



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño de un fotobiorreactor para una producción de
microalgas *Nannochlorepis* sp.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Belenguer Martínez, Joan

Tutor/a: Arques Sanz, Antonio

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Resumen

En este trabajo se va a diseñar un fotobiorreactor para una producción a gran escala de *Nannochlorepis* sp. Se han estudiado los principales tipos de microalgas y sus aplicaciones industriales. Además, se ha revisado el estado actual de la producción a gran escala de estas, los diferentes métodos de cultivo y las técnicas de cosechado, así como de los principales parámetros a tener en cuenta durante el cultivo. A continuación, se ha realizado el diseño del fotobiorreactor, tanto de las partes principales de este, como un escalado de los elementos auxiliares de la planta necesarios para su funcionamiento. Finalmente, se ha realizado un análisis económico de la inversión y del coste de operación de la planta.

Palabras clave: *Nannochlorepis*, fotobiorreactor, microalgas, biocultivo, biomasa.

Resum

En aquest treball es dissenyarà un fotobiorreactor per a una producció a gran escala de *Nannochlorepis* sp. S'han estudiat els principals tipus de microalgues i aplicacions industrials. A més, s'ha revisat l'estat actual de la producció a gran escala d'aquestes, els diferents mètodes de cultiu i les tècniques de collita, així com dels paràmetres principals a tenir en compte durant el cultiu. A continuació, s'ha realitzat el disseny del fotobiorreactor, tant de les parts principals d'aquest, com un escalat dels elements auxiliars de la planta necessaris per al funcionament. Finalment, sha realitzat una anàlisi econòmica de la inversió i del cost doperació de la planta.

Paraules clau: *Nannochlorepis*, fotobiorreactor, microalgues, biocultiu, biomassa.

Abstract

*In this work, a photobioreactor has been designed for a large-scale production of *Nannochlorepis* sp. The main types of microalgae and their industrial applications have been studied. In addition, the current state of large-scale production of these, the different cultivation methods and harvesting techniques, as well as the main parameters to be taken into account during cultivation, have been reviewed. Next, the design of the photobioreactor has been carried out, both of its main parts, and a scaling of the auxiliary elements of the plant necessary for its operation. Finally, an economic analysis of the investment and the operating cost of the plant has been carried out.*

Keywords: *Nannochlorepis*, photobioreactor, microalgae, bioculture, biomass.

Índice general

Resumen	I
Índice general	II
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	V
1. Introducción	1
1.1. Motivaciones	1
1.2. Microalgas	2
1.3. Estado del arte	8
2. Objetivos	21
3. Selección	23
3.1. Selección del microorganismo	23
3.2. Selección del reactor	25
4. Escalado y dimensionamiento	27
4.1. Escalado de producción	27
4.2. Diagrama de flujo	30
4.3. Escalado del PBR	32
5. Estructura de la planta	37
5.1. Esquema de la planta	37
5.2. Depósitos y estanques	40
5.3. Inyección CO_2 y aire	43
5.4. Intercambio de calor	45
5.5. Separación y cosechado	46
5.6. Equipos de bombeo y tuberías	49
5.7. Funcionamiento y modo de operación	49
6. Estudio económico	51
6.1. Costes de capital (CAPEX)	51
6.2. Costes de operación (OPEX)	54

6.3. Costes de producción	56
7. Conclusiones del trabajo	57
Bibliografía	58
8. Documentación	62

Índice de figuras

1.1. Estanque para el cultivo abierto de microalgas (Hernández-Pérez y col. 2014)	13
1.2. Columna de burbujas (Sirohi y col. 2022)	14
1.3. Diferentes diseños de biorreactores <i>airlift</i> (Singh y col. 2012)	14
1.4. Vista frontal y lateral de un PBR de paneles planos (Singh y col. 2012)	15
1.5. Diseño de un PBR tubular dispuesto horizontalmente (Singh y col. 2012)	16
1.6. PBR tubular en hélice (Singh y col. 2012)	17
3.1. <i>Nannochlorepis</i> sp. bajo el microscopio, foto de Wageningen University.	23
3.2. PBR tubular helicoidal, diseño de	26
4.1. Disposición en planta de los PBRs	28
4.2. Diagrama de flujo de la planta	30
4.3. Funcionamiento de la columna (Romero Villegas y col. 2017 y San Pedro y col. 2014)	32
4.4. Croquis de las dimensiones de la columna	33
4.5. Esquema del cálculo del volumen de la columna	34
4.6. Croquis distribución tubos	35
5.1. Esquema de la planta	38
5.2. Módulo de 10 PBRs en serie	39
5.3. Depósito tipo H (<i>AIQSA (AUXILIAR DE INSTALACIONES QUÍMICAS S.A.)</i>)	42
5.4. Estanque de hormigón (<i>AIQSA (AUXILIAR DE INSTALACIONES QUÍMICAS S.A.)</i>)	43
5.5. Compresor Ultima™ MODELO U110RS (<i>CompAir</i>)	44
5.6. Intercambiador de calor URANUS 240 <i>Zodiac</i>	45
5.7. Lamella tank XBC-50 <i>Gonyuan Enviroment</i>	47
5.8. Secador solar	48
6.1. Índices CAPEX (Garret 1989)	53

Índice de tablas

3.1. Dimensiones PBR piloto	26
4.1. Cálculos escalado de PBR piloto a planta industrial	27
4.2. Área y volumen de la planta	28
4.3. Cálculo bombeo	29
4.4. Cálculo caudales de inyección	29
4.5. Dimensiones para la planta	29
4.6. Dimensiones columna piloto	33
4.7. Dimensiones de la columna escalada	34
4.8. Dimensiones de los tubos del PBR	35
4.9. Medidas tubo PBR	35
4.10. Superficies módulo 5 PBRs	36
5.1. Referencias esquema de la planta	40
5.2. Dimensiones depósitos aguas	41
5.3. Dimensiones depósito y estanque de medio de cultivo	41
5.4. Volúmenes finales de los depósitos	42
5.5. Dimensiones comerciales de los depósitos de aguas	42
5.6. Inyección de CO ₂	43
5.7. Caudales de inyección de aire	44
5.8. Depósito de separación	47
5.9. Tanque de láminas	47
5.10. Dimensiones secador solar	48
6.1. Costes de capital directos (Construcción)	52
6.2. Costes de capital indirectos (No construcción)	52
6.3. Costes totales de capital 2022	53
6.4. Producción estimada	54
6.5. Cálculos amortización	54
6.6. Amortización de la inversión	54
6.7. Costes de operación y mantenimiento	55
6.8. Consumo energético de los equipos	55
6.9. Empleados	56
6.10. Costes de producción	56

1 Introducción

En este capítulo se va a hacer una revisión de las diferentes especies de algas con potencial industrial que existen. Cuáles son sus propiedades y características más importantes, y sus diferentes aplicaciones. Seguidamente, se van a recoger las diferentes técnicas de cultivo de algas que son utilizadas a día de hoy. Finalmente, se revisarán los métodos de cosechado más importantes.

