

Trabajo Final de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes

MEMORIA

Autor: Vicente Francisco Sanz Martínez
Director: Jordi Bou
Convocatoria: Junio 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de un fotobiorreactor, a nivel de planta piloto, para la obtención anual de 30 kg de *Dinoflagellate Luciferina*.

Para poder cumplir con el objetivo descrito anteriormente, se ha realizado una introducción teórica para adquirir los conocimientos necesarios para así poder realizar el diseño del fotobiorreactor.

Inicialmente se ha definido el concepto de biorrefinerías y química sostenible, que son dos conceptos clave en los que se ha basado este trabajo. Proponen métodos alternativos que respetan el medio ambiente para la obtención de productos. También, se ha definido el concepto de microalgas, como se clasifican y las diferentes aplicaciones, así como el producto a obtener, que es el *Dinoflagellate Luciferina*. Por último, se han descrito los distintos tipos de fotobiorreactores, así como los diferentes sistemas de cultivo y como interaccionan con la luz.

El diseño se ha realizado para un fotobiorreactor de 60 litros de volumen total de tipo *Airlift* que trabaja en lotes. El diámetro interior del *downcomer* será de 250 milímetros y el del *riser* de 112,5 milímetros. La altura del *downcomer* será de 1000 milímetros. Contará con una campana superior, también conocida como desgasificador, de 10 litros. La productividad del proceso será de 17 gramos de *Dinoflagellate Luciferina* por litro de cultivo en fermentaciones de 6 días de duración. Al tratarse de un fotobiorreactor tipo *Airlift* la agitación se realizará a partir del aire introducido para realizar la aireación, para realizarlo se utilizará un compresor de 200 W.

El cultivo para poder crecer adecuadamente necesitará dos ciclos de 12 horas cada uno, en el primero estará iluminado mediante una tira LED de 6 metros de longitud en total y, en el segundo, estará en la oscuridad para que se pueda realizar la fotosíntesis correctamente. El material del fotobiorreactor será de metacrilato, con un grosor de paredes de 5 milímetros. El soporte del fotobiorreactor será construido con acero inoxidable 316 L. Además, se detallaran las condiciones óptimas para realizar el cultivo de forma adecuada y con qué sondas se controlaran algunos parámetros como pH o temperatura.

Se han detallado las condiciones de seguridad para la correcta manipulación del fotobiorreactor para así poder minimizar la posibilidad de que ocurra un accidente.

Se ha cuantificado el coste del fotobiorreactor a partir de un estudio económico para conocer el coste de los materiales. El coste del fotobiorreactor será de 16.600,00 €.

Sumario

SUMARIO	5
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Motivación	9
1.2. Alcance del proyecto	10
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivo general	11
2.2. Objetivos particulares	11
3. TEORÍA Y ESTADO DEL ARTE	13
3.1. Teoría 1: La química sostenible y las biorrefinerías	13
3.1.1. La química sostenible	13
3.1.2. Las biorrefinerías	15
3.1.2.1. Clasificación de las biorrefinerías	15
3.2. Teoría 2: <i>Dinoflagellate Luciferina</i>	17
3.3. Teoría 3: Microalgas	18
3.3.1. Introducción	18
3.3.2. Clasificación	19
3.3.2.1. Cianobacterias	19
3.3.2.2. Rodófitas	20
3.3.2.3. Bacilariofíceas	20
3.3.2.4. Clorófitas	21
3.3.3. Aplicaciones de las microalgas	22
3.3.4. Parámetros de crecimiento	23
3.3.4.1. Concentración de Biomasa (C_b)	23
3.3.4.2. Velocidad específica de crecimiento (μ)	23
3.3.4.3. Productividad volumétrica (P_b)	24
3.3.4.4. Productividad areal (P_a)	25
3.3.4.5. Velocidad específica de mantenimiento (m)	25
3.3.4.6. Velocidad de producción de biomasa (F_b)	26
3.3.5. Factores a controlar en un sistema de cultivo	27
3.3.5.1. Luz	27
3.3.5.2. Temperatura	28

3.3.5.3. pH	28
3.3.5.4. CO ₂	28
3.3.5.5. Nutrientes.....	28
3.3.5.6. Agua.....	29
3.3.5.7. Oxígeno disuelto	29
3.3.5.8. Agitación	29
3.4. Teoría 4: Fotobiorreactores y sistemas de cultivo.....	30
3.4.1. Sistemas abiertos.....	30
3.4.1.1. Open ponds.....	30
3.4.1.2. Raceway ponds.....	31
3.4.1.3. Tanques circulares	32
3.4.2. Sistemas cerrados	33
3.4.2.1. Fotobiorreactor de columna.....	33
3.4.2.2. Fotobiorreactor de placas planas	34
3.4.2.3. Fotobiorreactor tubular	35
3.4.3. Comparación de los sistemas de cultivo	36
3.4.4. Modo de operación y cultivo.....	37
3.4.4.1. Discontinuo (batch)	37
3.4.4.2. Semicontinuo (batch alimentado)	39
3.4.4.3. Continuo.....	39
3.5. Teoría 5: Interacción de las microalgas con la luz	41
3.5.1. Cultivos ópticamente densos	41
3.5.2. Capacidad fotosintética de la biomasa.....	42
4. MATERIALES Y EQUIPO	44
5. RESULTADOS	45
5.1. Elección del fotobiorreactor: <i>Air-lift</i>	45
5.1.1. Elección del fermentador	45
5.1.2. Descripción de fotobiorreactor tipo <i>Airlift</i>	46
5.2. Condiciones del fotobiorreactor.....	47
5.2.1. Producción.....	47
5.2.2. Luz.....	47
5.2.3. Temperatura	48
5.2.4. pH.....	48

5.2.5. Aireación	48
5.3. Parámetros de diseño	49
5.3.1. Capacidad de producción	49
5.3.2. Parámetros de forma	50
5.3.3. Volumen.....	51
5.3.4. Geometría	52
5.3.5. Aireación y agitación	53
5.3.6. Control de la temperatura	54
5.3.7. Control del pH.....	55
5.3.8. Materiales	56
5.3.9. Cálculo grosor de los tubos.....	58
5.3.10. Cálculo del soporte del fotobiorreactor	59
5.3.11. Luz	65
5.3.12. Tapa.....	67
5.3.13. Puertos.....	67
5.3.14. Salidas	67
5.3.15. Válvulas	68
5.4. Diseño del fotobiorreactor y planos	69
6. SEGURIDAD	79
7. ESTUDIO ECONÓMICO	82
8. IMPACTO AMBIENTAL	85
9. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO	87
CONCLUSIONES	89
AGRADECIMIENTOS	91
BIBLIOGRAFÍA	92
Referencias bibliográficas.....	92

1. Introducción

En la naturaleza existen numerosos compuestos que se utilizan para la obtención de luz en organismos bioluminiscentes. Las luciferinas son algunos de estos compuestos que utilizan la actividad catalítica de la enzima luciferasa produciendo una reacción de oxidación. Por esta reacción la luciferina libera energía en forma de luz.

Las luciferinas se encuentran en algunas algas que provocan las ondas luminosas que se pueden ver en algunos océanos por la noche.

1.1. Motivación

Actualmente, la mayor parte de los productos industriales que se obtienen en la industria química son derivados del petróleo o a partir de productos químicos que en algún momento de su vida pueden ser perjudiciales para el medio ambiente. Debido a la concienciación acerca de la protección medio ambiente, actualmente se están desarrollando nuevos métodos de obtención y producción de algunos productos de forma que se minimice la contaminación en todas las fases.

En los últimos años existe una tendencia conocida como *química verde*, la cual se centra en investigar sobre nuevas formas de sintetizar sustancias químicas de forma que se reduzcan o se eliminen los productos químicos.

La motivación del proyecto se basa en la obtención de productos luminiscentes para la señalización de emergencia o iluminación natural, por ejemplo.

Hoy en día existen numerosos métodos para obtener productos luminiscentes, la mayoría de forma industrial mediante productos químicos que pueden resultar perjudiciales para el medio ambiente. Por este motivo, la finalidad de este proyecto es poder obtener productos luminiscentes de forma natural mediante el cultivo de microalgas.

1.2. Alcance del proyecto

Debido al interés de los productos luminiscentes para señalizaciones de emergencia, este proyecto consistirá en el diseño de un fotobiorreactor de moderadas dimensiones, a nivel de planta piloto, detallando todas las condiciones operativas como son la definición de los volúmenes del cuerpo, las condiciones de trabajo, la selección de los sistemas de medición de los parámetros a controlar, sistemas de bombeo y niveles de oxígeno entre otros.

En el fotobiorreactor se producirá el crecimiento de las microalgas y la obtención del producto.

Para realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento se han utilizado ecuaciones teóricas básicas.

Finalmente se realizarán los planos del fotobiorreactor para que pueda llevarse a cabo la construcción y su posterior uso.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo principal del proyecto es el diseño de un fotobiorreactor, a nivel de planta piloto, para la obtención de la microalga *Dinoflagellate Luciferin* mediante el crecimiento de estos microorganismos con una producción de 30 kg / año.

2.2. Objetivos particulares

Los objetivos concretos del proyecto serán:

- i. Concretar la cantidad de producto anual a obtener.
- ii. Selección del procedimiento adecuado para la obtención del producto.
- iii. Conocer la productividad de las microalgas.
- iv. Seleccionar el tipo de fotobiorreactor.
- v. Realizar un diseño original del fotobiorreactor.
- vi. Determinar volumen, geometría, agitación, iluminación, alimentación y materiales.
- vii. Definir condiciones de trabajo.
- viii. Realizar los planos mediante SolidWorks.
- ix. Determinar las medidas de seguridad adecuadas a la hora de trabajar con el fotobiorreactor.
- x. Determinar el coste del fotobiorreactor.

3. Teoría y estado del arte

3.1. Teoría 1: La química sostenible y las biorrefinerías

Actualmente los procesos industriales están evolucionando hacia un nuevo escenario en el que se prescinde de productos como el petróleo como materia prima y se minimiza el impacto medioambiental en todas las fases del proceso. Debido a estas corrientes e investigaciones hacia nuevos procedimientos de obtención de productos ya existentes, se están utilizando nuevos términos a nivel industrial. Algunos de estos términos son química sostenible y biorrefinerías que se definirán a continuación.

3.1.1. La química sostenible

La química sostenible, también conocida como química verde, aporta una mejora en la calidad y el bienestar de la población. Su finalidad es encontrar alternativas a la química tradicional, buscando nuevos procesos y nuevas formas de obtención de productos comunes, que en ocasiones, pueden representar un peligro para la salud y el medio ambiente.

Debido a la concienciación de la sociedad con el medio ambiente y a las políticas y normativas, cada vez más restrictivas en este ámbito, en los últimos años se ha hecho un enfoque de los procesos industriales de prevenir y minimizar la contaminación y el impacto que este tiene hacia el medio ambiente desde el origen. De esta forma se cambia la mentalidad actual en cuanto a la gestión de residuos, ya que tradicionalmente los esfuerzos se centraban en tratar los residuos obtenidos a final del proceso y, ahora, lo que se busca es eliminar y minimizar al máximo los residuos creados en todas las fases del proceso. [3]



Figura 1. La química sostenible [37]

Por este motivo la química sostenible se encarga del diseño de productos y procesos industriales en los que se reducen o eliminan el uso y producción de sustancias peligrosas.

La química sostenible se basa en 12 principios que se detallan a continuación [4]:

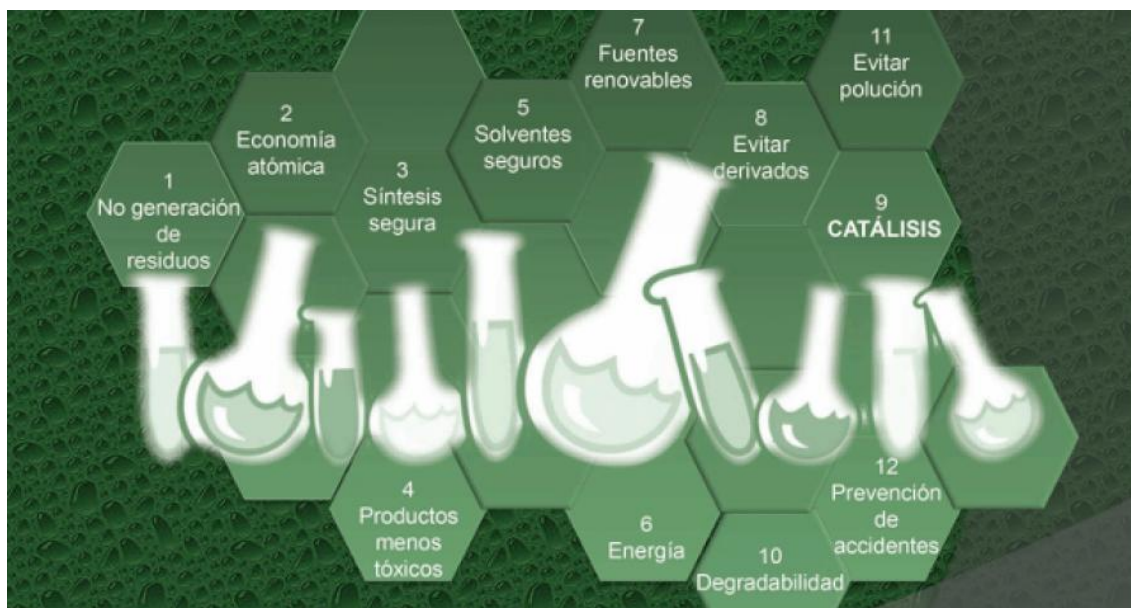


Figura 2. 12 principis de la química sostenible [38]

- i. **Prevenció.** Es millor prevenir la formació de residuos que eliminarlos una vegada creatos
- ii. **Economia atòmica.** El producte acabat en els dissenys de síntesis ha de incorporar el màxim possible de materials utilitzats durant el procés.
- iii. **Síntesis segura.** Minimizar la toxicitat en el disseny dels mètodes sintètics. Idealment no ha de tenir cap i en la pràctica ha de minimitzar-se en la mesura de lo possible
- iv. **Productes segurs.** En quant al disseny de productes químics, se ha de preservar la eficàcia de la seva funció presentant una toxicitat escassa
- v. **Disolvents segurs.** Ús mínim de substàncies auxiliars (disolvents, absorbents, etc.), sempre optant per les més inoques
- vi. **Eficiència energètica.** Les necessitats energètiques han de ser considerades en relació als seus impactes ambientals i econòmics. Els mètodes sintètics han de ser portats a temperatura i pressió ambientals.
- vii. **Fuentes renovables.** Les matèries de partida han de ser renovables i no extingibles en la mesura que això resulta practicable tècnica i econòmicament.
- viii. **Evitar derivats.** La formació innecessària de derivats (bloqueig de grups, protecció/desprotecció, modificació temporal de processos físics/químics) ha de ser evitada en quant sea possible.

- ix. **Catalizadores.** Los reactivos catalíticos (tan selectivos como sea posible) son superiores a los estequiométricos.
- x. **Biodegradabilidad.** Los productos químicos han de ser diseñados de manera que, al final de su función, no persistan en el ambiente, sino que se fragmenten en productos de degradación inerte.
- xi. **Polución.** Se deben desarrollar las metodologías analíticas que permitan el monitoreo a tiempo real durante el proceso y el control previo a la formación de sustancias peligrosas.
- xii. **Prevención de accidentes.** Las sustancias y las formas de su uso en un proceso químico, deben ser elegidas de manera que resulte mínima la posibilidad de accidentes.

3.1.2. Las biorrefinerías

La Agencia Internacional de la Energía Internacional ha definido biorrefinación como: *procesamiento de manera sostenible de biomasa para lograr su conversión en una variedad de productos bio-compuestos (comida, sustancias químicas, materia prima) y bioenergía (biocombustibles, energía y/o calor)*. [2]

Las biorrefinerías son instalaciones que transforman biomasa en productos industriales de forma sostenible. Aquí vemos la principal diferencia con las refinerías convencionales, las cuales refinan el petróleo con la finalidad de obtener productos derivados. En las biorrefinerías la materia prima que se utiliza es la biomasa. [1]

En las biorrefinerías, partiendo de recursos biológicos como cultivos tradicionales, residuos orgánicos de origen agrícola, ganadero, forestal, industrial o urbano; se obtienen productos energéticos, alimentos, piensos, fertilizantes y bioproductos, entre otros.

3.1.2.1. Clasificación de las biorrefinerías

Según el tipo de materia prima utilizada, se pueden distinguir cuatro tipos de biorrefinerías [6]:

- i. **Biorrefinerías verdes.** Son aquellas basadas en sistemas tecnológicos totalmente integrados y sustentables, ligadas a no perjudicar el medioambiente y destinadas a la explotación de materiales biológicos ya sean de origen residual o proveniente de tierras dedicadas a la producción sustentable de estos.
- ii. **Biorrefinerías de cultivo completo.** Este tipo de biorrefinerías procesan y consumen todo el material obtenido en cultivos agrícolas para la obtención de productos útiles desde el punto de vista energético y químico.

- iii. **Biorrefinerías lignocelulósicas.** La materia prima de este tipo de refinerías es madera, residuos agrícolas, cultivos energéticos y residuos municipales. Estos recursos hacen reducir los costes y la flexibilidad del recurso.
- iv. **Biorrefinerías marinas.** De la producción de biomasa neta, generalmente el 50 % de esta producción es de origen acuático, por lo que la biomasa marina tiene un gran potencial para su utilización energética.

3.2. Teoría 2: *Dinoflagellate Luciferina*

Las luciferinas son una clase de sustratos de moléculas pequeñas que se oxidan en presencia de la enzima luciferasa para producir oxiluciferina y energía en forma de luz. Este tipo de luciferina se encuentra en el dinoflagelado bioluminiscente.

