agosto 2016]

Bibliografía complementaria

Se presentan aquí un seguido de referencias no citadas de forma explícita per que han sido utilizadas como fuente de información conceptual.

VIJAYAVENKATARAMAN S., INIYAN S., RANKO GOIC., "A review of climate change, mitigation and adaptation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:2012, p 878-897.

GÓMEZ, A.M., VILLAREAL, N.A.J., "Estudio de la incidencia del suministros de CO₂ en el crecimiento de las microalgas en un fotobiorreactor a escala laboratorio", Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisico-Químicas, 2010.

ACIÉN FERNANDEZ F.G., GARCIA CAMACHO F., SÁNCHEZ PÉREZ J.A., FERNÁNDEZ SEVILLA J.M., MOLINA GRIMA E., "A model for light distribution and average solar irradiance inside outdoor tubular photobioreactors for the microalgal mass culture", *Biotechnology and bioengineering*, vol 55 no 5: 1997, p. 702-714.

ACIÉN FERNANDEZ F.G., GARCIA CAMACHO F., SÁNCHEZ PÉREZ J.A., FERNÁNDEZ SEVILLA J.M., MOLINA GRIMA E., "Modeling of biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal cultures: effects of dilution rate, tube diameter and solar irradiance", *Biotechnology and bioengineering*, vol 59 no 6: 1998, p. 606-616.

CAMACHO RUBIO F., ACIÉN FERNÁNDEZ F.G., SÁNCHEZ PÉREZ J.A., GARCIA CAMACHO F., MOLINA GRIMA E., "Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture", *Biotechnology and bioengineering*, vol 62 nº1:1999, p. 71-86

MOLINA GRIMA E., ACIÉN FERNÁNDEZ F.G., GARCÍA CAMACHO F., CAMACHO RUBIO F., CHISTI Y., "Scale-up of tubular photobioreactors", *Journal of applied phycology* 12: 2000, p. 355-268.

MITSunORI L., "Kinetic Analysis of the Growth of *Chlorella vulgaris*", *Biotechnology and bioengineering*, vol. 36:1990, p. 198-206.

PRUVOST J., VAN VOOREN G., LE GOUIC B., COUZINET MASSION A., LEGRAND J., "Systematic investigation of biomass and lipid productivity by microalgae in photobioreactor biodiesel application" *Bioresource Technology* 102(2011) 150-158.

HONG-WEI YEN, JUNG-TZU CHANG, "A two-stage cultivation process for the growth enhancement of *Chrorella Vulgaris*", *Bioprocess Biosyst Eng* 36(2013), 1797-1801.

[<http://allaboutalgae.com/>; Marzo 2016]

[<http://www.algaenergy.es/>; Marzo 2016]

[<http://www.fao.org/>; Abril 2016]



[<http://www.oilgae.com/algae/comp/comp.html>; Abril 2016]

[http://www.biodieselpain.com/plantas_listado.php ; Abril 2016]

[<http://www.abengoabioenergy.com/> ; Abril 2016]