1.1 Motivaciones

En estos últimos años ha aumentado la preocupación por temas que ya llevan años abordando nuestro estado de bienestar como pueden ser el cambio climático, la crisis energética o la sobrepoblación y la falta de alimentos. La magnitud de estos problemas es tal que ya se encuentra entre las agendas políticas de la gran mayoría de estados del mundo. Es por ello que el interés por nuevos métodos de producción industriales más eficaces y sostenibles van a ser de gran interés en los próximos años.

El cambio climático, favorecido por el rápido crecimiento industrial y la producción energética a partir de combustibles fósiles, ha despertado el interés en nuevas fuentes renovables de energía, entre ellas los biocombustibles. Estos biocombustibles han surgido de investigaciones que buscan mitigar los efectos del cambio climático y solucionar la crisis energética utilizando combustibles provenientes de fuentes renovables, tanto de origen vegetal como animal, y que tengan como principal origen la fijación del CO_2 atmosférico.

Esto genera el debate de *combustibles vs. alimentos*, debido a que se plantea la sustitución de los cultivos de uso alimentario para convertirlos en cultivos para la producción energética, con el impacto que esto tiene en la deforestación y en la crisis alimentaria. Es aquí, donde las microalgas surgen como la solución a estos problemas. Por diversas razones, entre las que se encuentra unas mayores producciones por área, mayores cantidades de aceite y nutrientes en comparación a los cultivos tradicionales, menor consumo de agua o la facilidad de implementación en terrenos áridos. En conclusión, las microalgas producen una elevada cantidad de biomasa de manera sostenible y con un gran potencial en diferentes tipos de industrias.

1.2 Microalgas

Las algas pueden encontrarse en forma de microorganismos o como ejemplares que llegan a medir decenas de metros. En particular, las algas microscópicas, usualmente unicelulares o filamentosas, presentan un elevado interés en la industria ya que son fácilmente procesables y escalables, y por tanto tienen un mayor potencial para obtener beneficio de estas.

En cuanto a las microalgas, abarcan una gran cantidad de especies, se estima que existen entre 70.000 a un millón de especies, pero solo 44.000 han sido descritas. Son organismos con una difícil clasificación, en general se estudian según su color (cianobacterias, rodófitas, clorofitas y cromofitas) y en base a los pigmentos presentes en ellas. También se tienen en cuenta otros criterios como la presencia de flagelos, la presencia del retículo endoplasmático alrededor del cloroplasto, y las diferentes rutas de división nuclear y celular (Grubišić y col. 2019).

1.2.1 Potencial de las microalgas

Las microalgas son capaces de asumir diferentes tipos de metabolismos (fotoautótrofos, heterotróficos, mixotróficos y fotoheterotróficos). En sí, la gran mayoría de algas con gran potencial productivo tiene un comportamiento autótrofo, es decir, que generan compuestos orgánicos complejos a partir de moléculas más sencillas, como puede ser el carbono atmosférico (CO_2). Además, si estas se desarrollan utilizando fuentes energéticas como la luz solar, fotótrofos, se tiene un organismo capaz de generar biomasa a partir de precursores sencillos y utilizando energía directa proveniente del Sol. Además, muchas de estas algas son capaces de alternar metabolismos autótrofos con heterótrofos, lo que expande las posibilidades de aplicación. (Grubišić y col. 2019)

Son organismos diseñados específicamente para fijar el CO_2 , por lo que tienen un papel muy importante en el ciclo biogeoquímico del carbono. Las algas contribuyen especialmente como sumideros del carbono atmosférico y por tanto tienen un gran potencial a la hora de mitigar la acción del cambio climático (Tsai y col. 2017).

Además, las microalgas son capaces de producir biomasa con unas eficiencias muy superiores a las de los vegetales terrestres. En concreto son capaces de producir lípidos con una eficacia 30 veces superior por unidad de área, comparadas con los cultivos oleaginosos terrestres (Packer 2009) Es por ello que son organismos que resultan muy interesantes industrialmente por las posibles aplicaciones que se les pueda dar, debido a que podrían sustituir a los cultivos en tierra que tantos recursos y área superficial consumen. Además, son capaces de desarrollarse en una gran variedad de medios, donde los cultivos terrestres no serían viables, como por ejemplo: aguas frías/calientes, no potables o incluso salobres, además de cultivo sobre tierras áridas y no arables. Son por tanto definidos como cultivos de tercera generación, los cuales no compiten con los cultivos terrestres por agua ni tierra y tienen un crecimiento más rápido que otros vegetales.

1.2.2 *Microalgas de interés industrial*

La gran inmensidad de especies de microalgas es capaz de dar como productos una gran variedad de biomasa a la que se le pueden dar diferentes aplicaciones muy interesantes como se va a explicar en este apartado. Sin embargo, esta gran diversidad debe de ser gestionada a la hora de realizar los cultivos dependiendo de si se quiere una biomasa mono-específica (cultivos cerrados), o simplemente una biomasa más diversa y dependiente del medioambiente (cultivos abiertos)(Hernández-Pérez y col. 2014). En los apartados siguientes se avanzará más sobre esta cuestión y sobre los parámetros que condicionarán el desarrollo de las microalgas a cultivar.

A continuación, se van a revisar las aplicaciones para las microalgas más prometedoras, que por sus características y productos obtenidos tienen más probabilidades de llegar a una producción a gran escala. Además, se comentarán las especies de algas más relevantes utilizadas en cada aplicación dado el caso:

Nutrición animal y humana

Las algas ya han sido y son consumidas en numerosas culturas. Ejemplo de ello sería la espirulina cultivada por los aztecas en el lago Texoco, como describen las crónicas de los conquistadores Españoles (Habib et al 2008). Sin embargo, ninguna de estas algas se ha podido extraer del cultivo a pequeña escala por la baja productividad y aceptación social, en comparación con los cultivos tradicionales.(Torres-Tiji y col. 2020)

A pesar de ello, en los últimos años se han publicado una gran cantidad de estudios donde se da buena cuenta del gran potencial nutritivo que tendrían las algas. En concreto, se habla de ciertas especies de algas, como la *Arthrospira platensis*, que podrían contener en su biomasa hasta un 70% de proteínas. A su vez, las microalgas son capaces de sintetizar todos los aminoácidos, así, se proporciona a la dieta humana de ciertos aminoácidos esenciales que son difíciles de adquirir por las vías alimenticias convencionales. Otro tipo de nutriente indispensable para la nutrición humana, como son los lípidos y los ácidos grasos, pueden ser acumulados por las algas a muy altos niveles. Algunas especies como la *Auxenochlorella protothecoides* pueden llegar a acumular hasta un 70% de lípidos en su biomasa en seco. En general, las microalgas pueden contribuir en buena medida a la nutrición humana y animal si se utilizan como complementos a las dietas convencionales. Es decir, las microalgas son una fuente rica en carbohidratos, lípidos, proteínas y fibras (Grubišić y col. 2019).