La luciferina de *Pyrocystis lunula* se ha caracterizado completamente y se ha demostrado que es un tetrapirrol lineal con similitud a la clorofilida a. La molécula desprende una fluorescencia azul característica de 475 nm cuando se irradia con luz ultra violeta. Se ha sugerido que la luciferina es un producto de la degradación la clorofila mediante fotooxidación, pero hay algunos hechos que indican que puede no ser el caso. La luciferina solo aparece en *Lingulodinium Polyedra* en el inicio de la fase oscura, en la cual no hay luz solar disponible para la fotooxidación. Además, la bioluminiscencia persistió en el dinoflagelado heterotrófico después de ser cultivada durante un año en harina de arroz, en cuyo momento no se produjo clorofila. [8][9][10]

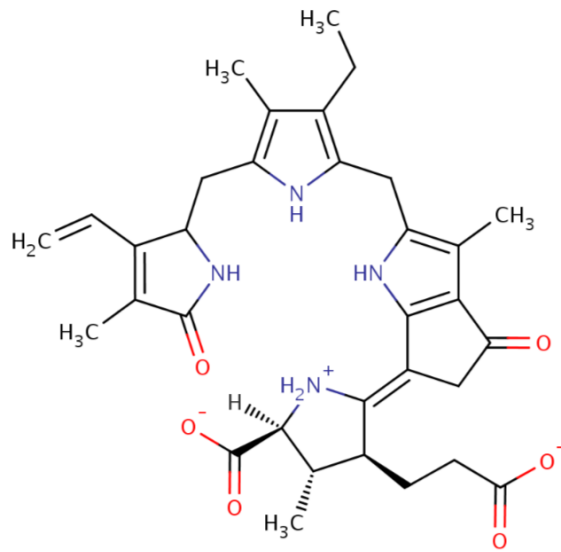


Figura 3: Estructura química de Dinoflagellate Luciferin [7]

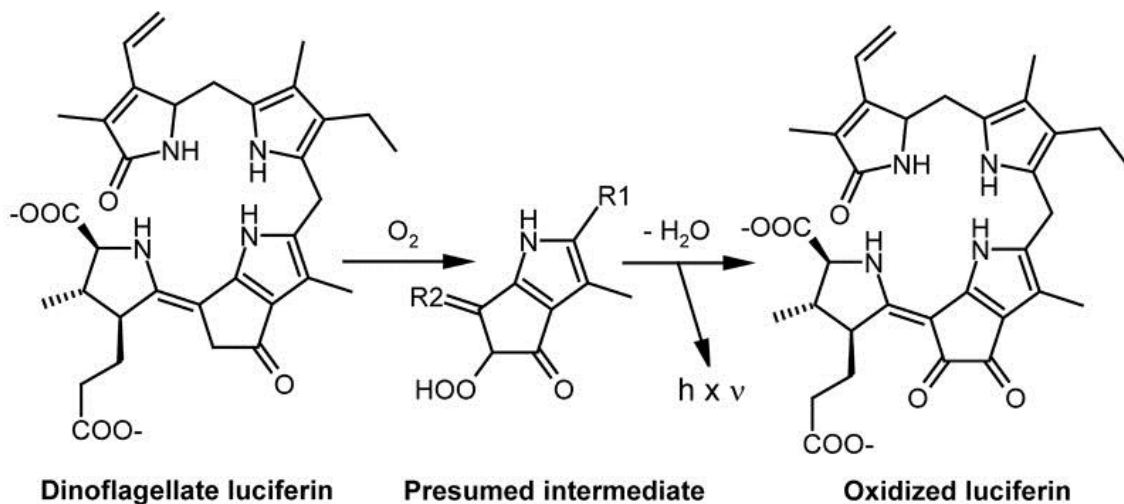


Figura 4: Oxidación de la luciferina dinoflagelada por luciferasa [9]

3.3. Teoría 3: Microalgas

3.3.1. Introducción

Las microalgas y las cianobacterias son seres unicelulares de tamaño entre 2 y 200 μm y forma muy variada; tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis. Existen en medios principalmente acuáticos, tanto marinos como dulceacuícolas o a veces bajo tierra. Las microalgas se caracterizan por los siguientes rasgos [14]:

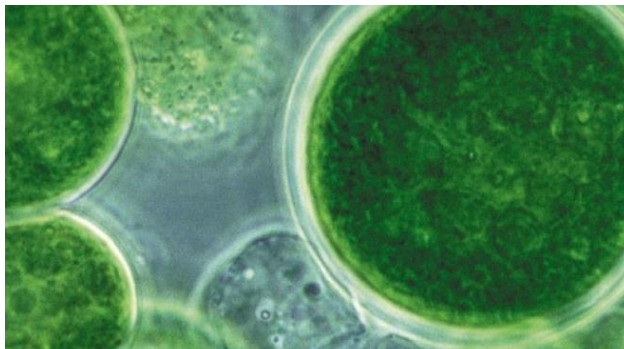


Figura 5. Microalgas [39]

- Son seres fotoautotróficos: Autótrofos porque utilizan el CO_2 como fuente inorgánica de carbono y fotótrofos porque usan la luz como fuente de energía. Realizan el 90 % de la fotosíntesis total de la tierra.
- Tienen una gran capacidad de producción de biomasa. Las microalgas crecen con mayor rapidez que las plantas terrestres, debido a su facilidad de división, tienen mayor productividad que los cultivos terrestres y pueden obtenerse en condiciones climáticas y regiones donde los cultivos no pueden hacerlo, tales como los desiertos o zonas costeras. Una de las principales ventajas de las microalgas es que ayudan a reducir el efecto invernadero.
- Son seres de composición compleja que encuentran un campo de actuación bastante amplio en la nutrición humana y animal, pudiendo ser comestibles las algas verdes y las cianobacterias. Contienen sustancias de alto valor biológico, tales como ácidos grasos polinsaturados, proteínas, antioxidantes, vitaminas y minerales. Por otro lado, recientes estudios indican que las microalgas podrían ser usadas para producir biodiesel e hidrogeno.
- Son seres con una gran plasticidad metabólica. Se utilizan como materia prima para la obtención de biodiesel.
- El número de taxones es elevado, existiendo una gran variedad de especies catalogadas. Actualmente se cuentan más de 30.000 especies de microalgas.

3.3.2. Clasificación

Las microalgas se pueden clasificar por reino, división, clase, familia, género y especie. Conociendo el género y la especie ya se puede averiguar las necesidades nutricionales que tendrá la microalga de forma que podremos ubicarla en un medio adecuado.

Los principales grupos de algas conocidos actualmente son cianobacterias, rodófitas, bacilariofíceas y clorófitas. A continuación se describirán cada uno de estos grupos [15]:

3.3.2.1. Cianobacterias

Este tipo de algas son procariontes, pertenecen al reino de las eubacterias. Son organismos planctónicos sin movilidad y se suelen encontrar en ambientes extremos, tanto en aguas saladas como dulces, pudiéndose encontrar solas o agrupadas en filamentos. Algunas especies pueden encontrarse en la superficie de los medios acuáticos debido a que existe gas almacenado en sus vacuolas. Si en el medio existe una alta concentración en nutrientes, puede favorecer un crecimiento rápido y acumulación de algas en el medio denominado como *Bloom*.

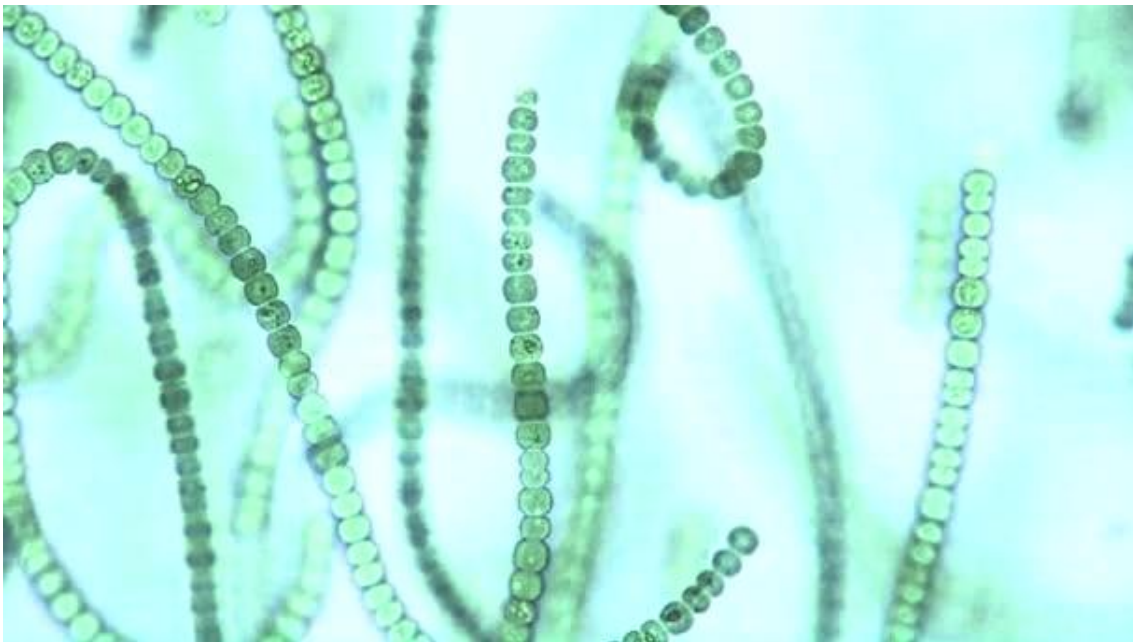


Figura 6. Imagen de microalgas cianobacterias [15]

Dentro de las cianobacterias, los géneros más característicos son *Anabaena*, *Anabaeopsis*, *Nostoc*, *Oscillatoria*, *Nadularia*, *Phormidium* o *Spirulina*.

Este grupo de algas también se conoce como **algas verde-azuladas**.

3.3.2.2. Rodófitas

Este tipo de microalgas son características de los medios marinos y en los que existen temperaturas moderadas, se encuentran normalmente en regiones templadas y tropicales.

Morfológicamente no disponen de flagelos. Su pared celular está compuesta de una capa microfibrilar de celulosa o xilano y por mucílagos de polisacáridos.

Este grupo de algas también se conoce como **algas rojas**.



Figura 7. Imagen de microalgas rodófitas [40]

3.3.2.3. Bacilariofíceas

Son algas eucariotas de color marrón y dorado. Este color se debe al enmascaramiento de la clorofila por la apigmentación de la fucoxantina y el β -caroteno. Su producto de almacenamiento es crisolaminarina. Este tipo de microalgas poseen cierta cantidad de lípidos en su composición.

Las diatomeas se encuentran en este grupo. Pueden dividirse en dos clasificaciones según su morfología:

- Simetría bilateral
- Simetría radial



Figura 8. Imagen de microalgas bacilariofíceas [15]

Las que poseen una simetría radial son típicas de aguas marinas, donde tiene un papel importante en la cadena trófica del ecosistema.

3.3.2.4. Clorófitas

Este tipo de microalgas constituyen un extenso grupo dentro de las microalgas eucariotas con una gran variedad morfológica, tanto a nivel macroscópico como microscópico.

Se encuentran principalmente en agua dulce, aunque también pueden encontrarse en medios marinos o en ambientes subaéreos. En muchos casos son capaces de desarrollar relaciones simbióticas con otros organismos.

Las especies más estudiadas de este grupo son *Scenedesmus*, *Chlorella* y *Pediastrum*.

Este grupo de algas también se conoce como **algas verdes**.



Figura 9. Imagen de microalgas clorófitas [15]

3.3.3. Aplicaciones de las microalgas

Las aplicaciones de las microalgas son muy variadas. Esto hace que sean interesantes de estudiar. Algunas de las aplicaciones más destacadas son [11][16]:



Figura 10. Aplicaciones [11]

- Producción de biocombustibles
- Producción de fertilizantes
- Depuración de aguas residuales
- Complementos nutricionales
- Ácidos grasos poliinsaturados
- Pigmentos
- Complementos medicinales
- Complementos deportivos
- Captura de contaminantes

3.3.4. Parámetros de crecimiento

Los parámetros de crecimiento permiten medir la eficiencia del funcionamiento de los cultivos de microalgas, de forma que se puedan cuantificar para así llegar a mejorarlos y optimizarlos.

Algunos de los parámetros a tener en cuenta son [11]:

3.3.4.1. Concentración de Biomasa (C_b)

La concentración de biomasa se expresa en masa seca por unidad de volumen de cultivo. Se expresa en [g/l].

3.3.4.2. Velocidad específica de crecimiento (μ)

Este parámetro relaciona la concentración de biomasa con el tiempo. Indica la capacidad de generación de biomasa por cada unidad de biomasa, es decir, la cantidad de gramos de biomasa que se puede generar a partir de cada gramo de biomasa en la unidad de tiempo. Matemáticamente se define como:

$$\mu = \frac{1}{C_b} \cdot \frac{dC_b}{dt}$$

Ec. 1

Dónde los términos de la ecuación serían:

μ : velocidad específica de crecimiento, tiene unidades de h^{-1} o días⁻¹.

C_b : concentración de biomasa.

Cuando el cultivo se encuentra en condiciones de saturación de nutrientes, μ es constante e igual a la máxima correspondiente a la temperatura de cultivo. Existe una $\mu_{m\acute{a}xima}$ absoluta que ocurre a temperatura óptima.

En el caso de no haber limitación de nutrientes, μ es constante e igual a $\mu_{m\acute{a}xima}$. En esta situación la ecuación diferencial que define μ es fácil de integrar y se obtiene la siguiente expresión en la que el crecimiento es exponencial.

$$C_b = C_{b0} \cdot e^{\mu_{m\acute{a}xima} \cdot t}$$

Ec. 2

Dónde C_{b0} es la concentración cuando $t = 0$.

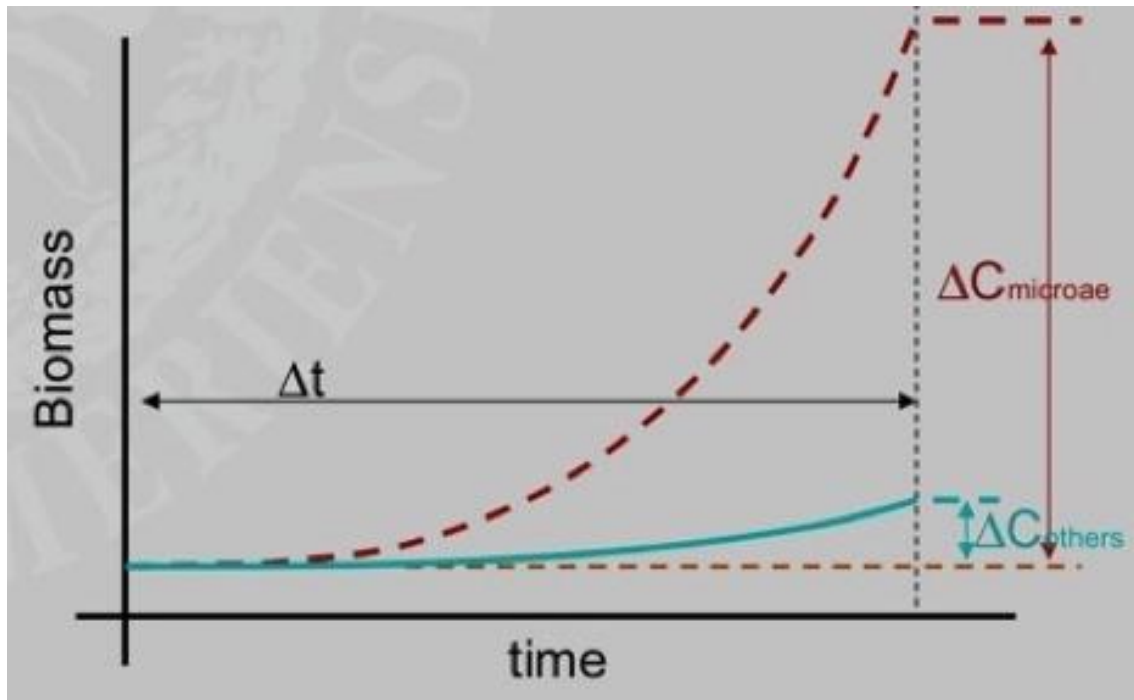


Figura 11. Gráfico relación biomasa y tiempo [11]

3.3.4.3. Productividad volumétrica (P_b)

La productividad volumétrica mide la cantidad de biomasa generada en la unidad de volumen del cultivo por unidad de tiempo. Las unidades serían $[g \cdot m^3 \cdot dia^{-1}]$.

La ecuación que define la productividad volumétrica instantánea es:

$$P_b = \frac{dC_b}{dt}$$

Ec. 3

Con las ecuaciones anteriores se puede deducir que:

$$P_b = \mu \cdot C_b$$

Ec. 4

3.3.4.4. Productividad areal (P_a)

Uno de los parámetros importantes a tener en cuenta es la productividad que se obtiene por unidad de área de fotobiorreactor instalado.

Se relaciona con los anteriores parámetros con las ecuaciones:

$$P_a = P_b \cdot a$$

Ec. 5

$$a = \frac{V_R}{S}$$

Ec. 6

Dónde los términos de la ecuación serían:

V_R : volumen de fotobiorreactor instalado.

S : unidad de superficie de suelo ocupado.

Las unidades de P_a son unidad de masa por unidad de superficie y tiempo [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$].

En la superficie de suelo ocupado se debe de tener en cuenta no solo la huella del fotobiorreactor, sino también las sombras que proyecte.

3.3.4.5. Velocidad específica de mantenimiento (m)

La velocidad específica de mantenimiento hace referencia al caso en el que existe una ausencia total de luz. En estas situaciones la concentración de biomasa decrece porque las microalgas consumen sus propias reservas.

Se puede obtener la cantidad de biomasa que consume cada unidad de biomasa por unidad de tiempo para sobrevivir a partir de la siguiente ecuación.

$$m = \left(- \frac{1}{C_b} \frac{dC_b}{dt} \right)_{I=0}$$

Ec. 7

Dónde los términos de la ecuación serían:

m : velocidad específica de mantenimiento

I : intensidad de la luz

También se puede expresar de forma:

$$\ln\left(\frac{C_b}{C_{b0}}\right) = -m \cdot t$$

Ec. 8

3.3.4.6. Velocidad de producción de biomasa (F_b)

La velocidad de producción de biomasa hace referencia a la producción total de un fotobiorreactor como caudal de biomasa. Se obtiene a partir de la ecuación:

$$F_b = P_b \cdot V_R$$

Ec. 9

3.3.5. Factores a controlar en un sistema de cultivo

Existen algunos factores que afectan al crecimiento de las microalgas. Es importante controlar estos factores para que se den las condiciones óptimas de crecimiento para cada especie de microalga en particular. Algunos de estos factores a controlar son los siguientes [12][13][21]:

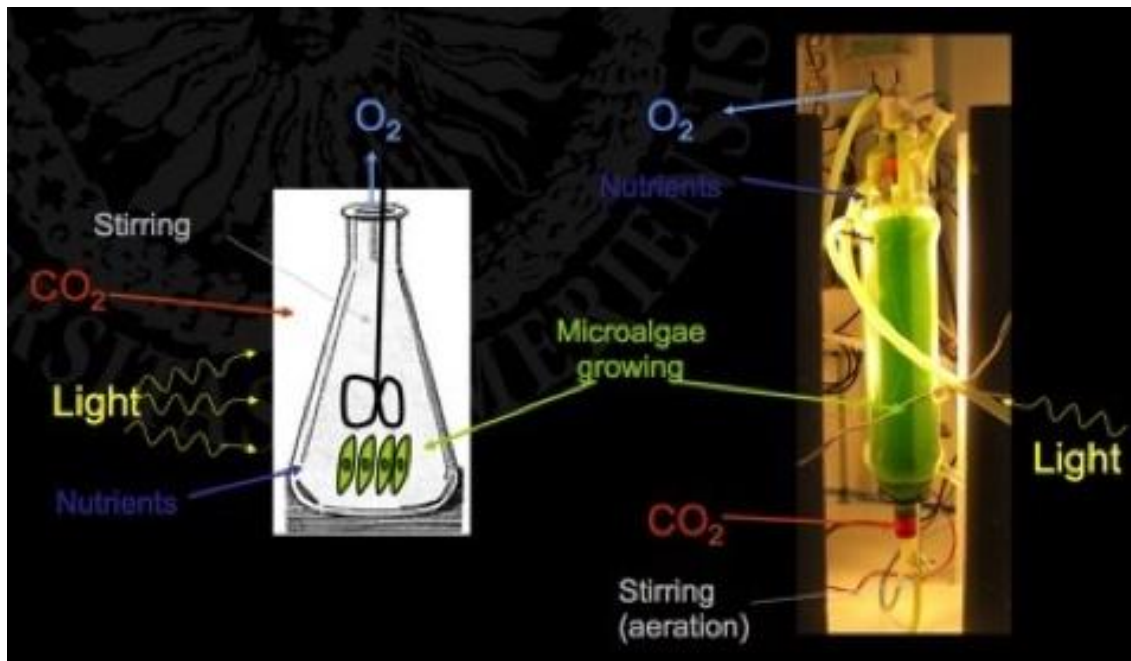


Figura 12. Factores a controlar en un sistema de cultivo [11]

3.3.5.1. Luz

Uno de los factores más importantes para el crecimiento de las microalgas es la intensidad lumínica. El sistema de cultivo ha de estar permanentemente recibiendo intensidad lumínica. La iluminación puede provenir de luz artificial, luz solar o ambas.

Para que se produzca el crecimiento de las microalgas de forma eficiente, la longitud de onda de la radiación que llega al medio ha de estar entre los 350 i los 700 nm. La radiación comprendida entre estas longitudes de onda se conoce como radiación fotosintéticamente activa y corresponde a un aprovechamiento del 42 % de la radiación incidente total.

La intensidad de la luz determina la tasa específica de crecimiento de las microalgas.

Cuando el cultivo se encuentra en la situación de no limitación por nutrientes, el crecimiento de las microalgas se incrementa con el aumento de la intensidad lumínica, hasta alcanzar la máxima tasa de crecimiento. Una vez pasado este punto, se alcanza el punto de fotoinhibición, que implica la disminución de la tasa de crecimiento.

3.3.5.2. Temperatura

La producción de las microalgas aumenta proporcionalmente con la temperatura hasta llegar a un valor óptimo de crecimiento. La temperatura óptima de crecimiento, varía de una especie a otra. En términos generales esta temperatura se encuentra entre los 20°C y los 30°C.

En los sistemas de cultivo cerrados es sencillo controlar la temperatura por varios mecanismos. Algunos de estos mecanismos son rociadores de agua, inmersión del colector solar en piscinas y fotobiorreactor dentro de invernadero. En los sistemas de cultivo abiertos es más complicado controlar la temperatura, aunque existen algunas técnicas como cubrir los estanques con plásticos transparentes.

3.3.5.3. pH

Igual que con los otros parámetros, cada especie necesita un rango específico de pH distinto para un crecimiento óptimo. Aun así, el rango de pH para la mayoría de los cultivos se encuentra entre 7 y 9. Fuera de este rango existirá un descenso en la productividad.

Para mantener un nivel de pH cercano al óptimo en el cultivo se realiza con la aeración de aire enriquecido en CO₂ o con la adición de un ácido o base. En el caso de cultivos de alta densidad celular, la adición de CO₂ corrige el incremento del pH.

3.3.5.4. CO₂

Para que se produzca el crecimiento de las microalgas, es necesario que en el medio se encuentre una fuente de carbono inorgánico. El carbono constituye cerca del 50 % de la biomasa de la microalga. Por este motivo, al realizar la fotosíntesis es el componente que limita el crecimiento celular.

El CO₂ es la fuente de carbono más común en los cultivos de microalgas. Hay que tener en cuenta que el CO₂ también repercute en los niveles de pH. Al introducir CO₂ al sistema de cultivo, el pH disminuye y, por lo tanto, el sistema se desvía de las condiciones óptimas de crecimiento. Por lo tanto, hay que buscar un equilibrio entre el nivel de CO₂ adecuado para el sistema y el nivel de pH necesario.

3.3.5.5. Nutrientes

Para que las microalgas puedan crecer, es necesario que se encuentren en un medio con nutrientes de disolución. Los nutrientes fundamentales para el crecimiento de las microalgas son el carbono, el nitrógeno y el fósforo.

El nitrógeno es el segundo nutriente más importante, por detrás del carbono, para el crecimiento de las microalgas. Se suele introducir como nitrato o amonio. Se suele utilizar para regular el contenido de lípido en las microalgas.

El fósforo, también, es fundamental en muchos procesos celulares, como son la formación de ácidos nucleicos y la transferencia de energía. La falta de fósforo en el medio de cultivo es una de las principales limitaciones al crecimiento.

3.3.5.6. Agua

La presencia de agua en el medio es un factor limitante para la reacción de fotosíntesis de las microalgas.

Es un factor importante ya que será el medio de cultivo donde crecerán y se desarrollarán las microalgas.

3.3.5.7. Oxígeno disuelto

La fotosíntesis realizada por las microalgas en los sistemas de cultivo provoca un aumento en los niveles de oxígeno disuelto a niveles de saturación en el medio. Estos niveles altos de oxígeno disuelto provocan una disminución de la productividad de las microalgas.

Las microalgas para respirar necesitan tanto CO₂ como oxígeno, pero los niveles de oxígeno se deben de controlar para que no sean excesivamente altos.

El contenido de materia orgánica en el medio es un factor que determina la cantidad de oxígeno disuelto que hay en este. Cuánta más materia orgánica se encuentre en el medio, menos oxígeno disuelto hay.

3.3.5.8. Agitación

Un factor importante a controlar es la agitación del fotobiorreactor. La agitación se debe de realizar de forma eficiente para así producir una dispersión uniforme de las microalgas en el medio de cultivo para así eliminar los gradientes de concentración de luz, nutrientes y temperatura.

El principal problema a la hora de realizar la agitación en el cultivo de microalgas es el daño celular causado por el esfuerzo cortante. Una agitación excesiva provocará turbulencia, que puede originar daños en la estructura celular y afectar al crecimiento y a la producción de metabolitos. Por otro lado, una agitación insuficiente puede provocar sedimentación y muerte celular.

3.4. Teoría 4: Fotobiorreactores y sistemas de cultivo

Los fotobiorreactores son dispositivos que utilizan la luz como fuente de energía para cultivar microorganismos fototróficos. Estos organismos utilizan la fotosíntesis para generar biomasa a partir de la luz y el CO₂. En este caso concreto se utilizarán para el cultivo de microalgas.

Los fotobiorreactores han de mantener un medio de cultivo estable, controlando parámetros como temperatura, pH y concentración de oxígeno entre otros; y proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento.

Dependiendo de las condiciones del cultivo y del control que se quiera tener sobre estas, existen dos sistemas de cultivo distintos: sistemas abiertos y sistemas cerrados.

3.4.1. Sistemas abiertos

En los sistemas de cultivo abiertos, el cultivo está en contacto con la atmosfera. Tienen una productividad baja debido a la inexistencia de control en las condiciones del cultivo como la temperatura o el pH. Una consecuencia de estar abiertos es que son susceptibles a que otros microorganismos invadan el medio de cultivo, por lo que son adecuados para especies robustas y de rápido crecimiento.

Aunque no se puedan controlar las condiciones de cultivo y sean vulnerables a invasiones por microorganismos externos, estos sistemas de cultivo son los más comunes y de los cuales provienen la mayoría de las microalgas. Sus principales ventajas son que es fácil y económico de construirlos en grandes volúmenes.

Como ventajas de estos sistemas de cultivo tendríamos el bajo coste de construcción y operacional.

Como desventajas tendríamos la baja productividad, necesidad de grandes superficies de cultivo, falta real de control de cultivo, riesgo de contaminación del medio de cultivo, complejo control de la temperatura, dificultad de mezclado eficiente y limitación de la luz en capas inferiores.

Entre los de sistemas de cultivo abiertos se diferencian los *open ponds* (balsas al aire libre) y los *raceway* (canales de acuicultura).

3.4.1.1. Open ponds

Son balsas de dimensiones diversas en las cuales se encuentra el medio de cultivo adecuado con los nutrientes necesarios y donde crecen las microalgas.

El proceso es muy económico ya que no se controlan ni modifican los parámetros que afectan al crecimiento, por lo que apenas hay costes operacionales. Por el contrario, la productividad de estos sistemas por unidad de superficie y la concentración de biomasa son muy bajas.



Figura 13. Sistema de cultivo Open ponds [17]

Las especies de microalgas más adecuadas para crecer en este tipo de sistemas, son las que son capaces de sobrevivir en situaciones extremas. En estos casos se aumenta la salinidad para que así no proliferen otras especies. Un ejemplo es la *Dunaliella salina*.

3.4.1.2. Raceway ponds

Los sistema de cultivo *raceway ponds*, son sistemas más sofisticado ya que incorporan de sistemas de agitación y mezcla.



Figura 14. Sistema de cultivo raceway ponds [41]

Estos canales suelen ser de hormigón ovalados y de profundidad entre 15 y 20 centímetros en forma de circuito cerrado, donde el cultivo se recircula y se mezcla para favorecer el crecimiento y la productividad de las microalgas.

Debida a la poca profundidad de los canales, permite a las microalgas obtener CO_2 de forma más eficiente para así satisfacer las necesidades de crecimiento.

También pueden suministrar CO_2 al cultivo a partir de unos difusores instalados en el fondo del estanque, por lo que se puede controlar el nivel de pH.

3.4.1.3. Tanques circulares

Este sistema presenta algunas desventajas como la ineficiente utilización del terreno, el coste elevado de las construcciones de hormigón y el alto consumo de energía.

La agitación en este tipo de sistemas de cultivo se realiza mediante una pala que gira recorriendo todo el depósito.



Figura 15. Sistema de cultivo de tanques circulares [16]

3.4.2. Sistemas cerrados

Los sistemas cerrados mantienen el cultivo totalmente aislado del ambiente exterior, por lo tanto, el medio que se encuentra en el interior no está en contacto con la atmosfera. Este aislamiento del medio externo supone una reducción total de la contaminación e invasión de especies externas, un mayor control en las condiciones de cultivo y una mayor rentabilidad.

Estos equipos incorporan sistemas de agitación, aireación, control de pH, intercambiadores de calor, adición de medio y CO₂.

Normalmente, son equipos muy especializados, que se diseñan específicamente para producir una especie en concreto.

Como ventajas en este tipo de sistemas de cultivo tenemos una alta productividad, la posibilidad de producir de forma continua, tener un control total del crecimiento de las microalgas y una amplia área iluminada.

Como desventajas, tendríamos el mayor coste de inversión en comparación con los sistemas abiertos, mayor complejidad técnica i constructiva, dificultad de tratar las acumulaciones de O₂ y problemas de estrés hidrodinámico.

Existen tres tipos de fotobiorreactores para sistemas de cultivo cerrados: fotobiorreactores de columnas, fotobiorreactores de placas planas y fotobiorreactores tubulares.

3.4.2.1. Fotobiorreactor de columna

Este tipo de fotobiorreactores cerrados, también conocidos como *airlift* consisten en una columna vertical de burbujeo construida con un material transparente, con un diámetro comprendido entre los 5 y los 50 centímetros, y de altura entre 1 y 3 metros.

Dentro de la categoría de fotobiorreactores cerrados, las columnas son fáciles de construir ya que gracias a su forma cilíndrica la luz se puede distribuir de forma más eficiente y se soporta bien la presión en la base.

Para realizar la agitación, se burbujea aire desde el fondo. A través de esta corriente de aireación se produce la retirada del O₂ y el aporte de CO₂.



Figura 16. Fotobiorreactor de columna [42]

Son compactos y de bajo coste, además, tienen facilidad de esterilizar y operar monosépticamente.

El principal problema de los fotobiorreactores tipo *airlift* es el escalado. Son difíciles de construir en grandes volúmenes, ya que al aumentar el diámetro se aumenta rápidamente el volumen oscuro, disminuyendo la productividad. Tampoco es posible hacerlas muy altas ya que provoca un aumento en la presión en la base que dificulta el burbujeo y causa estrés hidrodinámico.

Por su posición vertical no son buenas captadoras de luz, ya que absorben menos radiación que los horizontales.

Como ventajas de este tipo de fotobiorreactores tendríamos la baja acumulación de oxígeno, facilidad de esterilizar y el elevado control de parámetros de operación. En contra, como desventajas tendríamos el descenso de la radiación solar incidente y la limitada relación superficie/volumen.

3.4.2.2. Fotobiorreactor de placas planas

Los reactores de placas planas, también conocidos como *Flat Plat Reactors* tienen un diseño simple que busca un uso eficiente de la luz.

Este tipo de fotobiorreactores están formados por dos láminas de materiales transparentes, generalmente de plástico, entre las que se agita el cultivo mediante sistemas mecánicos o neumáticos.



Figura 16. Fotobiorreactor de placas planas [43]

La introducción de CO₂ se realiza por la parte inferior del panel para así poder asegurar que tenga suficiente tiempo para interactuar con las algas.

El espacio entre las láminas está comprendido entre 1 y 20 centímetros, de altura pueden llegar hasta los 2 metros.

Como ventaja de este tipo de fotobiorreactores, está la de posibilitar grandes superficies de cultivo expuestas a la luz por unidad de superficie de terreno. Las concentraciones de O₂ disuelto son bajas y las eficiencias fotosintéticas que se alcanzan son altas. También, se tiene como ventajas la alta productividad y una distribución uniforme de la luz.

Por el contrario estaría la dificultad de mantener las turbulencias adecuadas. Además, existe una gran dificultad en el escalado y la dificultad de poder controlar la temperatura y riesgo de estrés hidrodinámico en ciertas especies.

3.4.2.3. Fotobiorreactor tubular

Este tipo de fotobiorreactores son los más sofisticados y especializados, aunque también, son los más caros de construir. Son los más adecuados para los cultivos ubicados en el exterior, ya que tienen una alta relación entre el área iluminada y el volumen del reactor.

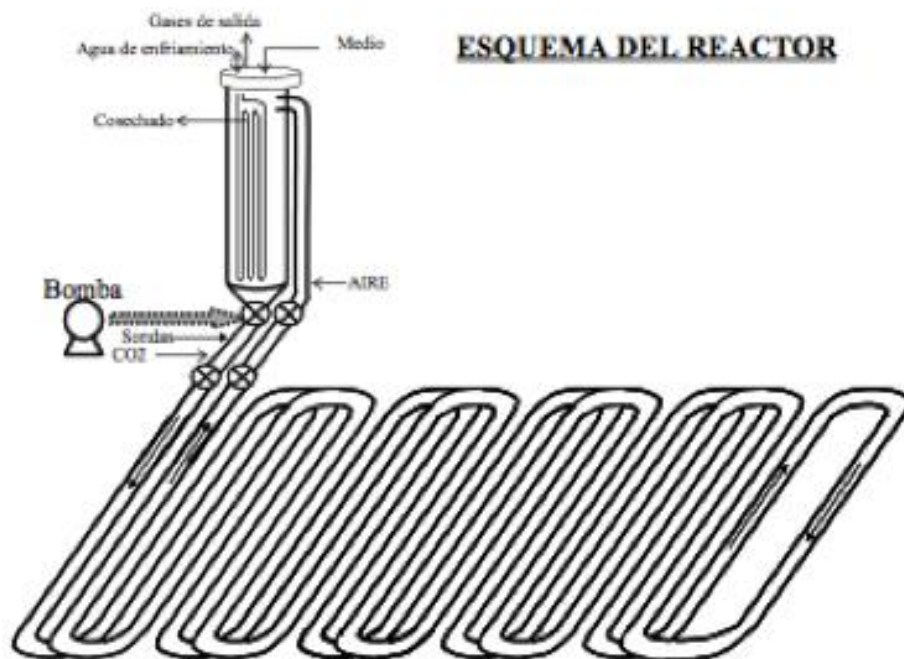


Figura 17. Fotobiorreactor tubular [11]

La transferencia de materia y el grado de agitación en este tipo de fotobiorreactores son limitados, esto provoca que se produzcan altas concentraciones de O₂. También existen problemas de fotoinhibición, ya que si no hay un buen grado de mezcla las células de la superficie reciben grandes cantidades de luz, mientras que las que están situadas en el interior no les llega la suficiente.

En el diseño se distinguen dos partes: el lazo y el desgasificador.

- **Lazo:** es la parte en la que se produce la captación de la energía solar. Esta específicamente diseñado para la captación de la luz, sin tener en cuenta los intercambios de calor o materia, esto permite optimizar la productividad maximizando la eficiencia fotosintética.
- **Desgasificador:** en esta parte es donde se produce el intercambio de materia, en concreto, la desorción de O_2 y los intercambios térmicos a través de intercambiadores de calor.

Como ventajas de este tipo de fotobiorreactores tenemos la alta relación superficie iluminada por volumen de reactor, la elevada productividad y que sea un sistema altamente compacto. Por el contrario, como desventajas tenemos la acumulación de O_2 , la elevada necesidad de potencia de bombeo y la complejidad en el diseño.

3.4.3. Comparación de los sistemas de cultivo

En la siguiente tabla se comparan los distintos tipos de cultivo vistos.

Parámetro	Abiertos	Cerrados
Coste de inversión/mantenimiento	Bajo	Alto
Coste de consumo energético	Bajo	Alto
Coste de recolección de la biomasa	Alto	Bajo
Tecnología asociada	Sencilla	Compleja
Riesgo de contaminación	Alto	Bajo
Riesgo de estrés hidrodinámico	Bajo	Moderado
Control de parámetros del proceso	Difícil	Fácil
Eficiencia de la fotosíntesis	Moderada	Alta
Capacidad fijación de CO_2	Moderada	Alta
Productividad	Moderada	Alta
Escalado	Fácil	Difícil
Optimización del proceso	Limitada	Posible

Figura 18. Tabla comparativa tipos de cultivo [26]

3.4.4. Modo de operación y cultivo

El modo de operación de un sistema de cultivo es el modo de operar del fotobiorreactor. Éste influye en el diseño propio del reactor y, también, en el modelo cinético de crecimiento del cultivo y en el proceso de producción. Existen tres modos de cultivo aunados a tres modos básicos de producción: discontinuo, semicontinuo y continuo [7][17]:

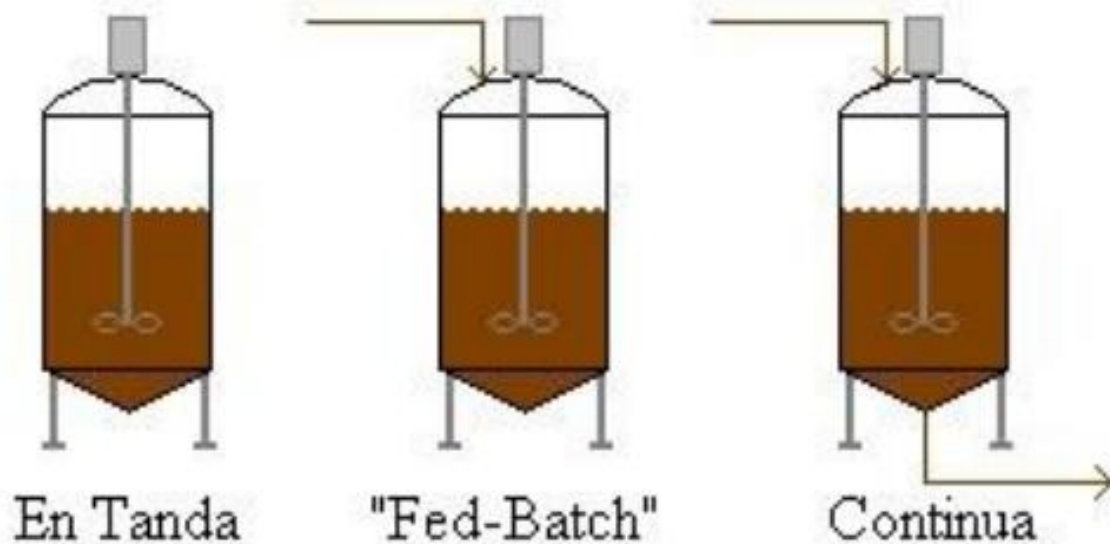


Figura 19. Modos de operación [7]

3.4.4.1. Discontinuo (batch)

Este modo de operación se caracteriza por realizarse en lotes o tandas. La fermentación se desarrolla en un sistema cerrado y sin alimentación. Se coloca dentro del fotobiorreactor la carga total del proceso de cultivo o fermentación y se deja el tiempo necesario para que se lleve a cabo el proceso productivo. No hay entrada ni salida de medio de cultivo. A estos reactores se les carga una vez de forma total o por intervalos durante varios días y se descarga todo el producto al final de la operación. [18][19]

En este modo de cultivo se pueden distinguir las siguientes fases:

Fase I: Fase de latencia. También conocida como fase lag o de adaptación, durante esta fase no hay crecimiento microbiano aunque hay metabolismo activo. Se producen las enzimas necesarias para que la población bacteriana pueda crecer. Es una fase de adaptación al medio.

Fase II: Fase exponencial. Durante esta fase hay una duplicación celular de manera acelerada. Bajo condiciones apropiadas la velocidad de crecimiento es máxima. Al tiempo en que una célula se duplica se le conoce como tiempo de duplicación o regeneración. En esta fase se produce un crecimiento a la máxima velocidad específica, esto es posible al no haber limitación de nutrientes.

Fase III: Fase línea (ralentización). Esta fase tiene lugar cuando aparece un nutriente que llega a ser limitante. Si el nutriente limitante llega en forma continua (como pasa con la luz en el caso de las microalgas) se observa una fase lineal.

Fase IV: Fase estacionaria. Durante esta fase la velocidad de división celular decrece hasta tal punto que las nuevas células son producidas al mismo ritmo de al que mueren las células viejas. Por lo tanto, el número de células es constante. Las condiciones, en esta fase, se vuelven tan limitantes que $\mu_{bruta}=m$ y, por lo tanto, $\mu_{neta}=0$.

Fase V: Fase de muerte celular. Durante esta fase ya no es posible la división celular, las células mueren y la población decrece exponencialmente. Esto se debe por la acumulación de tóxicos en el medio o la falta de sustrato.