Sin embargo, no todas las especies de algas son aptas para el consumo humano. El principal criterio que se toma a la hora de reconocer a una especie como segura es el GRAS, del inglés *Generally Recognised As Safe* (Generalmente reconocidas como seguro).(U.S. Food and Drug Administration, 2018) En EEUU es un estatus otorgado por la *Food and Drug Administration* que puede obtenerse de dos formas. Documentando el consumo humano durante varios años del alga o mediante una serie de estudios que demuestren la seguridad del consumo.

Actualmente, muy pocas microalgas son reconocidas como GRAS ya que, se requiere de cierta inversión de tiempo y dinero por parte de los interesados para obtener la certificación. Algunos ejemplos de especies de microalgas que tienen este estatus son *Arthrospira platensis*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Auxenochlorella protothecoides*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella bardawil*, and *Euglena gracilis*.

Actualmente, el mercado de las microalgas para alimentación humana es difícil de estimar, debido a la gran variedad de cultivos y en concreto al pequeño volumen de producción. Aun así, se estima que tiene un mercado anual de 6.7 billones de USD. Esta cifra tenderá a incrementarse con los años gracias a la optimización de los métodos de cultivo, así como las mejoras en ingeniería genética que permitirán incrementar las capacidades y las propiedades de los cultivos (Torres-Tiji y col. 2020)

En cuanto a las especies más conocidas para su uso en alimentación humana se tiene como ejemplo a la *Spirulina*, la cual, es la biomasa obtenida de la producción de cianobacterias del género *Arthrospira sp.* Esta es usada por su alto contenido en proteínas y su excelente valor nutricional. También es una fuente muy valiosa de ácido linoleico, un ácido graso esencial que no puede ser sintetizado por el cuerpo humano. Se suele comercializar en forma de polvos o galletas de color verde, que no tienen mucho atractivo comercial.

Por otra parte, en alimentación animal se suelen utilizar especies que no han sido reconocidas como GRAS o que no pueden ser asimiladas por los humanos. Es el caso de la *Chlorella vulgaris* ya que actúan como un buen complemento alimenticio, mejorando el desarrollo y la fertilidad de los animales (Hernández-Pérez y col. 2014)

Pigmentos

El uso de pigmentos de origen natural como colorante alimenticio y para la industria cosmética también abre el mercado a las microalgas, compitiendo con los colorantes de origen sintético, los cuales están relacionados con problemas de salud como el TDAH (Grubišić y col. 2019). En concreto los pigmentos presentes en las microalgas se pueden agrupar en tres categorías, clorofilas, carotenoides y ficobiliproteínas.

La clorofila es un pigmento esencial utilizado en numerosos productos, sobretudo en la industria cosmética y farmacéutica, en productos de higiene íntima. Particularmente, la *Spirulina* es utilizada como un sustituto de colorante proclorofila sintetizada artificialmente.

En cuanto a los carotenoides, estos son utilizados como colorantes alimenticios y como suplementos para humanos y piensos animales. El famoso β -caroteno puede ser encontrado en la *Dunaliella salina*, la cual puede acumular hasta un 14% de este en su biomasa cuando se hace crecer en condiciones de alta salinidad e intensidad lumínica adecuadas (Grubišić y col. 2019).

Por último, las ficobiliproteínas son pigmentos utilizados por sus propiedades fluorescentes como biomarcadores fluorescentes altamente reactivos, también para su uso en coloración alimenticia y por sus alto potencial en medicina. Estos pigmentos pueden ser producidos

por microalgas del género *Porphydrium sp.*, obteniéndose en su biomasa pigmentos como la B-ficoeritrina y R-ficoeritrina, utilizadas en confitería (tartas, helados y gelatinas), además de su uso extensivo en inmunología clínica.

Biocombustibles

Como ya se ha explicado, las microalgas son capaces de producir biomasa en grandes cantidades y con unas eficiencias superiores a las cosechas terrestres. Esto, unido a los numerosos productos que se pueden extraer de su biomasa, ha conseguido que se realicen una gran cantidad de estudios que buscan lograr el uso de las microalgas como combustible. Además, el hecho de que las microalgas sean capaces de fijar y tolerar el CO_2 atmosférico disuelto en las aguas, hace que los biocombustibles producidos puedan ser considerados como neutrales en el ciclo del carbono, y por tanto colaborar en la disminución de los gases de efecto invernadero. (Grubišić y col. 2019)

Los principales usos que se le puede dar a la biomasa como materia prima para la producción de biocombustibles es en la obtención de **biogas, biodiésel, bioetanol, biohidrógeno**, y por último, la simple **combustión de la biomasa** para obtener energía térmica.

La producción de **bioetanol** mediante la biomasa producida por las microalgas se lleva a cabo por fermentación de los carbohidratos presentes las estructuras celulares de estas, principalmente almidón y celulosas. Estas deben ser hidrolizadas por enzimas para obtener azúcares fermentables. Seguidamente, se produce la fermentación alcohólica donde se obtiene el bioetanol, después de un proceso de extracción que encarece la operación. Sin embargo, las microalgas tienen como ventaja que tienen biopolímeros estructurales más simples que las plantas terrestres, además de que por ingeniería genética se les puede inducir a activar por sí solas las enzimas para hidrolizar los carbohidratos sin tener que recurrir a enzimas específicas, todo esto sin mencionar las ventajas comentadas anteriormente. Además existe otro procedimiento que simplifica el proceso de obtención del bioetanol, ya que se realiza directamente desde el propio caldo de cultivo, este tiene que ver con la fermentación en condiciones anaeróbicas y de oscuridad que pueden llevar a cabo, por ejemplo, en microalgas del género *Chlamydomonas* o *Chlorella*. Estas llevan a cabo ciertas rutas catabólicas en las que los polisacáridos en las propias células son transformados directamente a etanol, ahorrando las etapas de hidrolización, y manteniendo a las microalgas vivas.