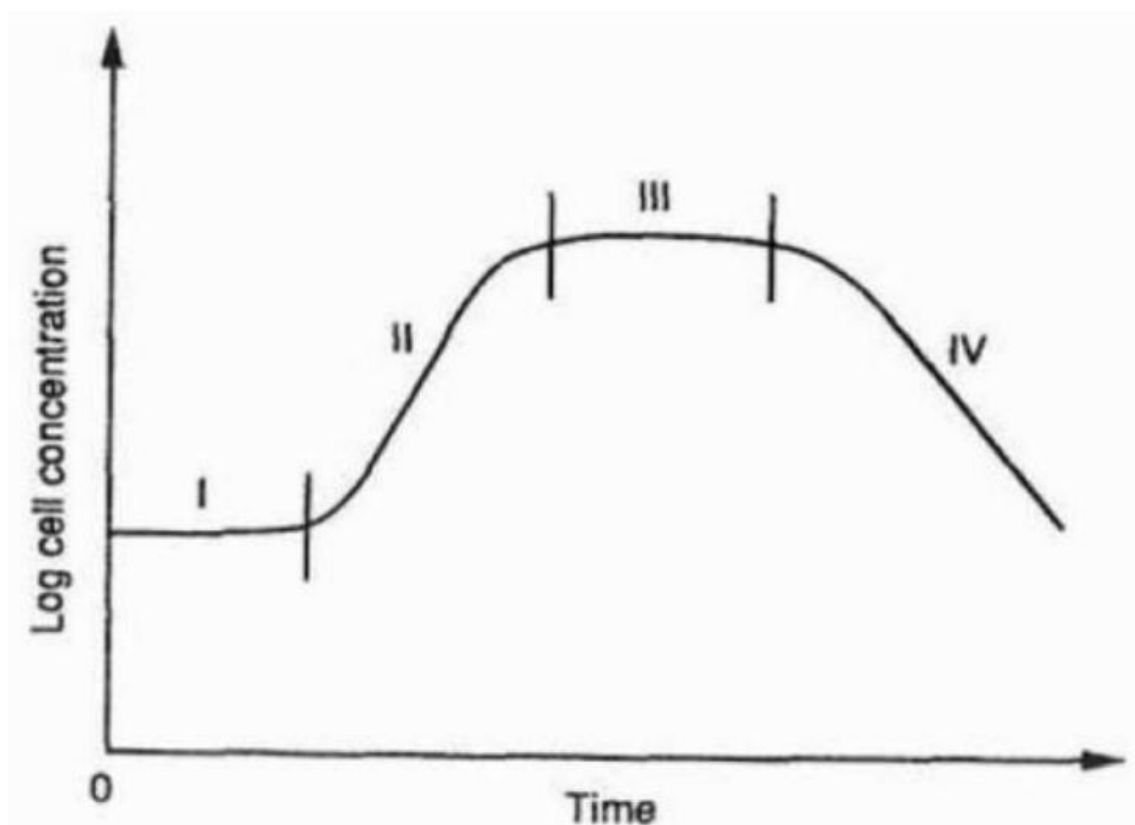


Figura 20. Fases de crecimiento celular [7]

Como **ventajas** de este modo de cultivo tenemos:

- Bueno para pequeños volúmenes de producción.
- Procesamiento de una gran variedad de sustratos.
- Inversión inicial baja.
- Fácil de parar y limpiar.
- Admite cargas secas y con alta humedad.
- Trabajo en ciclos para una operación menos personalizada.

Como **desventajas** de este modo de cultivo tenemos:

- La carga y descarga requiere de una mayor operación de manera personalizada.
- Tiempo de parada entre cargas.
- Coste de operación alto.
- Requiere un control del proceso.
- Uniformidad de producto difícil de conseguir.

3.4.4.2. Semicontinuo (batch alimentado)

Se caracteriza por realizarse en lotes alimentados, con alimentación de entrada. Se alimenta para que el sistema de cultivo tenga un producto con el máximo crecimiento posible y se incremente la productividad.

Este tipo de operación es muy útil cuando se requiere una gran densidad celular en la etapa de iniciación del proceso en la cual hay un alto consumo de nutrientes.

Consiste en remover, al final de la operación entre un 80 y 90 % del cultivo y reemplazarlo por medio fresco.

De esta forma, se puede satisfacer la necesidad de contar con inóculos de gran tamaño sin tener que realizar la esterilización del fotobiorreactor entre dos ciclos. [19]

3.4.4.3. Continuo

En este modo de operación se alimenta una línea de entrada y se drena con una línea de salida. Los flujos de entrada y salida son iguales y la producción es continua. Se utiliza en cultivos donde la velocidad de crecimiento celular es constante, por lo que hay un suministro constante de nutrientes y a la vez una remoción constante de producto. [19]

Como **ventajas** de este modo de cultivo tenemos:

- Ideal cuando se requiere una velocidad de crecimiento celular constante.
- Bueno para producciones indefinidas de producto.
- No requiere de tiempo entre ciclos.
- Coste de operación relativamente bajo.
- Uniformidad de producto más fácil de conseguir.

Como **desventajas** de este modo de cultivo tenemos:

- Requiere inversión alta.
- Las paradas provocadas por mantenimiento pueden ser costosas.
- Cuesta mantener las condiciones asépticas en el proceso.

3.5. Teoría 5: Interacción de las microalgas con la luz

La luz es el nutriente que proporciona la energía a las microalgas para que así se pueda llevar a cabo la generación de nueva biomasa; es, por tanto, el motor del crecimiento. La luz, además, es siempre el nutriente limitante en un fotobiorreactor, ya que los demás nutrientes se pueden añadir en exceso. En cambio, la luz es limitada y normalmente existe la dificultad de hacerla penetrar en el fotobiorreactor. [11]

3.5.1. Cultivos ópticamente densos

Las microalgas absorben la luz de forma muy intensa. La intensidad de la luz se puede calcular a partir de la ley de Lambert Beer a partir de un coeficiente de extinción k_a del orden de $0,5\text{m}^2/\text{g}$:

$$I = I_0 \cdot e^{-k_a \cdot C_b \cdot x}$$

Ec. 10

Dónde los términos de la ecuación serían:

I: intensidad de la luz

I_0 : intensidad de la luz incidente

K_a : coeficiente de extinción

x: distancia a la superficie

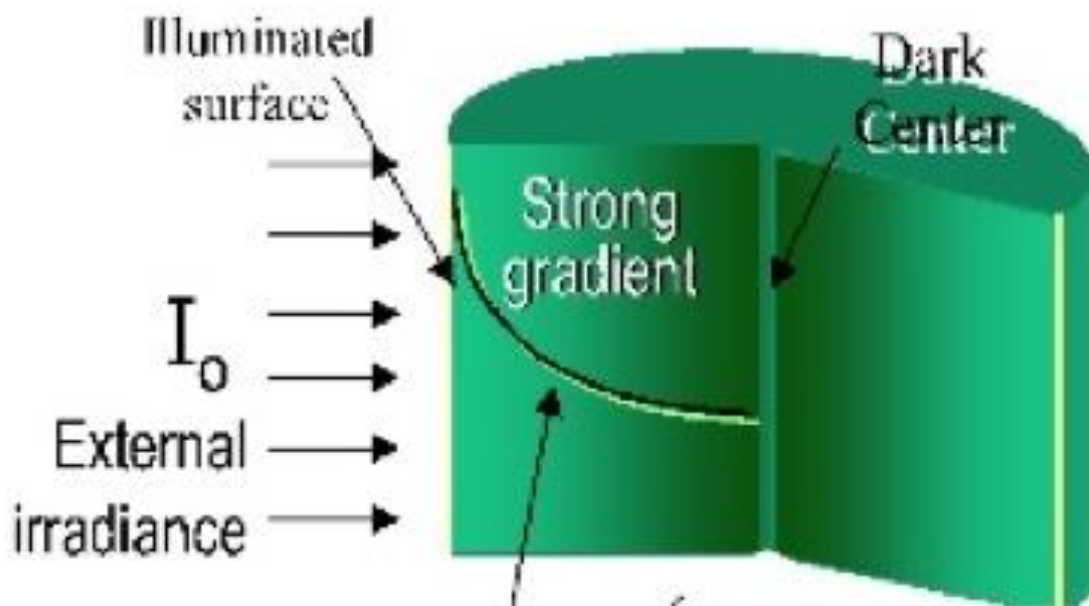


Figura 21. Superficie iluminada [11]

A partir de la ecuación anterior, se puede comprobar que aun en zonas donde la intensidad de luz incidente sea muy elevada, la luz sigue siendo un factor limitante. Esto es debido a que se producen zonas oscuras en el interior de los cultivos y, en promedio, el volumen del fotobiorreactor esta oscuro.

Los cultivos donde ocurre este fenómeno se conocen como cultivos densos. Se producen grandes gradientes espaciales de iluminación, es decir, coexisten zonas muy iluminadas con zonas oscuras. Esta situación es inevitable cuando se utiliza luz solar.

3.5.2. Capacidad fotosintética de la biomasa

Para poder averiguar la mínima concentración de biomasa necesaria en el cultivo para poder metabolizar la radiación que llega se va a realizar el siguiente balance de fotones. El balance sería:

$$\begin{aligned} & \text{moles de fotones metabolizados por unidad de area y tiempo} \\ & = \text{moles de fotones que llegan} \end{aligned}$$

$$\frac{C_b \cdot \mu_{max} \cdot a}{\Psi_b} = I_o$$

Ec. 11

Dónde los términos de la ecuación serían:

C_b : concentración de biomasa

μ_{max} : velocidad específica de crecimiento máxima

a : relación superficie volumen

De la anterior ecuación se podría despejar la concentración de biomasa mínima para poder metabolizar una dada.

La expresión para calcular la concentración de biomasa mínima sería:

$$C_{bmin} = \frac{I_o \cdot \Psi_b}{\mu_{max} \cdot a}$$

Ec. 12

Se podría definir como concentración areal al producto de la concentración de biomasa y la relación superficie volumen. En la siguiente ecuación se puede observar la expresión para el cálculo de la concentración areal:

$$C_a = C_b \cdot a$$

Ec. 13

Las unidades de la concentración areal (C_a) serían g de biomasa por m² de suelo ocupado.

$$C_a = \frac{I_o \cdot \Psi_b}{\mu_{max}}$$

Ec. 14

4. Materiales y equipo

El alcance de este trabajo es el diseño de un fotobiorreactor de forma teórica. Por este motivo, no se ha realizado ningún ensayo en laboratorios de química ni se ha usado ningún equipo en estos.

Las fuentes de información consultadas han sido estudios científicos, ingenieriles, apuntes de asignaturas relacionadas con el tema tratado, tanto impartidas en esta universidad como de otras universidades, libros y revistas científicos y, también, varias páginas web.

Para realizar el diseño de los planos del fotobiorreactor se ha utilizado soporte informático, así como el programa SolidWorks® de diseño CAD para el modelaje en 2D y 3D.

Además se ha utilizado programario básico de ofimática para la redacción de la memoria y la realización del escandallo.

5. Resultados

5.1. Elección del fotobiorreactor: *Air-lift*

5.1.1. Elección del fermentador

Después de haber descrito y analizado los tipos de fotobiorreactores que se utilizan hoy en día y los diferentes modos de operación, para realizar el diseño del fotobiorreactor para cultivar microalgas se ha considerado que la mejor alternativa es un **fotobiorreactor que trabajará por lotes tipo *Air-lift***. [25] [26]

Una de las principales ventajas que presentan los fotobiorreactores tipo *Airlift* frente a otro tipo de fotobiorreactores es que el hecho de no existir un sistema de agitación directa se mantiene la esterilidad del medio más fácilmente. Además, el sistema de agitación por aireación mejora el transporte de nutrientes a las células y una radiación homogénea en todo el cultivo. También, este tipo de fotobiorreactores son más sencillos de controlar y tienen una recolección de la luz media y transferencia de gas altas. Existe una relación superficie-volumen alta y un mezclado uniforme. Esto permite una mayor concentración de la biomasa.

Las ventajas enumeradas anteriormente provocan que exista una mayor productividad en el proceso al utilizar este tipo de fotobiorreactor.

El fotobiorreactor que se diseña en el presente trabajo está orientado para trabajar en el laboratorio, por lo tanto, no tendrá que abastecer grandes volúmenes de producción. Por este motivo se ha desestimado un método de producción continua.

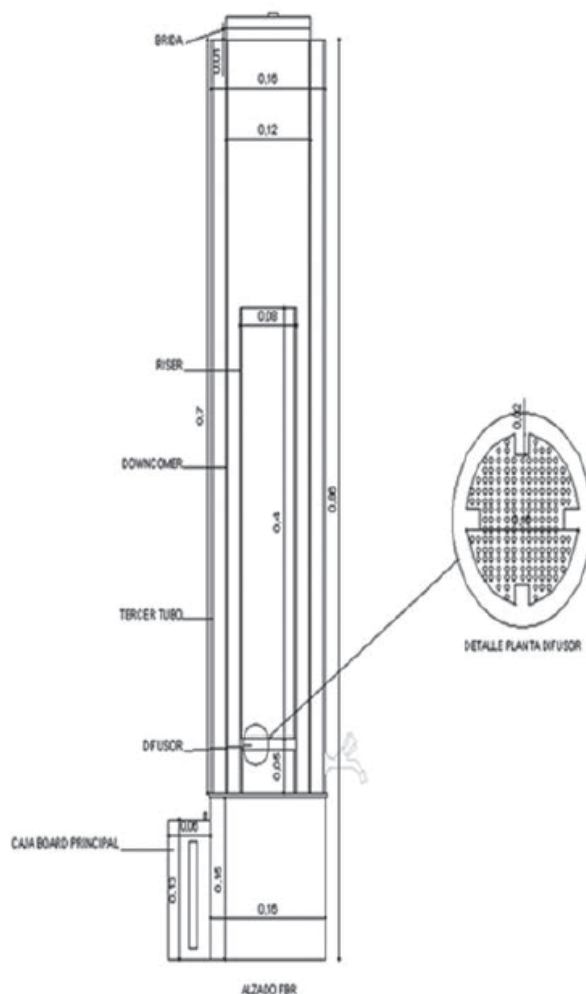


Figura 22. Esquema de un fotobiorreactor *Air-lift* [22]

5.1.2. Descripción de fotobiorreactor tipo *Airlift*

Este tipo de fotobiorreactores, la mezcla del medio se realiza sin ningún tipo de agitación mecánica. El sistema de aireación es el encargado de realizar la mezcla, haciendo un movimiento continuo del medio. Esta aireación se produce introduciendo un gas (generalmente aire o aire enriquecido con CO₂) por la parte inferior del dispositivo.

El diseño de este tipo de fotobiorreactores consta con 2 tubos concéntricos. El cilindro interior, también conocido como *riser*, permite canalizar el flujo de aire y por lo tanto la mezcla gas-líquido, generándose así el flujo ascendente. Por otro lado, el cilindro externo, también conocido como *downcomer*, genera un espacio para que el líquido pueda descender posteriormente de haberse desgasificado. Además, los procesos de transferencia de luz y transferencia de masa se dan de forma separada en los fotobiorreactores tipo *Airlift*.

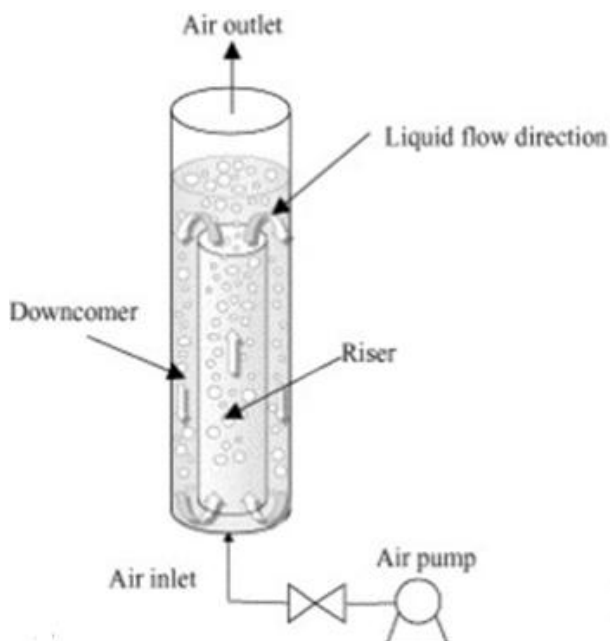


Figura 23. Esquema de un fotobiorreactor tipo *Airlift* [26]

Existen diferentes tipos de configuraciones del riser i downcomer que provocan distintos tipos de reactores *Airlift*.

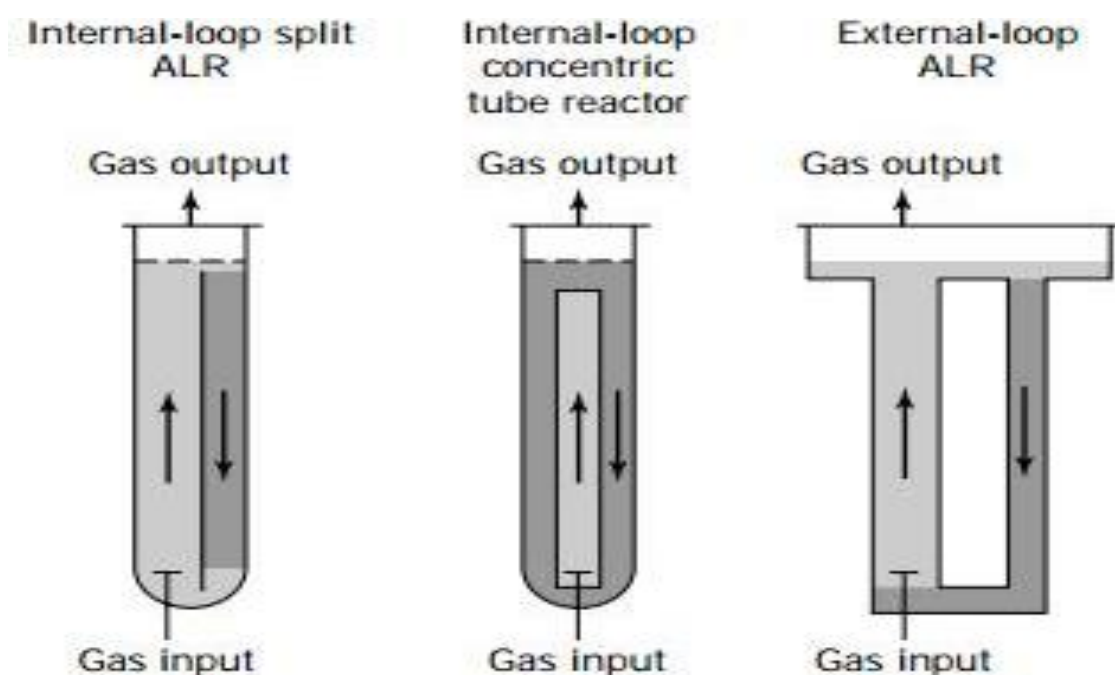


Figura 24. Tipos de fotobiorreactores *Airlift* en función del loop. [25]

5.2. Condiciones del fotobiorreactor

5.2.1. Producción

Según los estudios consultados para la realización de este trabajo. Se ha establecido que según las condiciones consideradas que se detallaran a continuación se podrá producir una cantidad de $4,25 \cdot 10^5$ células de microalga por mililitro de cultivo (**$4,25 \cdot 10^5$ cel/ml**), en **6 días de cultivo**. En total, contemplando la limpieza del fotobiorreactor se estima en 7 días. [31][32][33]

5.2.2. Luz

La iluminación es uno de los parámetros claves a controlar en el cultivo para así poder obtener los resultados óptimos al final de este. El ciclo de luz que recibirá el cultivo será el ciclo circadiano, lo que viene a ser **12 horas de luz y 12 horas de oscuridad** para así poder realizar el proceso de la fotosíntesis correctamente. [31][32][33]

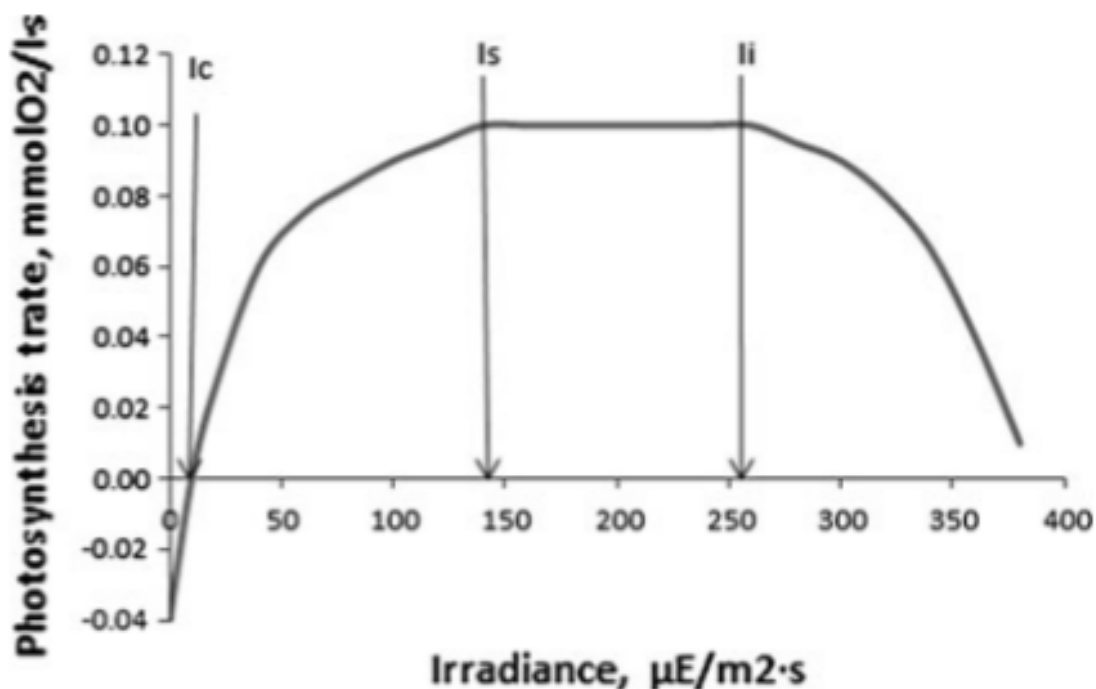


Figura 25. Relación entre ratio fotosintético y la irradiancia [32]

Según los estudios consultados en la bibliografía de este trabajo, la intensidad lumínica para que la fotosíntesis sea óptima ha de estar entre $150 \mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ y $250 \mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$. Se ha escogido un valor medio de **$250 \mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$** .