Como se ha explicado en el apartado 1.2.1 las algas pueden ser capaces de acumular grandes cantidades de lípidos en su biomasa. Varios estudios sugieren que las productividades de **biodiesel** proveniente de microalgas podrían ser entre 10 a 20 veces más grandes que con cultivos oleaginosos convencionales (Grubišić y col. 2019). Sin embargo, la cantidad de aceite algal producido puede depender según la especie, el estrés del cultivo, y factores ambientales y nutricionales.

Hay estudios que afirman que cuando las microalgas son sometidas a condiciones de baja concentración de nitrógeno, el metabolismo de algunas especies conduce a la acumulación masiva de lípidos. El proceso de obtención de los aceites empezaría por la cosecha

de la biomasa algal, seguida de un proceso de rotura celular. Seguidamente, se separan los lípidos utilizando diferentes técnicas como el CO_2 supercrítico, disolventes, o una transesterificación directa. Este último paso va seguido de la separación del biodiésel y los subproductos. Este biocombustible tiene hasta un 78 % de reducción de las emisiones de CO_2 , en comparación con el proveniente del petróleo (Hernández-Pérez y col. 2014), sobretodo si se combina con la secuestración del CO_2 proveniente de los gases de procesos emisivos, y el aprovechamiento de los subproductos.

El **biogas** es también un producto que puede ser obtenido a partir de la digestión anaerobia de la biomasa algal. Este proceso consiste en la degradación bioquímica de materia orgánica compleja, que da como resultado una producción de biogas compuesta mayoritariamente por metano, pero también por CO_2 y otros gases que pueden ser utilizados para otros procesos, incluidos los relacionados con el cultivo de microalgas y la producción de más biocombustibles (Grubišić y col. 2019)

Otro producto muy interesante que puede obtenerse a partir de las microalgas es el **biohidrógeno**. Este vector energético puede ser producido en determinadas condiciones por un selecto grupo de microalgas que han evolucionado para absorber la energía solar e hidrolizar el agua. Sin embargo, aunque pueda parecer un proceso atractivo, ya que compite con técnicas más costosas energéticamente como la electrólisis, se necesitan de mayores esfuerzos en investigación para poder demostrar la viabilidad de una producción a escala industrial.

Por último, se ha planteado también la utilización de la biomasa directamente para obtener energía térmica por **combustión**. Esta sería un último recurso que serviría para aprovechar todos los subproductos o la biomasa que no pudiera ser aprovechada en ningún proceso más. Además, de que sería como ya se ha comentado anteriormente neutral para el ciclo del carbono.

Biofertilizantes

Los residuos de la producción de biogas o de la pirólisis de la biomasa pueden ser utilizados como ricos fertilizantes para la agricultura por su gran contenido nutricional. Entre sus nutrientes se encuentran en gran cantidad potasio, fosfatos y compuestos minerales.

Biomateriales PHA (REVIEW BUENA)

Existen ciertos tipos de cianobacterias capaces de producir polihidroxialcanoatos (PHA), unos poliésteres lineales utilizados como bioplástico. Son muy apreciados por sus propiedades mecánicas, similares a las del polipropileno, pero también por su biocompatibilidad, termoplaticidad, hidrofobicidad y su biodegradabilidad. Estas microalgas son capaces de producir estas moléculas como compuestos de almacenamiento intracelular de carbono, la clave está en que son fotoautótrofas y solo necesitan del carbono aportado por el medio para producirlo(Grubišić y col. 2019).

En cambio, la forma convencional de producción de PHA que se realiza mediante bacterias. Estas bacterias del género *Escherichia coli* y *Cupriavidus necator* tienen como desventaja que necesitan de grandes cantidades de carbono, en forma de biomasa para la producción de PHA, ya que son heterotróficas, lo cual aumenta enormemente los costes de producción. Las cianobacterias tienen un gran potencial en la producción de PHA si se utilizan carbono proveniente de CO₂ de emisiones, sin embargo, la producción de PHA utilizando biomasa variada de otras fuentes puede llevar a una contaminación y a la destrucción del medio de cultivo. El cultivo de estos bioplásticos puede ser eficaz si se utilizan métodos como restricción de ciertos nutrientes, y el fomento de las microalgas a producir PHA mediante precursores in vitro.

Tratamiento de aguas residuales (fitorremediación)

Las microalgas, en las condiciones adecuadas, han demostrado una gran capacidad fitorremediadora (depuradora) de aguas residuales, la cual consiste en el uso de algas para la remoción o transformación de contaminantes desde aguas residuales y un medio gaseoso.

Uno de los parámetros que puede ser reducido eficazmente es la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). La eficiencia depende de distintas variables que dependen de los valores ambientales. En general en aguas residuales urbanas consiguen valores inferiores de reducción de la DBO que en tratamientos con lagunas de estabilización y microalgas. Por su parte, la DQO puede presentar reducciones e hasta un 91 % en tratamientos con *Chlorella sp.*, estas microalgas consumen más rápidamente los compuestos orgánicos de las aguas, además del CO₂ atmosférico.

Otro parámetro que puede ser fácilmente controlado por las microalgas es la concentración de nitrógeno y fósforo, esto es debido a que estos elementos son nutrientes esenciales en la formación de biomasa, por lo que incorporan moléculas presentes en el agua contaminada como el amonio, nitritos, nitratos y fosfatos.

Un aspecto importante en el tratamiento de aguas residuales es la eliminación de los metales pesados, sobre todo si se trata de aguas de origen industrial (Piotrowska-Niczyporuk et al. 2012). Es un aspecto clave en el tratamiento ya que la presencia de metales pesados en el agua conlleva intoxicaciones. La remoción de metales pesados puede adquirir grandes eficacias cuando se hace uso de microalgas. (Hammouda et al. (1995)) determinaron una remoción del 100 % utilizando *Scenedesmus* y *Chlorella* para Mn, 96,5-98 % para Fe, 77,4-85 % para Zn, 77,5-95 % para Cr, 52,3-64 % para Cd, y 77,3-81 % para Ni.

Los patógenos presentes en las aguas residuales como pueden ser las bacterias *Escherichia coli.*, *Salmonella*, *Shigella*, virus y protozoos, también pueden ser controlados por las microalgas. El principio se basa en que un medio de cultivo favorable para las microalgas es desfavorable para microorganismos patógenos.

El cambio de pH es la causa principal de la eliminación de patógenos, además si se aumenta el tiempo de tratamiento, lo hace también la efectividad (Voltolina et al. 1998). Se han registrado remociones de hasta un 99 %, aun así las concentraciones siguen estando

por encima de los niveles permitidos y se deberían de realizar tratamientos posteriores. (Hernández-Pérez y col. 2014)

Como se ha explicado las microalgas son capaces de tratar las aguas residuales tanto domésticas como industriales con una gran eficacia. Esto unido a la combinación con otros métodos de tratamiento puede conducir a sistemas de tratamiento más optimizados desde el punto de vista energético y de recursos utilizados, ya que se podrían simplificar muchas etapas del tratamiento. Además, los subproductos de estos tratamientos pueden ser incorporados a otras aplicaciones como las explicadas en los anteriores apartados

En conclusión, las microalgas tienen un gran potencial en numerosos campos de aplicación. Existe una gran cantidad de estudios que sugieren que las microalgas son un cultivo económico y ambientalmente favorable. La combinación de los diferentes subproductos de unas y otras aplicaciones daría como resultado una gran sinergia que aportaría una gran relevancia a esta industria emergente.

1.3 Estado del arte

1.3.1 Fotobiorreactores

Como se ha venido explicando a lo largo de la introducción, las microalgas son un cultivo que necesita de luz para poder realizar la fotosíntesis y así generar la biomasa que es buscada como producto. A continuación se van a detallar los tipos de fotobiorreactores (PBRs) más utilizados o que pueden ser más prometedores.

Un PBR es un recipiente cerrado e iluminado, diseñado para la producción de biomasa. (Development). Según el trabajo de (Tsoglin y col. 1996) un fotobiorreactor tiene que seguir estos principios de diseño para operar de forma eficaz:

- El reactor debe permitir el cultivo de varias especies de microalgas
- El reactor debe proveer una iluminación uniforme en toda la superficie del cultivo y una rápida transferencia de materia de CO₂ y O₂
- El diseño del reactor debe prevenir o minimizar el ensuciamiento del reactor, principalmente de las superficies que transmiten la luz
- Se deben alcanzar altas tasas de transferencia de materia sin perjudicar al crecimiento ni a las células del cultivo
- El reactor debe tener la mínima superficie no iluminada posible

1.3.2 *Parámetros de diseño*

Luz

La luz es uno de los factores críticos a la hora de diseñar un PBR. Los parámetros de diseño más importantes respecto a la captura de la luz son la transparencia de los materiales y un elevado ratio área/volumen. Se deben utilizar materiales que satisfagan las condiciones de transparencia como el cristal, plexiglass, y otros tipos de plásticos. Sin embargo, se deben evaluar sus propiedades para la construcción de cada tipo de PBR, según su resistencia mecánica o ductilidad necesarias, y los costes de construcción derivados. Por otra parte el elevado ratio área/volumen se consigue con diseños que se distribuyan eficazmente en el espacio para capturar la mayor intensidad lumínica posible y que se explicarán más adelante. También se debe tener en cuenta el mezclado del cultivo, ya que se pueden dar situaciones en las que las algas de la superficie impidan a las que se encuentran en niveles inferiores recibir la energía solar y por tanto realizar una correcta fotosíntesis. (Wang y col. 2012)

En ausencia de limitación por nutrientes, la fotosíntesis se incrementa con el aumento de la intensidad lumínica, hasta alcanzar la máxima tasa de crecimiento específica para cada especie en el punto de saturación por luz. Seguido esto, se alcanza la fotoinhibición, que desenlaza en la muerte de las microalgas, en pérdida de actividad fotosintética y productividad del cultivo (Hernández-Pérez y col. 2014)

En los cultivos con luz natural se suele producir fotoinhibición durante el día debido a la alta intensidad lumínica. En los cultivos con gran densidad algal, se produce sombreado entre células que contrarresta la fotoinhibición. Esta puede ser reversible o irreversible, dependiendo de la intensidad recibida y durante cuanto tiempo. La fotoinhibición puede conllevar una reducción de la actividad fotosintética y de la productividad. Se contrarresta utilizando sistemas de mezclado eficientes.

Otro aspecto a considerar es la respiración celular que se lleva a cabo en el ciclo oscuro de la fotosíntesis. En esta las microalgas utilizan los metabolitos producidos durante el día para soportar su falta de energía solar, con la consiguiente reducción de la producción de biomasa. Es por ello, que los ciclos oscuros deben ser minimizados al máximo. Además, se ha encontrado que la producción de biomasa de las algas sometidas a ciclos cortos de luz/oscuridad no se ve tan afectada. (Wang y col. 2012)

Temperatura

Cada cultivo de biomasa algal tenderá a aumentar su productividad hasta una temperatura óptima, por encima de la cual se reducirá la productividad global, como consecuencia de el excesivo aumento de la fotorrespiración. En general esta temperatura, aunque varía entre especies, se encuentra entre 28 y 35°C. (Hernández-Pérez y col. 2014) Por las condiciones de espacio y de luz requeridas para el cultivo, se supone que el PBR se encontrará en el exterior y que dependerá de las condiciones climatológicas, según la temporada y la hora del día. Es por ello, que es de suma importancia desarrollar sistemas adecuados para el control de temperatura del PBR. Se ha demostrado que los PBRs sin control de la temperatura pueden alcanzar temperaturas de entre 10-30°C más alta que la temperatura ambiental, con el consiguiente efecto en el cultivo. (Wang y col. 2012)

Algunos mecanismos para la refrigeración del reactor son la sumersión de parte del cultivo en agua o en un intercambiador de calor. Por ejemplo se han empleado sistemas con rociadores de agua, inmersión en piscinas, el uso de invernaderos, etc. (Hernández-Pérez y col. 2014)

Gases: CO_2/O_2

El CO_2 es la principal fuente de carbono utilizada por las microalgas fotoautótrofas para desarrollar su crecimiento celular, por tanto este es un factor limitante si se encuentra a bajas concentraciones en el gas de alimentación o cuando el mezclado no es eficiente. Además altas concentraciones de CO_2 también podrían conllevar una reducción del pH del cultivo y podría ser inhibidor para algunas especies de algas. Además, el uso de CO_2 puede tener costes considerables cuando se habla de un cultivo comercial. Es por ello, que se ha propuesto utilizar gases ricos en CO_2 de otros procesos generadores de este para, así, mitigar el impacto ambiental a la vez que se reducen los costes económicos. (Hernández-Pérez y col. 2014)