5.2.3. Temperatura

Según la bibliografía consultada para realizar este trabajo, en diferentes estudios se establece un rango de temperatura para el crecimiento de las microalgas bastante holgado.

Se ha acotado este rango **entre los 20°C y los 30°C**. Se ha escogido un rango holgado debido a que las microalgas tienen la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones manteniendo un rendimiento de crecimiento elevado. [31][32][33]

5.2.4. pH

El cultivo se realizará en un medio con **pH entre 7 y 9**. Las microalgas tienen la capacidad de adaptarse a medios extremos, por lo tanto se ha dejado un rango de pH de validez para que se produzca el cultivo. [31][32][33]

5.2.5. Aireación

En este tipo de sistemas, la incorporación de aire o aire enriquecido con CO₂ ha de estar comprendida entre un rango de 0,5 y 2,5 vvm según la bibliografía consultada.

En este caso, se ha considerado un valor de **2 vvm** para así asegurar la correcta recirculación del fluido y que pueda llegar a todos los rincones del fotobiorreactor y que la composición del aire sea constante durante el cultivo. [31][32][33]

5.3. Parámetros de diseño

Una vez se han detallado las condiciones en las cuales se llevará a cabo el cultivo de las microalgas se procederá a detallar los detalles del diseño para poder definir el fotobiorreactor.

En este punto se detallará la capacidad de producción para cumplir con los objetivos detallados al principio de la memoria. A partir de esta capacidad se podrá detallar el volumen del fotobiorreactor y las dimensiones de este. Se definirán los sistemas para poder controlar las condiciones en las cuales se produce el cultivo. Finalmente se detallaran los detalles de los puertos, sistemas de iluminación y otros elementos agregados para que así pueda llevarse a cabo la fermentación.

5.3.1. Capacidad de producción

Según los objetivos del trabajo definidos al inicio de la memoria, se ha establecido una necesidad de producir **30 kg/año** de *Dinoflagellate luciferina*. Como ya se ha mencionado anteriormente, el diseño del fotobiorreactor se hará para una planta piloto, por lo que las dimensiones serán las adecuadas para que se pueda ubicar en un laboratorio de química. Por esta razón, la altura del fotobiorreactor no podrá superar los 2 o 2,5 metros de alto ya que es la altura habitual de las estancias.

La planta piloto trabajará durante **45 semanas al año**, por lo tanto, la producción semanal será de:

$$P_{semanal} = 30\,000 \frac{g\ DFL}{año} \cdot \frac{1\ año}{45\ semanas} = 666,67 \frac{g\ DFL}{semana}$$

Ec. 15

El tiempo de cultivo de las microalgas según la bibliografía consultada es de 6 días. Por lo tanto, se producirá un cultivo por semana.

$$P_{por\ proceso} = 666,67 \frac{g\ DFL}{semana} \cdot \frac{1\ semana}{1\ proceso\ de\ cultivo} = 666,67 \frac{g\ DFL}{proceso\ de\ cultivo}$$

Ec. 16

5.3.2. Parámetros de forma

Según el tipo de fotobiorreactor, los parámetros de forma cambian ya que estos son característicos para cada tipo de fotobiorreactor. Los parámetros de forma relacionan las medidas básicas del fotobiorreactor. Para los fotobiorreactores tipo *Air-lift*, la relación entre los parámetros de forma se recogen en la siguiente tabla. [22]

Descripción	Relación	Valores típicos	Valor escogido
Diámetro del riser en relación con el diámetro del downer	D_r / D_d	0,3 – 0,6	0,45
Altura total del equipo en relación con el diámetro del downer	H / D_d	3 – 6	4
Volúmen de operación en relación con el volumen total del equipo	V_{op} / V_T	0,7 – 0,9	0,7

Figura 26. Relación entre parámetros de forma [22]

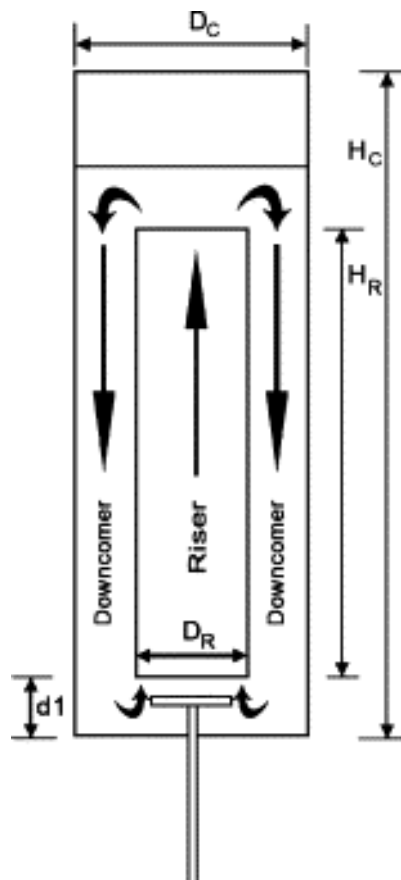


Figura 27. Parámetros de forma [22]

5.3.3. Volumen

Para hacer un cálculo de referencia del volumen necesario para poder realizar cumplir con el objetivo marcado al inicio del trabajo se deberá conocer la productividad del cultivo y la cantidad de *Dinoflagellate luciferina* que se encuentra en las microalgas. Según los estudios consultados la productividad de las microalgas en las condiciones fijadas en el apartado 6.2 es de $4,25 \cdot 10^5$ células de microalga por mililitro de cultivo ($4,25 \cdot 10^5$ cel/ml). La cantidad de *Dinoflagellate luciferina* disponible en las microalgas es del 0,05 %. Según la bibliografía consultada se ha fijado que el peso celular de las microalgas es de $80 \cdot 10^{-6}$ gramos por célula ($80 \cdot 10^{-6}$ g/cel). [31][32][33][34]

En primer lugar se va a calcular la cantidad de *Dinoflagellate luciferina* que se puede obtener por litro de cultivo:

$$\text{Cantidad DFL} = \frac{4,25 \cdot 10^5 \text{ células}}{\text{ml}} \cdot \frac{80 \cdot 10^{-6} \text{ g}}{\text{célula}} \cdot \frac{10^3 \text{ ml}}{1 \text{ l}} \cdot \frac{0,05}{100} = 17 \frac{\text{g DFL}}{\text{litro}}$$

Ec. 17

A partir de estos datos se va a proceder a calcular el volumen necesario de cultivo:

$$\text{Volumen}_{\text{útil}} = 666,67 \text{ g DFL} \cdot \frac{1 \text{ litro}}{17 \text{ g DFL}} = 39,22 \text{ litros} \approx 40 \text{ litros}$$

Ec. 18

Para cumplir con el objetivo marcado, el fotobiorreactor deberá tener como mínimo un **volumen de operación de 40 litros**. A partir de las relaciones vistas en la figura 26, el volumen total del fotobiorreactor será de:

$$V_{\text{Total}} = \frac{V_{\text{op}}}{0,7} = \frac{40 \text{ litros}}{0,7} = 57,14 \approx 60 \text{ litros}$$

Ec. 19

Así el **volumen total** del fotobiorreactor se fijará en **60 litros**. A partir de este valor se realizarán los cálculos necesarios para obtener el resto de dimensiones.

5.3.4. Geometría

La geometría del fotobiorreactor será cilíndrica, conteniendo dos cilindros concéntricos (*riser* y *downcomer*), dos tapas, una en la parte superior y otra en la inferior.

Teniendo presente que el fotobiorreactor se ubicará en un laboratorio de química, las dimensiones no pueden exceder la capacidad de este tipo de salas. Por este motivo se ha fijado la altura del *downcomer* en 1 metro.

A partir del valor de altura fijado, se procederá a calcular el valor del diámetro del *downcomer* según las relaciones descritas en la figura 26. [22]

$$\frac{H}{D_d} = 4$$

Ec. 20

Por lo tanto, el valor del diámetro del *downcomer* (D_d) será de:

$$D_d = \frac{H}{4} = 0,25 \text{ metros}$$

Ec. 21

A partir de las relaciones descritas en la figura 26, el diámetro del *riser* será de:

$$D_r = 0,45 \cdot 0,25 = 0,1125 \text{ metros}$$

Ec. 22

A partir del diámetro y la altura se puede calcular el volumen total del *downcomer*. Al ser un cilindro, el cálculo del volumen se realizará como el área de la base multiplicada por la altura. La ecuación sería la siguiente:

$$V_{Td} = \frac{\pi \cdot H \cdot D_d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 0,25^2}{4} = 0,0491 \text{ m}^3 \approx 50 \text{ litros}$$

Ec. 23

El volumen total del sistema se calculará como la suma de la base inferior, el volumen del *downcomer* i de la campana superior o desgasificador. La ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$V_T = V_b + V_d + V_{dsg}$$

Ec. 24

En este caso, el volumen de la base inferior es igual a cero, debido a que se utilizará una base plana. El volumen de la campana superior se fijará en 10 litros. Haciendo que el valor del volumen total del fotobiorreactor sea 60 litros como se ha calculado anteriormente.

Por lo tanto, según las relaciones descritas en la figura 26 el valor del volumen de operación del fotobiorreactor será de:

$$V_{op} = V_T \cdot 0,7 = 60 \cdot 0,7 = 40 \text{ litros}$$

Ec. 25

5.3.5. Aireación y agitación

Se ha considerado un valor de 2 vvm para así asegurar la correcta recirculación del fluido y que pueda llegar a todos los rincones del fotobiorreactor y que la composición del aire sea constante durante el cultivo.

A continuación se detalla el cálculo del caudal de aire necesario para así realizar la aireación del cultivo de forma correcta: [7] [22] [27]

$$Q_g = 2 \frac{l \text{ gas}}{l \text{ cultivo}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot V_F$$

Ec. 26

En la cual si se sustituye con el valor del volumen operativo del fotobiorreactor, en este caso 40 litros, quedaría:

$$Q_g = 2 \frac{l \text{ gas}}{l \text{ cultivo}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot 40 \text{ l} = 1,333 \frac{l}{s} = 80 \frac{l}{\text{min}} = 0,001333 \frac{m^3}{s}$$

Ec. 27

Por lo tanto, se necesitará un caudal de aire de **80 litros/minuto**.

Para llevar a cabo las necesidades de aireación definidas previamente, se utilizará un **difusor** de disco cerámico de **70 milímetros de diámetro**.

A continuación se va a realizar el cálculo de la potencia volumétrica para poder llevar a cabo el proceso de agitación:

En primer lugar se va a calcular la velocidad de ascenso del gas en el *riser* (V_g). Para ello se deberá conocer el área del *riser*:

$$A_r = \frac{\pi \cdot D_r^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,1125^2}{4} = 0,00994 \text{ m}^2$$

Ec. 28

Se ha de tener en cuenta que el aire inyectado no sube por toda la sección del *riser*, sino que suben las burbujas que se encuentran en el líquido. Por este motivo, se contemplará una sección eficaz del 70 % de la sección del *riser*.

A partir de los valores anteriores y conociendo el valor del caudal de aire calculado anteriormente, con la siguiente ecuación se calculará la velocidad de ascenso del gas en el *riser*:

$$V_g = \frac{Q}{A_{eficaz}} = \frac{0,0013333}{0,00994 \cdot 0,7} = 0,1916 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ec. 29

A continuación se procederá a calcular la potencia requerida por el difusor para poder realizar la aireación a la vez que la agitación del sistema. A partir de la siguiente ecuación:

$$Pot = V_T \cdot \rho \cdot g \cdot V_g = 0,050 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,1916 = 93,9902 \text{ W}$$

Ec. 30

Para poder cumplir con las necesidades requeridas por el sistema de agitación, la potencia del compresor para poder realizar la aireación y la agitación será de **200 W**.

5.3.6. Control de la temperatura

Las microalgas pueden vivir y crecer en condiciones variables, incluso extremas de temperatura. Aun así, existe un rango óptimo como se ha descrito en apartados anteriores. El crecimiento de las microalgas tiende a presentar una relación entre la velocidad de crecimiento y la temperatura del cultivo, por este motivo el sistema ha de estar controlado en todo momento para que así la temperatura no se vaya fuera del rango óptimo.

Numerosos estudios acotan el rango óptimo de crecimiento de las microalgas entre 20°C y 30°C.

La temperatura ambiente en el laboratorio oscila entre los 22°C y los 25°C, y este tipo de cultivos producen calor, se ha decidido no crear ningún sistema para modificar la temperatura en el interior del tanque.

Aun así, se utilizará una sonda para el control de la temperatura en el interior del fotobiorreactor, que se introducirá desde la parte superior del tanque mediante un puerto e irá conectado al sistema de aireación por si fuera necesario modificar la temperatura de entrada del aire con el que se produce la agitación. De esta forma se garantiza que las condiciones de temperatura dentro del tanque sean las óptimas para el crecimiento de las microalgas.



Figura 28. Sonda temperatura [44]

5.3.7. Control del pH

La mayor parte de las especies de microalgas conocidas, pueden sobrevivir en medios en los que existe un amplio margen de condiciones de pH. Esto se debe a la gran capacidad de adaptación de estas a medios extremos. Aun así, los estudios consultados acotan el rango óptimo de pH para un crecimiento de las microalgas entre 7 y 9.

Para asegurarnos de que el pH esta siempre en condiciones óptimas se colocará una sonda de pH en el interior del fotobiorreactor para que así, en caso de que el pH en el interior del tanque se encuentre fuera del rango establecido, pueda corregirse.

El sistema para modificar el pH, en el interior del tanque en caso de que este se salga del rango establecido, será mediante el sistema de aireación. Por lo tanto, la sonda del control de pH irá conectado al sistema de aireación.

Según la corrección de pH que quiera realizarse, se inyectara aire más o menos enriquecido con CO₂, para que así vuelva a estar dentro del rango óptimo. También, se podrá añadir un ácido o una base para hacer correcciones del pH en caso de que no se crea adecuado modificar el enriquecimiento en CO₂ del aire de entrada al fotobiorreactor.



Figura 29. Sonda pH [45]

5.3.8. Materiales

Un apartado clave en el diseño del fotobiorreactor es la elección de un material adecuado para la construcción. Algunas de las características que han de tener estos materiales son la alta transparencia, la flexibilidad, la durabilidad, una toxicidad nula, resistencia a productos químicos, resistencia a la intemperie y por último un bajo coste, entre otras muchas propiedades.

Para poder llevar a cabo la elección del material constructivo se ha realizado una comparación entre distintos tipos de materiales típicos considerando las principales propiedades de cada material que tendrán más influencia durante la realización del cultivo.

Los materiales que se han comparado han sido el polietileno de alta densidad, el vidrio flotado y el metacrilato.

Las propiedades que se han comparado han sido el calor específico, la conductividad térmica, la transmisión de la luz y la energía retenida en las paredes del material. [22]

Propiedad	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Vidrio flotado	Metacrilato (PMMA)
Calor específico (J/kg·K)	2940	750	1470
Conductividad térmica (W/m·K)	0,29	1	0,18
Transmisión de la luz (%)	80	90	92
Densidad (kg/m ³)	953	2500	1180
Energía retenida (MJ·kg/m)	72,8	15,9	13,5

Figura 30. Tabla comparativa materiales [22]

Comparando los datos de la tabla, se ha escogido como material el **metacrilato** (PMMA) debido a que es el material que mayor porcentaje de transmisión de la luz posee. Se ha dado la máxima importancia a esta propiedad debido a que la luz es uno de los factores clave en el crecimiento de las microalgas. Además, es un material barato y duradero, lo que alargará la vida útil del fotobiorreactor y disminuirá el coste de fabricación de este.

El material con el cual se fabricará el soporte del fotobiorreactor, es decir, el esqueleto donde estará situada la estructura de metacrilato donde se realizará el cultivo será el **acero 316 L**.

Este acero inoxidable en concreto tiene características sobresalientes contra la corrosión y resistencia a altas temperaturas.

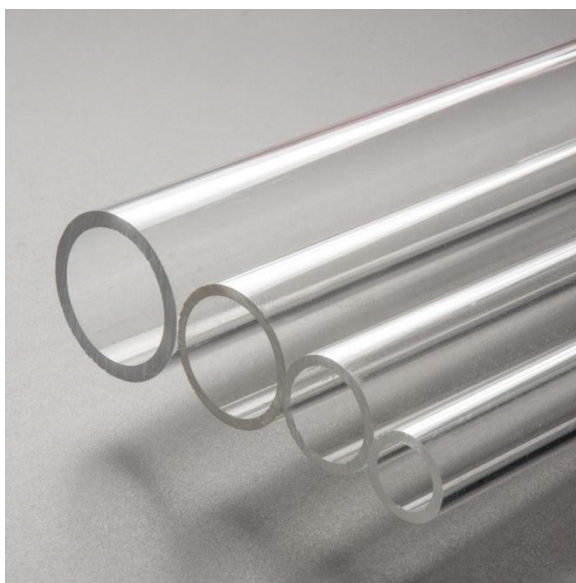


Figura 31: Tubos de metacrilato. [47]

5.3.9. Cálculo grosor de los tubos

A continuación se realizará el cálculo del grosor que deberán tener los tubos del *riser* y *downcomer* para poder soportar el volumen de cultivo que habrá en su interior. [7] [48]

A partir de la siguiente fórmula se podrá calcular el grosor del tubo necesario:

$$e = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_{adm} \cdot E_s}$$

Ec. 31

Dónde:

ρ : densidad del producto almacenado en kg/cm^3

d : nivel máximo de producto almacenado en cm

r : radio del cilindro en cm

σ_{adm} : tensión máxima admisible del material en kg/cm^2

E_s : eficiencia de soldadura según tipo de soldadura

Para el material escogido, el metacrilato, el límite elástico es de:

$$\sigma_e = 70 \text{ MPa} = 714 \frac{Kg}{cm^2}$$

Para calcular la tensión máxima admisible por el material, se usará la fórmula:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{\gamma_s}$$

Ec. 32

Dónde:

γ_s : coeficiente de seguridad

Por lo tanto, sustituyendo en la formula anterior y usando un coeficiente de seguridad de 1,5:

$$\sigma_{adm} = \frac{714}{1,5} = 476 \frac{Kg}{cm^2}$$

Usando los siguientes valores:

$$\rho = 0,001 \frac{Kg}{cm^3} ; d = 100 \text{ cm} ; r = 12,5 \text{ cm} ; \sigma_{adm} = 476 \frac{Kg}{cm^2} ; E_s = 0,6$$

El valor del coeficiente de soldadura es para el caso de soldadura en doble V y no examinada.

$$e = \frac{0,001 \cdot 100 \cdot 12,5}{476 \cdot 0,6} = 0,004377 \text{ cm}$$

Ec. 33

Por lo tanto, el espesor de la chapa del reactor deberá de ser:

$$e = 0,044 \text{ mm}$$

Por motivos de seguridad, rigidez y facilidad a la hora de fabricar el reactor, se escogerá un grosor de chapa muy superior al calculado.

Así el valor escogido para el grosor de la chapa será de **5 mm de espesor**.

5.3.10. Cálculo del soporte del fotobiorreactor

El fotobiorreactor estará soportado por 3 patas en la parte inferior, estas soportaran el peso del cultivo en su interior a la par que el peso de los componentes externos que se añadan para monitorizar el cultivo, además del propio peso del fotobiorreactor. Para conocer la sección mínima que han de tener estas patas se realizarán los siguientes cálculos: [7]

El volumen del cultivo dentro del fotobiorreactor será de:

$$V_{líquido} = 40 \text{ L}$$

Por lo tanto, la masa de cultivo dentro del reactor, teniendo en cuenta una densidad parecida a la del agua ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) será de:

$$Massa = \rho \cdot V$$

Ec. 34

Sustituyendo, tenemos:

$$Massa_{cultivo} = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,040 \text{ m}^3 = 40 \text{ kg}$$

Ec. 35



Suponiendo una masa del fotobiorreactor y de los componentes externos de:

$$M_{reactor} = 150 \text{ kg}$$

Tenemos una masa total del conjunto fotobiorreactor más el cultivo de:

$$M_T = 40 + 150 = 190 \text{ kg} \approx 200 \text{ kg}$$

Ec. 36

El cálculo de la sección del área de las patas se hará con la fórmula:

$$\sigma_{adm} = \frac{M_T}{S}$$

Ec. 37

Dónde S es la sección de las patas que soportan el reactor.