El O_2 puede ser competitivo respecto al CO_2 en algunas ocasiones. En condiciones normales la fotosíntesis consume CO_2 y libera O_2 como subproducto. Sin embargo la misma enzima que emplea el CO_2 para el ciclo de Calvin, también puede utilizar el O_2 para realizar la fotorrespiración, la cual consume O_2 y produce CO_2 . Esto puede llevar a una inhibición de la producción de biomasa, sobre todo en zonas del PBR donde el oxígeno tiende a acumularse. Además esta situación puede tener efectos tóxicos en las microalgas, ya que la acumulación de especies oxidantes reactivas puede dañar las membranas y otros componentes de las células algales. (Wang y col. 2012)

Para evitar estos problemas y mantener un balance óptimo entre las concentraciones de O_2 y CO_2 , se suelen diseñar PBRs con un intercambiador de gases o con un correcto mecanismo de mezclado, el cual promueva flujos turbulentos y por tanto, una mayor transferencia de materia entre las fases líquida y gas.

pH

El pH es un parámetro muy importante a controlar en un cultivo algal, ya que una variación ligera de este podría conducir a un colapso total del cultivo debido a la disrupción de los mecanismo celulares. El rango óptimo de pH varia ampliamente entre especies, pero el rango de pH en los cultivos más comunes esta entre 7-9.

En los cultivos que utilicen aire enriquecido con CO_2 o CO_2 puro como fuente principal de carbono, el pH se verá severamente reducido por culpa de la acidificación del medio. Es por ello, que se necesitan de mecanismo de control del pH. Se suelen incorporar en el propio sistema de aireación, dispensadores de soluciones ácido y base para controlar las variaciones, además de encontrarse PBRs con sistemas de inyección de aire automatizados. (Wang y col. 2012)

Mezclado

Como se ha visto con los parámetros anteriores, se ven afectados por la falta de mezclado, y es que este es un aspecto crítico a tener en cuenta en el diseño. El mezclado es necesario ya que contribuye a:

- Prevenir la sedimentación de las microalgas
- Asegurar que toda la población tiene acceso a luz y nutrientes
- Evitar las estratificaciones térmicas
- Mejorar el intercambio de gases entre el medio de cultivo y el aire ambiental

Este parámetro se controlará de distintas formas según el tamaño y el tipo de PBR. Se puede llevar a cabo por métodos como aireación, bombeo, agitación mecánica o con diversas combinaciones de estos. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que no todas las algas son capaces de soportar los altos esfuerzos cortantes generados por algunos tipos de mezcladores y que pueden provocar reducciones del crecimiento y de la actividad metabólica. (Wang y col. 2012)

Control de especies y Esterilidad

Dependiendo de la finalidad que tenga la biomasa producida, se necesitarán unas condiciones de esterilidad, en el caso de los cultivos para la producción de biocombustibles estas serán menos exigentes. Aun así se debe de tener en cuenta el riesgo de la pérdida del cultivo por contaminación de organismos heterótrofos que consuman las microalgas. Sin embargo, los PBRs al estar cerrados no tienen tanto riesgo de sufrir este tipo de contaminaciones. En el caso de producirse alguna contaminación se debería de rechazar el cultivo o tratarlo utilizando métodos físicos como la centrifugación, filtración, baja concentración de oxígeno disuelto (OD) / alta carga orgánica y tratamientos químicos, como aplicación de hormonas miméticas contra invertebrados, aumento de pH y concentración de amonio libre. (Hernández-Pérez y col. 2014)

La esterilidad también se garantiza manteniendo una adecuada limpieza del biorreactor, es crítica por las siguientes razones:

- Prevenir de la formación de un biofilm en las paredes del biorreactor que impidan la transmisión de la luz
- Minimizar las posibilidades de contaminación

Para aumentar la capacidad de limpieza de los PBRs se siguen los siguientes principios en el diseño:

- Una superficie interna del PBR lisa
- Minimizar el número de componentes internos y de curvas
- Tener unas dimensiones internas lo suficientemente grandes para poder limpiarlo

1.3.3 Tipos PBRs

Estanques

El cultivo en estanques, figura 1.1, o como es conocido en inglés *Raceway ponds* (Estanque en circuito), es el PBR más sencillo de construir y de operar, sin embargo, estos no son considerados del todo PBR ya que no operan en condiciones controlables y se encuentran abiertos al exterior. Consisten en un canal distribuido en forma de circuito a lo largo de un área determinada. Estos pueden ser construidos en cemento o cubriendo con plástico o material impermeable el hueco que ocupa el circuito. Es muy importante que la profundidad del circuito sea baja, ya que se debe permitir el paso de la luz teniendo en cuenta que el cultivo en su máxima capacidad interferirá el paso de la luz. A lo largo del circuito se instala una paleta que se encarga de circular a lo largo del estanque promoviendo el flujo del cultivo de las partes más profundas a la superficie, favoreciendo la fotosíntesis.

Pueden operar de forma continua o discontinua. Son un sistema que ya se ha empleado varias veces a lo largo de la historia, los ejemplos más recientes a escala industrial son estanques circulares agitados mediante una paleta rotatoria usados en Japón, Taiwán e Indonesia para *Chlorella*. En estos la paleta solo agita una parte del canal, con el consiguiente ahorro energético y de mantenimiento que supone (Hernández-Pérez y col. 2014).

La principal ventaja de estos sistemas es que son fáciles de construir, ya que requieren de poca infraestructura como se ha explicado antes. Además su mantenimiento es muy básico, a menos que se quiere tener un mayor control del cultivo. En consecuencia, serán más baratos.

Como principal desventaja, se encuentra la exposición al medio del cultivo, con los problemas que puedan existir. Entre ellos se puede encontrar la gran variabilidad estacional de la

productividad y la posible contaminación del cultivo, además de la existencia de zooplankton pastoreador que pueda depredar el cultivo (Hernández-Pérez y col. 2014). Para evitar esto, algunas variaciones de los estanques en circuito se cubren de barreras transparentes o translúcidas como si de invernaderos se tratase, aumentando así la productividad a lo largo del año y evitando la contaminación del cultivo (Singh y col. 2012). A pesar de ello, factores como la baja accesibilidad de las algas a la luz, la evaporación y la necesidad de grandes extensiones de terreno son difícilmente evitables. Es por ello que se cree que este tipo de sistemas ya han alcanzado su máximo desarrollo (Hernández-Pérez y col. 2014)

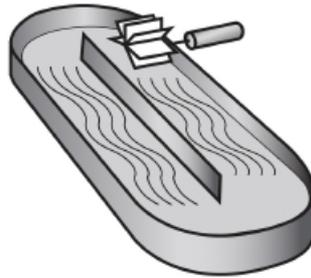


Figura 1.1: Estanque para el cultivo abierto de microalgas (Hernández-Pérez y col. 2014)