Tenemos, por lo tanto:

$$S = \frac{M_T}{\sigma_{adm}}$$

Ec. 38

Como se usaran 3 patas de acero 316L, cada pata soportará una masa de $M_T / 3$.

$$S_1 = \frac{M_1}{\sigma_{adm}}$$

Ec. 39

Sustituyendo en la ecuación anterior, tenemos:

$$S_1 = \frac{67 \text{ kg}}{1733,33} = 0,03865 \text{ cm}^2 \approx 0,040 \text{ cm}^2$$

Ec. 40

Por lo tanto, cada pata deberá tener una sección mínima de 4 mm².

La geometría de las patas será de base circular.

Para dimensionar el diámetro de las patas que soportaran el fotobiorreactor, se usará la fórmula de la sección de una circunferencia, donde d es el diámetro de la pata:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Ec. 41

Reordenando la ecuación, el valor del diámetro para cumplir con la sección calculada previamente es:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 2,26 \text{ mm}$$

Ec. 42

Por lo tanto, el diámetro de las patas de sección de circunferencia de la base que soportaran el fotobiorreactor serán de como mínimo 2,3 mm.

Esta situación únicamente se daría en un estado ideal en la cual el fotobiorreactor está quieto en el laboratorio y sobre las 3 patas apoyadas en el suelo perfectamente horizontal. Se realizarán una serie de hipótesis más extremas que se pudieran dar a lo largo de la vida útil del fotobiorreactor.

La primera hipótesis será el caso en que estamos ubicando el fotobiorreactor en su posición en el laboratorio, suponiendo que se eleve mediante un montacargas u otro sistema de elevación, al colocarse en el suelo cabe la posibilidad de que todo el peso este soportado únicamente por una sola pata durante un momento en el proceso de ubicarlo en su sitio.

Por lo tanto se realizará el mismo cálculo que se ha realizado anteriormente, pero en este caso la masa que soporta una sola pata es la masa total del fotobiorreactor.

$$S_1 = \frac{M_T}{\sigma_{adm}}$$

Ec. 43

$$S_1 = \frac{200 \text{ kg}}{1733,33 \text{ kg/cm}^3} = 0,1154 \text{ cm}^2$$

Ec. 44

Por lo tanto, en este caso será necesario que el diámetro de las patas de a base del fotobiorreactor sea de:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 3,83 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm}$$

Ec. 45

El lado mínimo de cada pata será de 4 mm.

También, se estudiará la posibilidad de que se arrastre el forobiorreactor, suponiendo en el peor de los casos, que mientras se arrastra el reactor choca contra un escalón o algún objeto que se encuentre en el laboratorio.

En este caso la pata del fotobiorreactor sufriría una combinación de esfuerzo normal y de momento flector. El cálculo del esfuerzo quedaría de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{Masa_T}{S} + \frac{M_z}{I_z} y \leq \sigma_{adm}$$

Ec. 46

El esfuerzo normal se puede menospreciar para que el cálculo resulte más simple, pero posteriormente se hará la comprobación de que el hecho de menospreciarlo no afecta al resultado.

El cálculo se realizará con un valor extremo de carga que soporta el reactor al chocar con el escalón. Suponiendo un valor de momento de 300 kg·m.

Utilizando la ecuación de Navier:

$$\sigma = -\frac{M_z}{I_z} y$$

Ec. 47

Se ha decidido usar una sección tubular para el soporte del fotobiorreactor.

A partir de una primera aproximación a partir de los datos obtenidos hasta el momento se ha escogido el siguiente perfil tubular estandarizado: [28]

Acero Inoxidable	AISI 316L Tubo
Diámetro exterior	108 mm
Diámetro interior	104 mm
Espesor de la pared	2 mm

Figura 31. Tubo escogido [46]

En los próximos cálculos se procederá a comprobar la ecuación de Navier.

Para una sección tubular, el valor del momento de inercia en el eje z es de:

$$I_z = \frac{\pi}{4} \cdot (r_2^4 - r_1^4)$$

Ec. 48

Por lo tanto, el valor del momento de inercia será de:

$$I_z = \frac{\pi}{4} \cdot (5,4^4 - 5,2^4) = 93,58 \text{ cm}^4$$

Ec. 49

Teniendo en cuenta que se debe de cumplir:

$$\sigma \geq \frac{M_z}{I_z} y$$

Ec. 50

Sustituyendo los valores en la ecuación 47:

$$1733,33 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \geq \frac{30000 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{93,58 \text{ cm}^4} \cdot 5,4 \text{ cm}$$

Ec. 51

$$1733,33 \geq 1731,14$$

Por lo tanto, el perfil escogido admite la carga supuesta en caso de accidente.

Haciendo la comprobación con la ecuación 43 se observa que el término del esfuerzo normal es muchísimo más pequeño que el del momento flector, por lo tanto la hipótesis hecha para el cálculo de sección mediante momento flector es correcto.

También hay que estudiar la posibilidad de pandeo, en este caso se estudiará únicamente la opción más desfavorable en que todo el peso esta soportado por una sola pata. Mediante la fórmula:

$$P_{crti} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$$

Ec. 52

Dónde E es el módulo de Young del material, I es el momento de inercia y L es la longitud característica. [29]

Como estamos en el caso de que un extremo de la pata estará encastado al fotobiorreactor y el otro apoyado en el suelo, estamos ante el caso en que un extremo esta encastado y el otro libre. Por lo tanto la longitud característica L será:

$$L = 2 \cdot l$$

Ec. 53

Donde l es la longitud de la pata, que será de 40 centímetros.

Por lo tanto, tendremos:

$$L = 2 \cdot 40 = 80 \text{ cm}$$

Ec. 54

Sustituyendo en la ecuación anterior y haciendo el cálculo a esfuerzo normal:

$$P_{adm} = \frac{P_{crit}}{\gamma_s}$$

Ec. 55

Usando como coeficiente de seguridad el valor más grande posible, 3.

$$P_{adm} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2 \cdot \gamma_s}$$

Ec. 56

Teniendo en cuenta:

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \frac{kg}{cm^2} ; I = 93,58 cm^4$$

Sustituyendo en la ecuación 52 el valor de la carga admisible sin que se produzca pandeo será de:

$$P_{adm} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 93,58}{\frac{80^2}{3}} = 101 \text{ toneladas}$$

Ec. 57

Ya que la carga admisible en la hipótesis de pandeo es muy superior a la carga a la que estará sometido el fotobiorreactor, se considera que el perfil escogido para las patas de este tienen las dimensiones adecuadas para poder soportar los esfuerzos que se van a dar a lo largo de su vida útil.

Finalmente se va a comprobar que la sección del perfil escogido al realizar todas las hipótesis cumple con el cálculo realizado en la ecuación 41, en el que se detallaba la superficie mínima que debía tener el soporte.

$$666 mm^2 \geq 11,54 mm^2$$

5.3.11. Luz

Como ya se ha descrito en apartados anteriores, el cultivo de microalgas ha de tener un ciclo de luz de 12 horas con luz y 12 de oscuridad para que así pueda realizarse la fotosíntesis de forma correcta.

Las 12 horas de oscuridad se darán durante la noche, ya que en el laboratorio no habrá nadie trabajando y por lo tanto las luces estarán apagadas.

El problema aparece por el día, ya que aunque haya la presencia de luz dentro del laboratorio, esta puede no ser suficiente para el crecimiento de las microalgas. Es bastante común, ya que la luz es uno de los elementos limitantes en el crecimiento de estas.

Por lo tanto, para solucionar este problema, las fuentes de luz del fotobiorreactor serán las siguientes. Por un lado, la luz propia del laboratorio, parte entrando por la ventana (iluminación natural) y parte la de los fluorescentes que iluminan la sala. Por otro lado, se incluirán unas tiras de LEDs que serán los encargados de dar la luminosidad necesaria para poder alcanzar los niveles requeridos para que el cultivo pueda realizar la fotosíntesis de forma correcta.

Se ha escogido esta opción, ya que es barata a la par que sencilla de dimensionar e instalar. Se instalarán unas barras alrededor del fotobiorreactor que serán las que sujeten estas tiras LED.

En base a lo descrito en apartados anteriores, se requerirá una intensidad luminosa de alrededor 25.000 Lux.

Se ha obtenido este valor mediante la ecuación 55 y un coeficiente de escalamiento por la diferencia de volumen entre el estudio en el que se ha basado el trabajo y el volumen del fotobiorreactor diseñado: [22] [23] [30]

$$\frac{\mu E}{m^2 \cdot s} = \frac{P [mW]}{S [mm^2]} \cdot 1000 \cdot \frac{\lambda [nm]}{120}$$

Ec. 58

Se utilizará una tira de LED comercial, la cual puede presentar una luminosidad de 3636 lumens por metro.

Aplicando el siguiente factor de conversión, se puede calcular la longitud total de tira de LED necesaria para poder suministrar la intensidad luminosa requerida por el cultivo.

$$25\,000 \text{ Lux} \cdot 0,80 \text{ m}^2 \cdot \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ Lux} \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{1 \text{ m tira de LED}}{3636 \text{ lm}} = 5,50 \text{ m de tira de LED}$$

Ec. 59

En total se necesitaran **6 metros de tira de LED**, que irán enganchados mediante cinta adhesiva en las barras que soportan la estructura del fotobiorreactor.



Figura 31. Tira de LED [49]

5.3.12. Tapa

La tapa superior tendrá forma circular plana. Fabricada con acero inoxidable 316L. Se unirá al desgasificador siendo ubicada en la parte superior de este por encastración. Desde la parte inferior de la tapa saldrá la fijación superior del *riser*. En la figura 32 se puede ver cómo sería la tapa del fotobiorreactor.

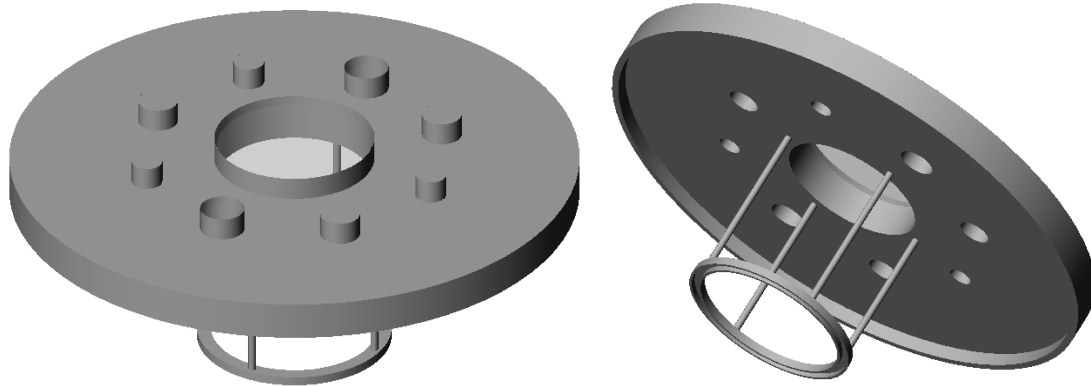


Figura 32. Tapa del fotobiorreactor

5.3.13. Puertos

La tapa superior del fotobiorreactor contara con una serie de puertos para introducir los elementos de control de los parámetros y sistema de entrada de aire entre otras cosas.

En la parte superior se alojaran diferentes puertos. Uno de ellos tendrá la finalidad de introducir la alimentación del cultivo, así como, los nutrientes que se puedan necesitar.

En la parte superior, se alojarán también los puertos de entrada para los sistemas de control de temperatura y pH. Además, uno de ellos irá destinado para la entrada del sistema de aireación. Se dejaran dos puertos libres para poder introducir algún sistema de control en algún momento.

En el centro de la tapa superior habrá un orificio para la salida de aire. Este orificio estará cubierto por un filtro para que no se produzca la entrada de agentes contaminantes.

Además, existirán dos aperturas más de menor diámetro destinadas al mismo fin de salida de aire tapados con el filtro adecuado.

En total en la tapa superior habrá 6 puertos y 3 aperturas de salida de aire.

5.3.14. Salidas

En la parte inferior del fotobiorreactor, habrá una tubería para poder extraer el producto obtenido al final del cultivo. Esta tubería tendrá un diámetro de 25 mm.

5.3.15. Válvulas

Los orificios de entradas y salidas utilizarán válvulas para regular el caudal de entrada o salida. Se ha seleccionado la válvula de bola como la mejor opción para controlar estos caudales, ya que tienen un diseño sencillo y son económicas y eficaces.





Figura 33. Válvula de bola [7]

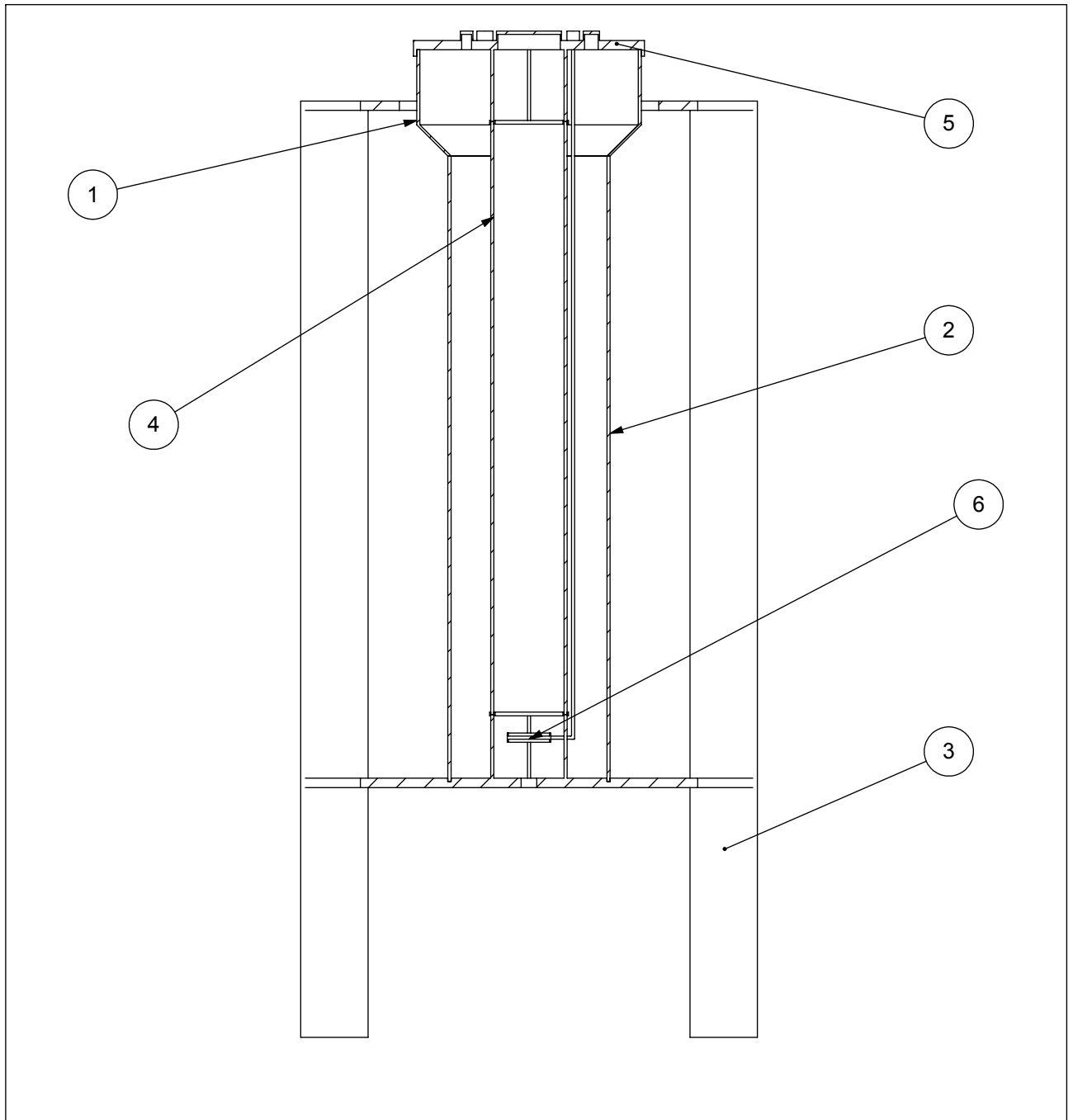
La regulación de este tipo de válvulas puede ser tanto manual como automática mediante un actuador. Para este diseño en concreto, teniendo en cuenta que la finalidad será como planta piloto en un laboratorio, el accionamiento de la válvula será manual.

5.4. Diseño del fotobiorreactor y planos


A continuación se muestra el diseño final del fotobiorreactor, así como, los planos.

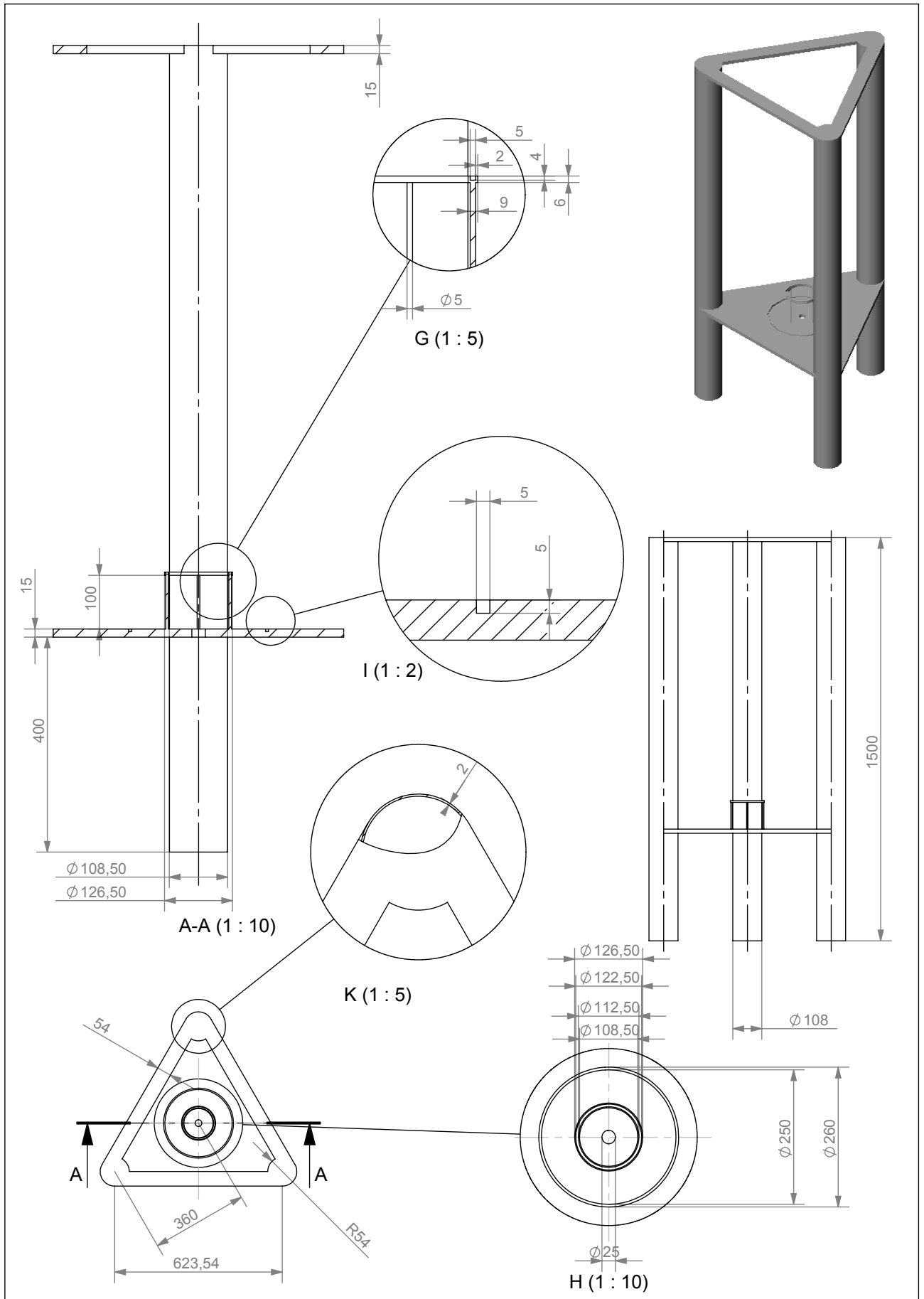


Nº de plano 01	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes	
 	Nombre pieza Fotobiorreactor	Escala 1:10
Autor	Vicente Francisco Sanz Martínez	
		TFM