Columnas

Son tanques, usualmente de forma cilíndrica, con radios de hasta 0.2 m. y alturas de hasta 4 m. Se construyen en materiales transparentes como vidrio, plexiglass, policarbonato, etc. para permitir el paso de la luz. Tienen radios pequeños para conseguir un elevado ratio de área/volumen. Son sencillos de construir ya que están formados de unas pocas partes modulares y no tienen ninguna parte móvil ni compleja a excepción del aspersor de gas. (Figura 1.2)

La transferencia de materia se lleva a cabo gracias a la distribución mediante difusores de gas situados en la parte inferior de la columna. Así se consigue que a lo largo de toda la altura de la columna se transfiera el CO_2 a las microalgas, a la vez que se consigue una ligera agitación que les permite alcanzar la zona fótica y conseguir irradiación lumínica de la superficie del cilindro. Cabe decir, que la eficiencia fotosintética y el mezclado estarán relacionados inversamente con el flujo de gas procedente del aspersor. (Sirohi y col. 2022)

Existe otra variante conocida como columnas *Airlift*, figura 1.3, las cuales están formadas por una sección donde se difunde el aire que hace elevarse el cultivo hasta la superficie donde se evacúa el aire. El cultivo desgasificado desciende por otra sección ahora iluminada para llegar otra vez al aspersor de gas. Este diseño tiene como ventaja que se da así un circuito circular en el que las algas pasan por una zona fótica a una oscura. Existen varios diseños, tubular, rectangular o anular (una sección dentro de la otra). Con este esquema se da un efecto fotosintético más brusco aumentando así su rendimiento y consiguiendo un mejor mezclado debido al sistema *Airlift*. (Singh y col. 2012)

En general, los PBRs de *Airlift* pueden llevar a cabo una mejor producción de biomasa de diferentes microalgas en comparación con otros PBRs de columna vertical, probablemente debido a un mejor mezclado. (Wang y col. 2012)

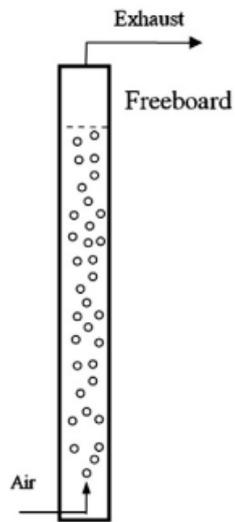


Figura 1.2: Columna de burbujas (Sirohi y col. 2022)

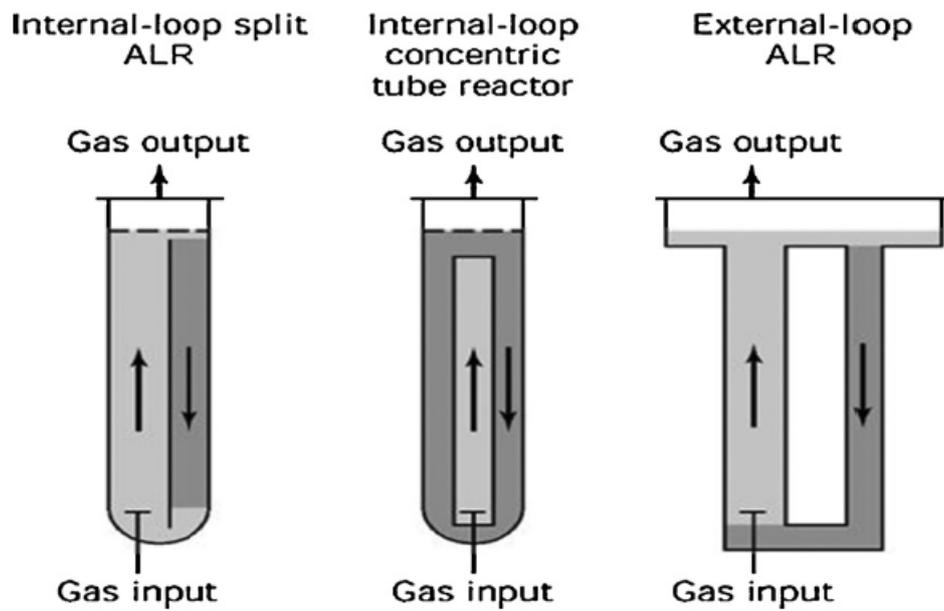


Figura 1.3: Diferentes diseños de biorreactores *airlift* (Singh y col. 2012)

PBRs de paneles planos

Los fotobiorreactores de paneles planos son PBRs con un recorrido lumínico muy corto y que están caracterizados por un elevado ratio superficie/volumen iluminado. En general, los espesores de panel más delgados tienen un recorrido óptico menor y por tanto todas las microalgas del cultivo pueden obtener energía lumínica y realizar la fotosíntesis eficazmente. Sin embargo, la construcción de paneles más pequeño dificulta el diseño e incrementa los costes. Otro factor que se debe de optimizar es la posición respecto al sol, para ello se deberá de encontrar la inclinación ideal dependiendo de la latitud. (Wang y col. 2012)

La estructura de estos PBRs está compuesta de paneles a los que se les suministra gas por su parte inferior mediante difusores, estos favorecerán la transferencia de materia a las microalgas a la vez que se mantiene un régimen de agitación. Existen también, sistemas que realizan la agitación mecánicamente mediante bombas o agitadores.