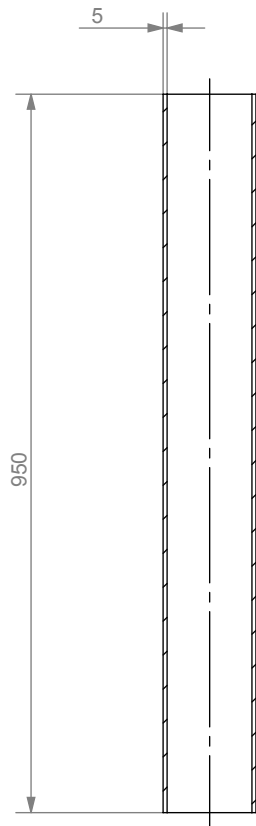


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	Material
1	Desgasificador	1	Polimetilmetacrilato
2	Downcomer	1	Polimetilmetacrilato
3	Estructura	1	Acero 316 L
4	Riser	1	Polimetilmetacrilato
5	Tapa	1	Acero 316 L
6	Difusor	1	Acero 316 L

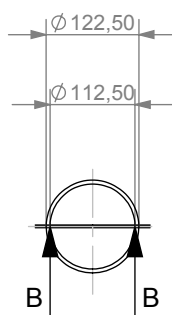
Nº de plano 02	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes		
	Nombre pieza Elementos del fotobiorreactor	Escala 1:10	
	Autor Vicente Francisco Sanz Martínez		TFM




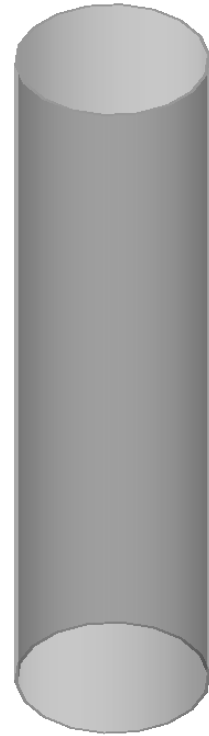
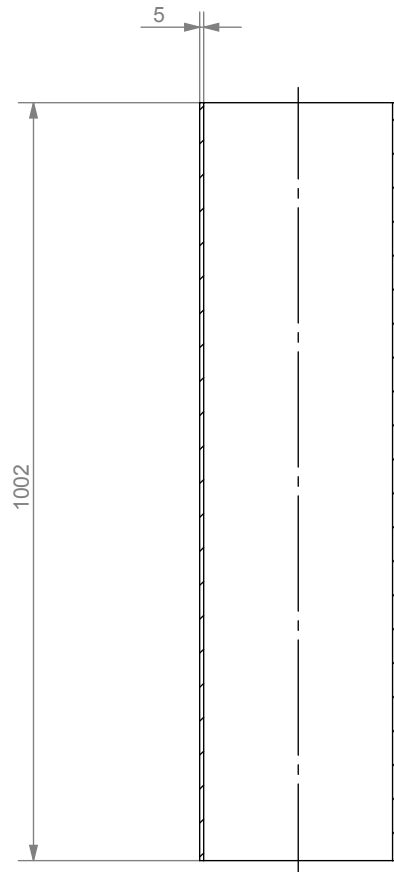
Nº de plano 03	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes	
Nombre pieza Estructura	Escala 1:10	
Autor Vicente Francisco Sanz Martínez		TFM



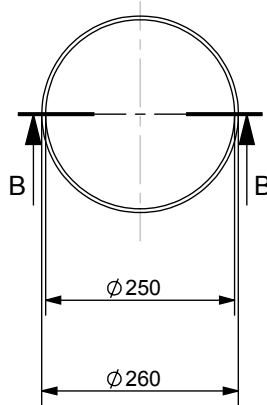
B-B




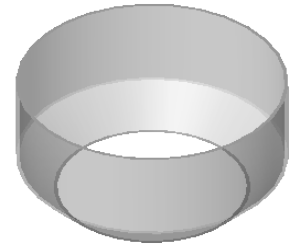
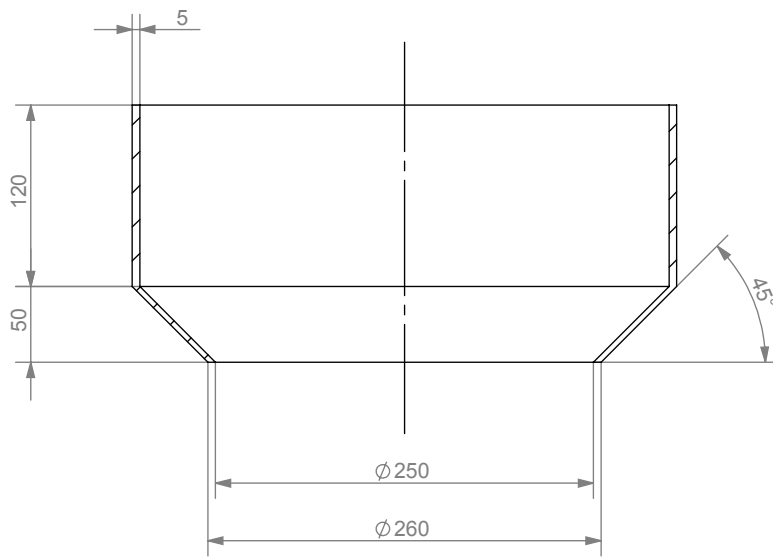
Nº de plano 04	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes	
	Nombre pieza Riser	Escala 1:10
	Autor Vicente Francisco Sanz Martínez	TFM



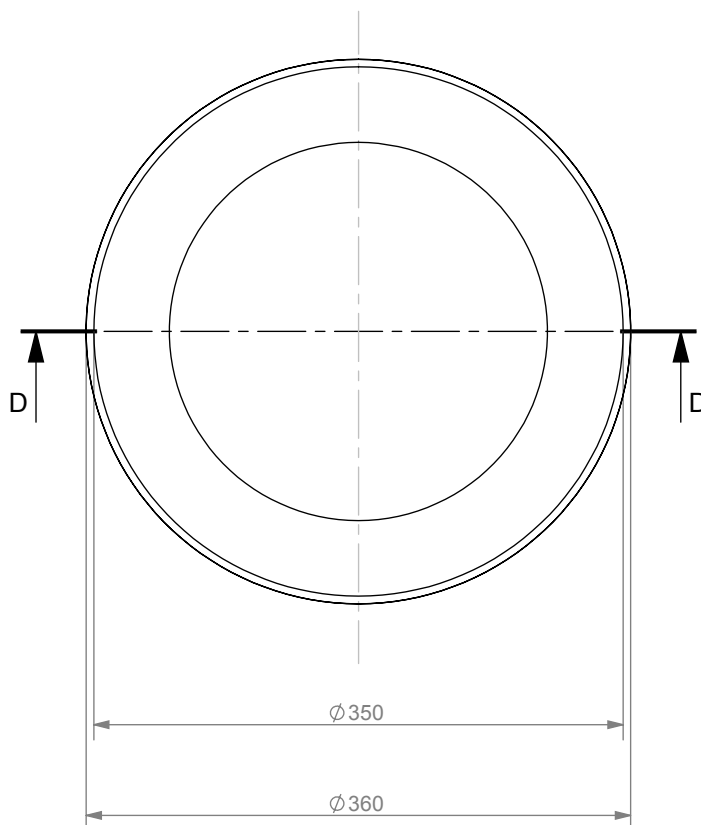
B-B




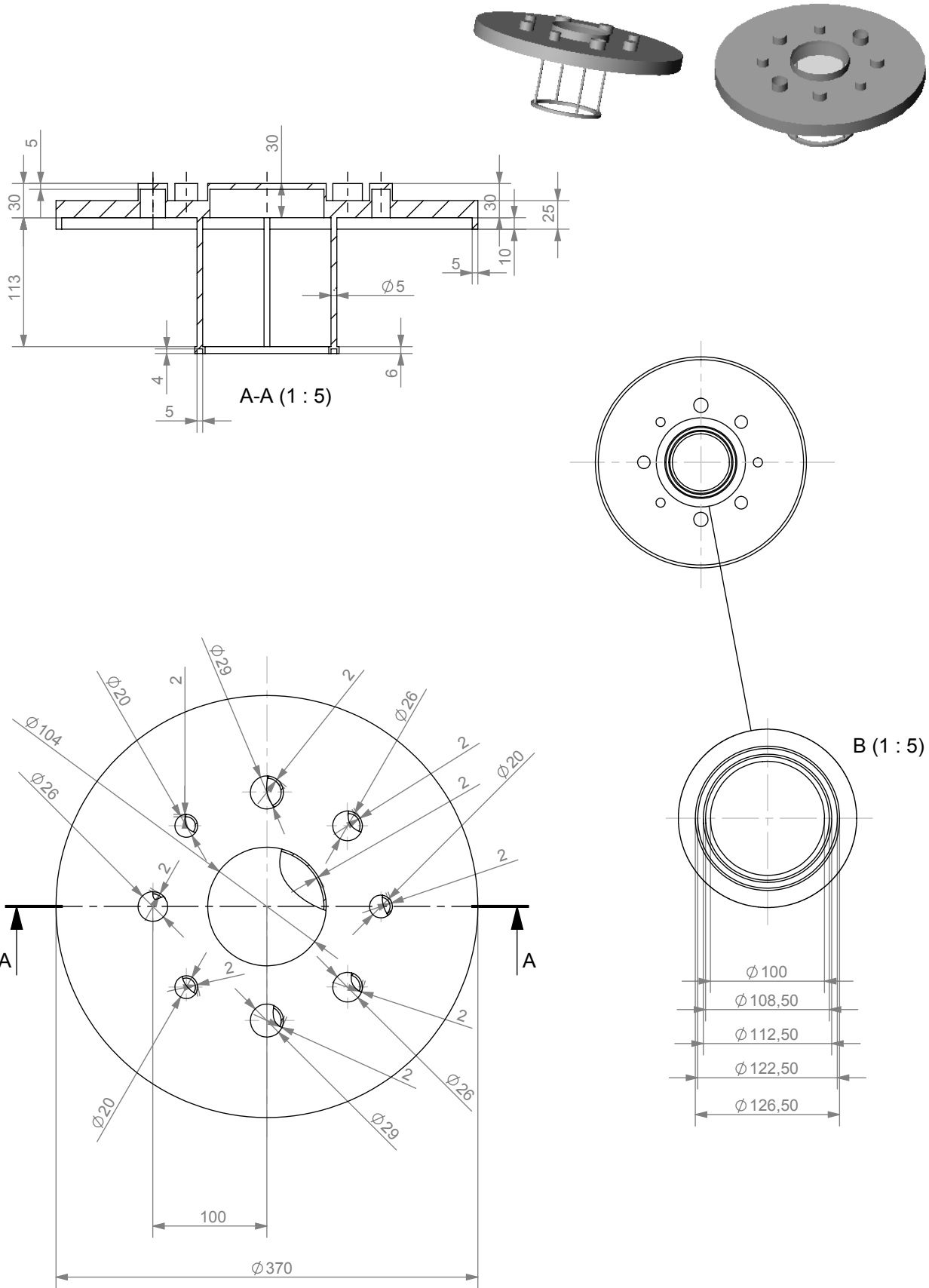
Nº de plano 05	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes	
	Nombre pieza Downcomer	Escala 1:10
Autor	Vicente Francisco Sanz Martínez	TFM




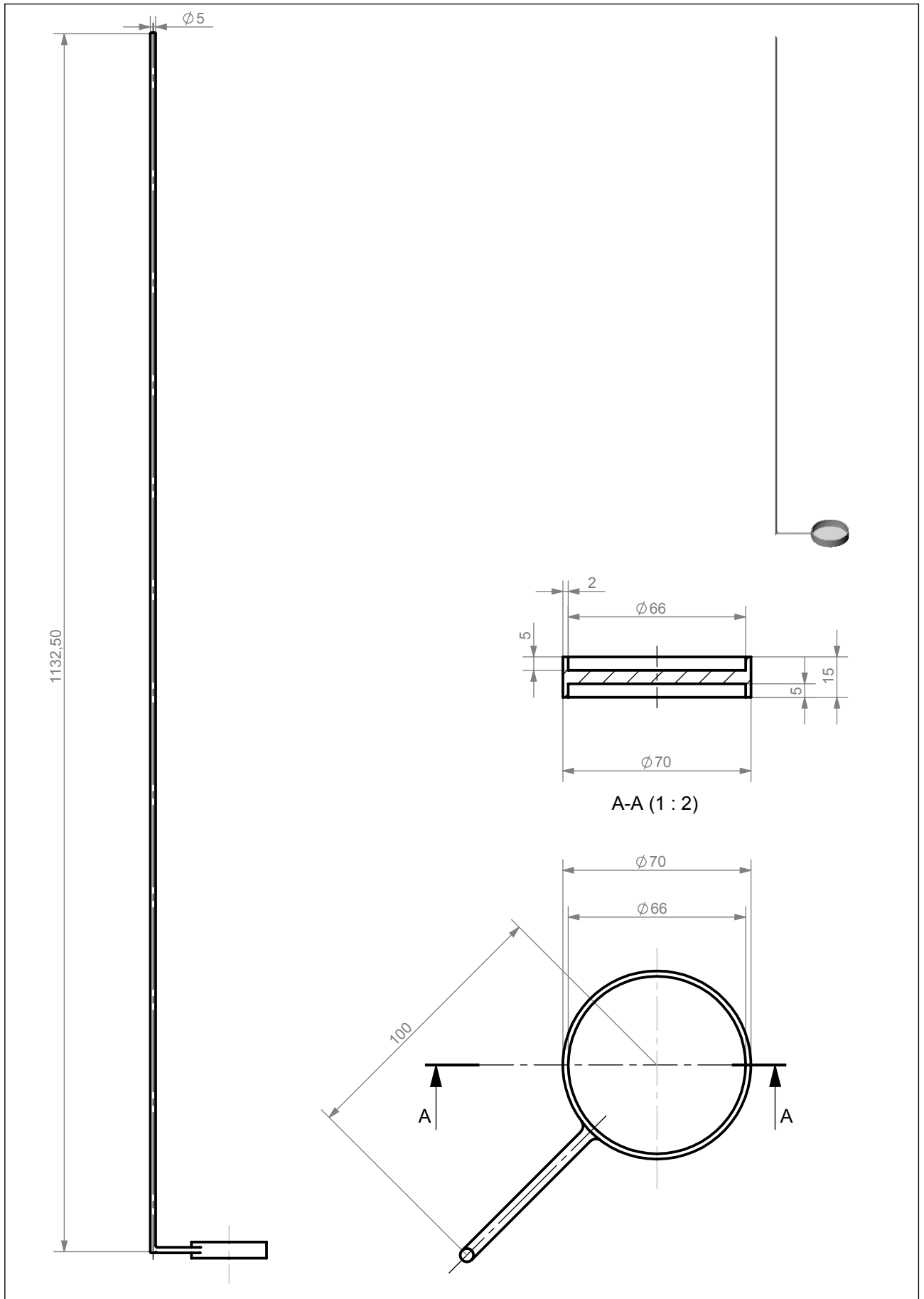
D-D (1 : 5)




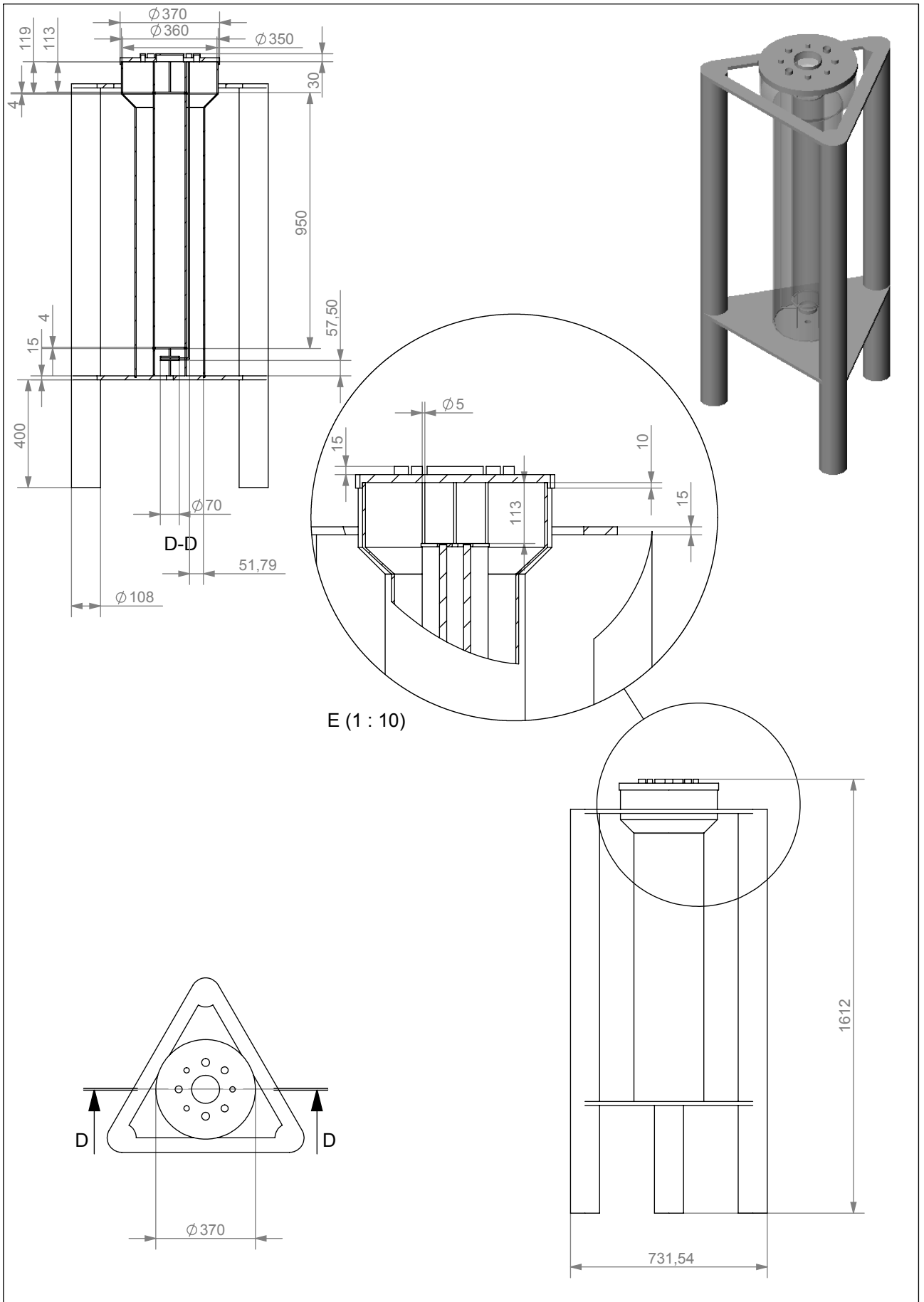
Nº de plano 06	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes	
	Nombre pieza Desgasificador	Escala 1:5
	Autor Vicente Francisco Sanz Martínez	TFM




Nº de plano 07	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes	
Nombre pieza Tapa	Escala 1:10	
 Autor Vicente Francisco Sanz Martínez	TFM	



Nº de plano 08	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes	
Nombre pieza Difusor	Escala 1:05	
 Autor Vicente Francisco Sanz Martínez	TFM	



Nº de plano 09	Título del proyecto Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes	
	Nombre pieza Fotobiorreactor	Escala 1:10
Autor Vicente Francisco Sanz Martínez	TFM	

6. Seguridad

Es sabido que en cualquier circunstancia existe la probabilidad, por muy pequeña que sea, de que ocurra un accidente. Por este motivo, ya que es imposible que exista una probabilidad 0 de accidente, se ha de actuar exhaustivamente ante las causas con tal de minimizarlas. Para reducir los riesgos asociados a cualquier actividad se han de seguir unos pasos fundamentales que provocaran minimizar al máximo esta probabilidad de que ocurra un accidente. [7]

Estos pasos son:

- Identificar las fuentes de peligro.
- Conocer los riesgos a cada tipo de peligro.
- Saber cómo hay que comportarse en todo momento.

En el marco que ocupa este trabajo, estamos ante un fotobiorreactor biológico, así que tendrán que tomarse las medias específicas para este tipo de laboratorios.



Figura 34. Símbolo de peligro biológico [7]

El producto tratado en el fotobiorreactor se trata de microalgas que contienen *Dinoflagellate luciferina*, se trata de un producto de nivel de riesgo I y, por lo tanto, no necesita de ningún equipo especial de seguridad.

Se aplicarán las medidas de laboratorio básico descritas por la NTP 376 y NTE 432. [35][36]

El personal de laboratorio deberá usar en todo momento un equipo de protección que consistirá en:





Objeto	Descripción	Foto
Bata de laboratorio	Se utiliza principalmente con el fin de proteger la ropa y la piel en caso de que una sustancia química amenace con derramarse.	
Guantes	Se utilizan con el fin de proteger la piel de las manos en case de que una sustancia química se derrame	
Gafas de seguridad	Se utilizan para evitar la entrada de objetos, agua o productos químicos en los ojos.	
Protección para el pelo	Se utilizan para evitar que caiga pelo en la zona de trabajo y proteger el pelo del derrame de un producto químico	

Figura 35. Descripción del equipo de protección [7]

Ya que el fotobiorreactor no trabaja a altas temperaturas y la presión de trabajo es la atmosférica, no se tomaran medidas de seguridad específicas en este aspecto.

Para la limpieza y esterilización del fotobiorreactor se utilizará agua caliente o vapor para poder llegar a las zonas de difícil acceso.

En el laboratorio donde se ubique el fotobiorreactor tendrá que haber duchas y lavaojos de seguridad.

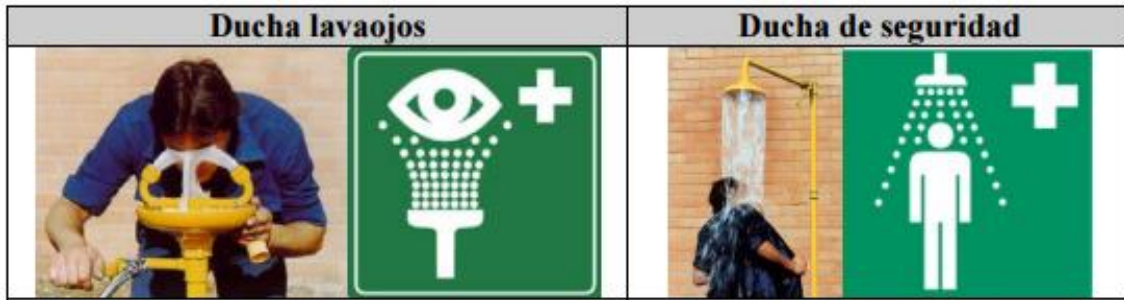


Figura 36. Ducha lavaojos y ducha de seguridad [7]

Además de las medidas descritas anteriormente, todos los operarios del laboratorio deberán de tener un conocimiento de los riesgos que pueden aparecer durante su trabajo, así como, de los protocolos de actuación en caso de accidente.

7. Estudio económico

En este punto se detallará el escandallo para este trabajo. Esta valoración económica servirá para tener una referencia clara y realista del coste de materializar el diseño del fotobiorreactor.

En esta valoración económica se tiene en cuenta el coste de los materiales, sistemas de control, el montaje y el coste de ingeniería invertido en el diseño del fotobiorreactor.

Se ha detallado el coste de la materia prima de los materiales que se utilizarán, el coste de operación para el montaje y se ha fijado la cantidad de imprevistos en un 15 %.

Al tratarse de un proyecto a nivel de planta piloto para uso en el laboratorio, el objetivo de este estudio únicamente pretende abordar el coste de construcción. En caso de querer escalar este fotobiorreactor a nivel industrial habría que hacerse un estudio más detallado para comprobar la viabilidad del proceso en relación con sus costes y beneficios.

El coste final del fotobiorreactor se ha establecido en **16.600,00 €**.

Si se añade un 21 % de IVA, el precio final del fotobiorreactor quedaría en 20.086,00 €.

A continuación de detalla el estudio económico realizado.

Parte	Componente	Precio	Unidades	Cantidad	Precio Total
Fotobiorreactor	Patas AC316L	9,17	€/m	4,5	41,27 €
	Soporte <i>downcomer</i> AC316L	68,6	€/kg	41	2.812,60 €
	Soporte <i>riser</i> inferior AC316L	68,6	€/kg	0,25	17,15 €
	Soporte <i>riser</i> superior AC316L	68,6	€/kg	0,25	17,15 €
	Sujección desgasificador	68,6	€/kg	12	823,20 €
	Tapa	68,6	€/kg	21	1.440,60 €
	<i>Riser</i>	51	€/und	1	51,00 €
	<i>Downcomer</i>	85	€/und	1	85,00 €
	Desgasificador	580	€/und	1	580,00 €
	Válvula de bola	15	€/und	1	15,00 €
	Agitación y aireación	Difusor aire	12	€/und	1
Compresor 200 W		200	€/und	1	200,00 €
Iluminación	Tira LED	10	€/m	6	60,00 €
Sistemas de control	Sonda pH	10	€/und	1	10,00 €
	Sonda Temperatura	9	€/und	1	9,00 €
Montaje		40	€/h	50	2.000,00 €
Extras	Imprevistos		15 %		1.226,00 €
Subtotal					9.400,00 €
Diseño	Ingenieros	20	€/h	360	7.200,00 €
Total					16.600,00 €

8. Impacto ambiental

El estudio del impacto ambiental en este trabajo se va a centrar en el cálculo de las emisiones a la atmósfera debido a las operaciones de cultivo realizadas en el fotobiorreactor durante un año. [7]

Las emisiones debidas al cultivo, provienen del gasto energético debido al motor que realiza la aireación y agitación, y, también, del consumo energético de la tira de LEDs que iluminará el cultivo.

Teniendo en cuenta que se utilizará un compresor de 200 W y cada proceso de cultivo dura 6 días, podemos obtener la cantidad de kWh por fermentación:

$$200 \text{ W} \cdot 6 \frac{\text{días}}{\text{cultivo}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 28,8 \frac{\text{kWh}}{\text{cultivo}}$$

Ec. 60

Los gastos energéticos de las sondas de los sistemas de control son despreciables.

Como se realizan 45 procesos de cultivo al año, el total de energía consumida por cultivo en un año será de:

$$28,8 \frac{\text{kWh}}{\text{cultivo}} \cdot 45 \frac{\text{cultivos}}{\text{año}} = 1296 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Ec. 61

A continuación se calculará el consumo de la tira de LEDs que iluminaran el cultivo durante las horas de luz que requiere. La potencia de la tira es de 150 W. [49]

$$150 \text{ W} \cdot 6 \frac{\text{días}}{\text{cultivo}} \cdot 12 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 10,8 \frac{\text{kWh}}{\text{cultivo}}$$

Ec. 62

Como se realizan 45 procesos de cultivo al año, el total de energía consumida por cultivo en un año será de:

$$10,8 \frac{\text{kWh}}{\text{cultivo}} \cdot 45 \frac{\text{cultivos}}{\text{año}} = 486 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Ec. 63

De acuerdo con la Oficina Catalana del Cambio Climático, cada kWh emite 308 g de CO₂, gas que contribuye al calentamiento global. Este dato está basado en el mix energético de Catalunya. [7]

Por lo tanto se calculará que cantidad de CO₂ se emite a la atmosfera en un año debido al gasto energético de la agitación del motor.

$$(1296 \text{ kWh} + 486 \text{ kWh}) \cdot 0,308 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}} = 549 \text{ kg CO}_2$$

Ec. 64

Otro dato interesante sería el cálculo del consumo de agua para llevar a cabo las operaciones.

Cada cultivo consume 40 L de agua. Por lo tanto, en un año se utilizará:

$$0,040 \frac{\text{m}^3 \text{ agua}}{\text{cultivo}} \cdot 45 \frac{\text{cultivos}}{\text{año}} = 2 \frac{\text{m}^3 \text{ agua}}{\text{año}}$$

Ec. 65

Este dato debería doblarse para considerar los gastos debidos a las operaciones de limpieza y mantenimiento. Así el consumo anual de agua será de:

$$4 \frac{\text{m}^3 \text{ agua}}{\text{año}}$$

9. Organización del proyecto

	Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio			
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24
Búsqueda de la temática del proyecto																								
Viabilidad e interes en el proyecto																								
Investigación y documentación																								
Definir la estructura del proyecto																								
Bases teóricas de cada apartado																								
Estudio de las opciones de diseño																								
Diseño y dimensionado del reactor																								
Realización de los planos																								
Análisis de seguridad																								
Estudio económico																								
Estudio de impacto ambiental																								
Redacción del proyecto																								
Revisión general del proyecto																								
Presentación del documento escrito																								
Defensa oral del proyecto																								

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo se definió como el diseño de un fotobiorreactor para la producción de 30 kg/año de *Dinoflagellate Luciferina*. Este objetivo se ha cumplido y, además, se han logrado cumplir con los objetivos secundarios definidos al inicio del trabajo.

Después de realizar una búsqueda de información sobre el cultivo de microalgas se han definido las condiciones en las cuales pueden crecer de forma óptima para así alcanzar una productividad de 17 g de *Dinoflagellate Luciferina* por litro en 6 días de cultivo.

Se ha escogido un fotobiorreactor tipo *Airlift*, en el que la propia aireación se encarga de agitar el cultivo, y trabajará en lotes. El fotobiorreactor finalmente tendrá unas dimensiones totales de 1612 milímetros de altura y 732 milímetros de ancho. Contará con una estructura con vista en planta triangular, soportada por 3 patas construidas con perfiles de acero AISI 316L tubulares, de 108 milímetros de diámetro exterior y 104 milímetros de diámetro interior. Los tubos en los que estará contenido el cultivo son de metacrilato de 5 milímetros de espesor. El *downcomer* tiene un diámetro interior de 250 milímetros y el *riser* de 112,5 milímetros. El *downcomer* estará elevado del suelo una altura de 400 milímetros.

El volumen operativo del fotobiorreactor es de 40 litros y el volumen total de 60 litros.

El *riser* estará sujeto por dos mordazas, una enganchada a la estructura que soporta el *downcomer* y la otra sujeta a la tapa. Estará elevado respecto de la base del *downcomer* una distancia de 100 milímetros.

La tapa superior, fabricada con acero AISI 316L, incorporará 9 puertos, 3 de ellos destinados a la salida del aire que realiza la agitación. Estos puertos estarán tapados por un filtro que impida la entrada de partículas al cultivo que puedan contaminarlo. El resto de puertos están destinados a la introducción de sondas para el control del cultivo.

Para el vaciado del fotobiorreactor una vez finalizado el cultivo, en la parte inferior se incorporará una válvula de bola para regular el caudal de salida.

Se ha calculado las emisiones de CO₂ provocadas por el cultivo de las microalgas y se ha obtenido un valor de 549 kg CO₂ anuales.

Finalmente, se ha realizado el estudio económico y el coste de fabricación del fotobiorreactor se ha fijado en 16.600,00 €.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Jordi Bou, tutor de este trabajo, por la ayuda en la realización del trabajo así como en la elección del tema.

También querría agradecer a mi familia que me ha apoyado en mis estudios en esta escuela desde que empecé.

.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] **Biorrefinerías.** <http://www.aebiq.org/biorrefinerias/> [En línea] Marzo 2019.
- [2] **Biorrefinerías.** <https://es.wikipedia.org/wiki/Biorrefiner%C3%ADa> [En línea] Marzo 2019.
- [3] **Química sostenible.** <http://www.ugr.es/~quiorred/qverde/intro.htm> [En línea] Marzo 2019.
- [4] **Química sostenible.** FRANCISCO GARCÍA CALVO-FLORES y JOSÉ A. DOBADO. *Química Sostenible: una alternativa creíble*. Anales de la Química, Vol. 104, 205~210, 2008.
- [5] **Química sostenible.** <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-quimica-verde/> [En línea] Marzo 2019.
- [6] **Biorefinerías.** ROGELIO CARDENAS VARGAS. *Biorefinerías para la producción de biocombustibles de segunda generación*. UPV 2012
- [7] VICENTE FRANCISCO SANZ MARTÍNEZ. *Diseño de un fermentador para la obtención de biomoléculas*. Trabajo Final de Grado, UPC 2017.
- [8] **Dinoflagellate** **Luciferin.** <https://www.ebi.ac.uk/chebi/chebiOntology.do?chebuid=CHEBI:61702> [En línea] Mayo 2019
- [9] **Dinoflagellate** **Luciferin.** <https://biocyc.org/compound?orgid=META&id=CPD-13067#tab=showAll> [En línea] Mayo 2019.
- [10] **Dinoflagellate** **Luciferin.** http://tolweb.org/notes/?note_id=5621 [En línea] Mayo 2019.
- [11] **Microalgas.** JOSE MARIA FERNANDEZ SEVILLA. *Microalgal Biotechnology*. Apuntes de la asignatura Ingeniería de Procesos aplicada a la Biotecnología de Microalgas UAL 2014
- [12] **Microalgas.** J. R. BENAVENTE-VALDÉS, J. C. MONTAÑEZ, C. N. AGUILAR, A. MÉNDEZ-ZAVALA y B. VALDIVIA. *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. Proyecto en la Universidad Autónoma de Coahuila. 2012.

- [13] **Microalgas.** ALEXIS HERNÁNDEZ-PÉREZ y JOSÉ I. LABBÉ. *Microalgas, cultivo y beneficios*. Revista de Biología Marina y Oceanografía. Vol. 49, nº 2: 157-173. Agosto 2014.
- [14] **Microalgas.** MARÍA DEL CARMEN CERÓN GARCÍA. *Producción de microalgas con aplicaciones nutricionales para humanos y animales*. Universidad de Almería. 2013.
- [15] **Microalgas.** HECTOR LORES SUBIRATS. *Estudio a escala piloto del efecto de diferentes condiciones de operación sobre la eliminación de nutrientes en un cultivo de microalgas*. Trabajo Final de Máster 2015.
- [16] **Fotobiorreactores.** AST INGENIERIA. *Aplicaciones de microalgas: estado de la técnica*. Malgas 2014.
- [17] **Fotobiorreactores.** <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion> [En línea] Marzo 2019.
- [18] **Fotobiorreactores.** Enrique Gregorio Núñez Yapias. *Biorreactores*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Tarma, 2013.
- [19] **Fotobiorreactores.** <http://procesosbio.wikispaces.com/Diseño+Básico> [En línea] Marzo 2019.
- [20] **Fotobiorreactores.** <https://biorrefineria.blogspot.com/2014/06/2014-12fotobiorreactores.html> [En línea] Mayo 2019.
- [21] **Fotobiorreactores.** JHONNATHAN CAMILO TOVAR SALAMANCA y JENNY PAOLA RUÍZ DÍAZ. *Propuesta de escalamiento de un fotobiorreactor para la microalga chlorella vulgaris a nivel piloto*. Proyecto en la fundación universidad de américa 2017.
- [22] **Diseño.** RUBIO FERNÁNDEZ, SIERRA HERRERA, RUIZ FONSECA, SANDOVAL HERRERA. *Diseño de un fotobiorreactor Airlift a escala banco*. Biotecfua 2014.
- [23] **Diseño.** http://www.egc.com/useful_info_lighting.php [En línea] Junio 2019.
- [24] **Diseño.** ROBLES HEREDIA, SACRAMENTO RIVERO, RUIZ MARIN, BAZ RODRIGUEZ, CANEDO LOPEZ, NARVÁEZ GARCÍA. *Evaluación de crecimiento celular, remoción de nitrógeno y producción de lípidos*. Revista mexicana de ingeniería química 2016.
- [25] **Diseño.** GUTIÉRREZ MIGUEL, GUZMAN SILVA. *Propuesta de un sistema continuo para un fotobiorreactor air-lift a escala laboratorio*. Fundación Universidad de América 2016.

- [26] **Diseño.** MIGUEL FERNÁNDEZ ÁNGEL. *Diseño, montaje y caracterización de fotobiorreactores airlift para el cultivo de la microalga chlorella sorokiana*. Universidad EAFIT 2013.
- [27] **Diseño.** BARRIENTOS GARCIA, ORTIZ HERNANDEZ, GRANADOS GONZALEZ, MARTINEZ LIZAMA. *Diseño de un biorreactor airlift para la producción de ácido giberélico*. Instituto Politécnico Nacional 2015.
- [28] **Diseño.** <http://www.calemur.es/2009/productos/fontaneria/inoxpres/accesorios-y-tuberia-acero-inox/tubo-inoxidable-en-barra.54139.html> [En línea] Junio 2019.
- [29] **Diseño.** <https://www.upc.edu/prismatic/prismatic.html> [En línea] Junio 2019.
- [30] **Diseño.** [https://es.wikipedia.org/wiki/Einstein_\(unidad_de_medida\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Einstein_(unidad_de_medida)) [En línea] Junio 2019
- [31] **Estudios.** LÓPEZ ROSALES, GARCÍA CAMACHO, SÁNCHEZ MIRÓN, MARTÍN BEATO, YUSUF CHISTI, MOLINA GRIMA. *Pilot-scale bubble column photobioreactor culture of a marine dinoflagellate microalga illuminated with light emission diodes*. Bioresource Technology 216 (2016) 845-855.
- [32] **Estudios.** ACIÉN FERNANDEZ, FERNÁNDEZ SEVILLA, MOLINA GRIMA. *Photobioreactors for the production of microalgae*. Rev Environ Sci Biotechnol (2013) 12:131-151.
- [33] **Estudios.** GALLARDO RODRÍGUEZ, SÁNCHEZ MIRÓN GARCÍA CAMACHO, CERÓN GARCÍA, BELARBI, MOLINA GRIMA. *Culture of dinoflagellates in a fed-batch and continuous stirred-tank photobioreactors*. Process Biochemistry 45 (2010) 660-666.
- [34] **Diseño.** <http://www.fao.org/3/y5720s/y5720s07.htm> [En línea] Junio 2019
- [35] **Seguridad.** NTP 376. *Exposición a agentes biológicos: seguridad y buenas prácticas de laboratorio*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo 1988.
- [36] **Seguridad.** NTP 432. *Prevención del riesgo en el laboratorio. Organización y recomendaciones generales*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- [37] **Fotografía.**
http://contenidosdigitales.ulp.edu.ar/exe/quimica/la_quimica_y_el_desarrollo_sostenible.html [En línea] Junio 2019

- [38] **Fotografía.** <http://blog.analitek.com/12-principios-de-la-qu%C3%ADmica-verde> [En línea] Junio 2019
- [39] **Fotografía.** <https://www.tec.ac.cr/pensis/articulos/poder-microalgas> [En línea] Junio 2019
- [40] **Fotografía.** <http://hablemosdepeces.com/algas-rojas/> [En línea] Junio 2019
- [41] **Fotografía.** <https://www.indiamart.com/proddetail/algae-raceway-pond-aeration-system-11912720533.html> [En línea] Junio 2019
- [42] **Fotografía.** <https://www.cajamar.es/pdf/bd/agroalimentario/innovacion/formacion/actividades-de-transferencia/018-microalgas2-1467367279.pdf> [En línea] Junio 2019
- [43] **Fotografía.** <https://biorrefineria.blogspot.com/2014/06/2014-12fotobiorreactores.html> [En línea] Junio 2019
- [44] **Diseño.** <https://hubot.cl/product/sonda-temperatura-pt100-rtd-sku-518/> [En línea] Junio 2019
- [45] **Diseño.** <https://www.amazon.es/KKmoon-Laboratorio-Profesional-Hidrop%C3%B3nico-Controlador/dp/B07BJY2VFF> [En línea] Junio 2019
- [46] **Diseño.** <http://www.calemur.es/2009/productos/fontaneria/inoxpres/accesorios-y-tuberia-acero-inox/tubo-inoxidable-en-barra.54139.html> [En línea] Junio 2019
- [47] **Diseño.** <https://www.mwmaterialsworld.com/es/tubo-de-metacrilato-transparente.html> [En línea] Junio 2019
- [48] **Diseño.** *Diseño de tanques de almacenamiento.* Universidad de Granada 2010
- [49] **Diseño.** <https://www.ledpoint.es/es/tira-led-5m-blanco-fr%C3%ADo-5500-6000k-2835-160-ledm-24v-control-de-corriente> [En línea] Junio 2019