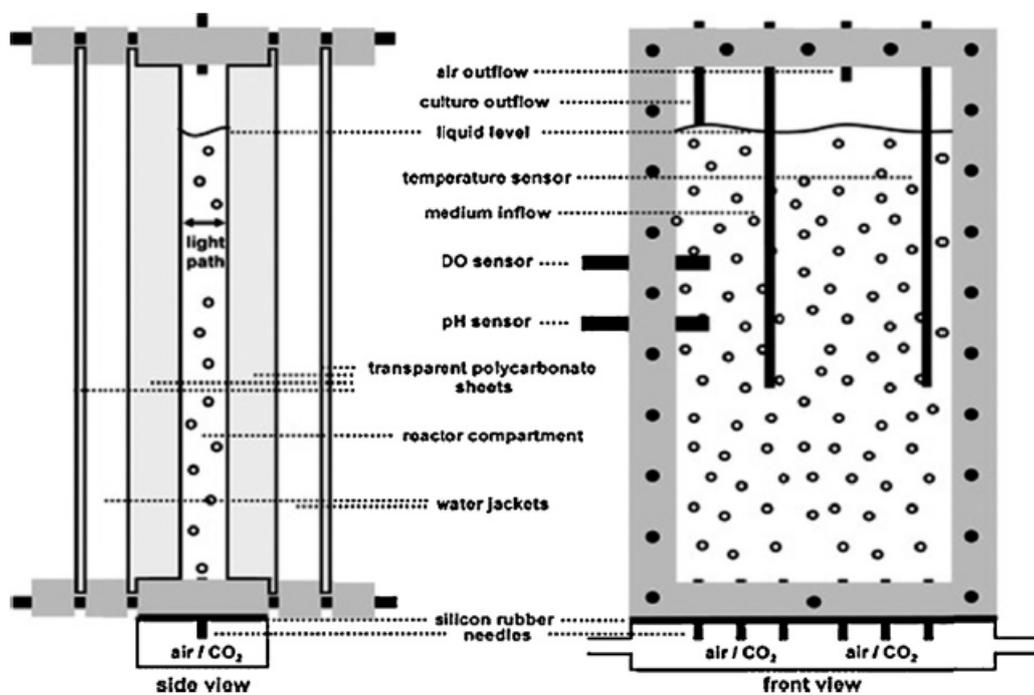


Figura 1.4: Vista frontal y lateral de un PBR de paneles planos (Singh y col. 2012)

PBRs tubulares

Este tipo de PBRs están constituidos principalmente por un sistema de tubos que ocupan un determinado volumen. Son el esquema más ampliamente utilizado a la hora de construir PBR, que consiguen una gran área iluminada y son bastante caros debido a la compleja infraestructura a mantener.

Los tubos están contruidos en cristal o en plástico transparentes para permitir el paso de la luz y pueden disponerse de muchas maneras orientaciones. Existen PBRs tubulares dispuestos en horizontal, en forma de bucle o con diferentes tubos que llegan a un mismo

colector, también se pueden disponer en forma de bobina o con una disposición helicoidal. La disposición del tubo helicoidal en vertical es la más eficiente ya que permite ocupar un mayor volumen en un área menor, permitiendo así aprovechar el espacio y recoger más energía lumínica. Para mejorar la irradiación, se pueden incluir superficies reflectantes entre los tubos que permitan aprovechar mejor la energía lumínica disponible. (Grubišić y col. 2019)

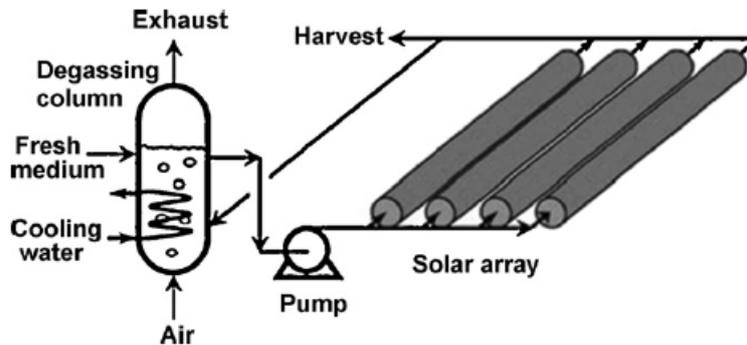


Figura 1.5: Diseño de un PBR tubular dispuesto horizontalmente (Singh y col. 2012)

El cultivo es recirculado utilizando bombas y sistemas de bombeo de aire. El PBR está constituido por dos partes principales, una tubular que es donde tendrá lugar la etapa fotosintética, y otra donde se encontrarán los servicios auxiliares para bombear, cosechar y mantener el cultivo en operación.

En este tipo de PBRs, el cultivo tiene como principal desventaja la baja transferencia de materia que se da al escalar los reactores a partir de uno piloto. Es por ello, que se debe de intentar construir con una longitud de tubos lo más corta posible para asegurar la correcta transferencia de materia CO_2 necesaria para las algas, ya que sino se puede obstaculizar la fotosíntesis. Otro aspecto importante de los tubo es el diámetro, el cual afecta al régimen lumínico de las algas, un diámetro de 0,1 m. o menos es necesario para que las microalgas no se oscurezcan entre si. Por otra parte, se ha que tener en cuenta a mayor diámetro mayor volumen ocupará el reactor.

PBRs flexibles

Estos PBRs al contrario de los anteriores utilizan estructuras flexibles, suelen estar contruidos en pequeños módulos y son por tanto más fáciles de trasportar. A pesar de que son flexibles, se construyen en materiales resistentes a las presiones y los diferentes daños que podrían soportar en condiciones de uso normales. Suelen estar contruidos en acetato de vinilo, polietileno (PE), politetrafluoroetileno (PTFE). Sin embargo, al estar contruidos en tantos módulos y en forma de bolsa, poseen muchas zonas muertas, lo que conlleva una menor producción de biomasa. Además, que el coste de agitación, debido a su diseño es muy elevado. Es por ello que estos PBRs se construyen para producciones más pequeñas y económicas, además de en combinación con otro tipo de PBRs. (Sirohi y col. 2022)

PBRs de membrana

El uso de membranas para fijar las microalgas tiene numerosas ventajas. La elevada área superficial de las membranas facilita la transferencia gas/líquido, además se protege a las células de los esfuerzos cortantes producidos por la circulación y el bombeo y que pueden dañarlas. Además son capaces de separar los metabolitos extracelulares producidos para poder cosecharlos posteriormente por separado. (Wang y col. 2012)

PBRs híbridos

Los fotobiorreactores híbridos tienen la capacidad de combinar distintas configuraciones para conseguir sinergias entre ambos sistemas y aprovechar todas las ventajas. Por ejemplo se diseñó un PBR (Fernandez et al 26, Development) que combinaba una configuración tubular en bucle, con una columna *airlift*. La primera área del PBR actuaba como la zona fótica donde se producía el crecimiento de cultivo, ya que se tenía un elevado ratio área/volumen. Por otra parte, la columna *airlift* actuaba como una zona de intercambio de gases y para el control del medio de cultivo. Se consiguieron unas productividades más elevadas, así como un mejor control del cultivo en comparación con las configuraciones por separado. Otro ejemplo sería la combinación de estanque con otros diseños de PBRs cerrados, por un lado se tiene a el PBR cerrado que proporciona un mejor control del cultivo y un mejor crecimiento de la biomasa, por otro, el estanque permite someter a las microalgas a estrés nutricional para que tiendan a acumular ciertos metabolitos (Sirohi y col. 2022). Combinando ambos sistemas se consigue mayor eficiencia técnica y económica.

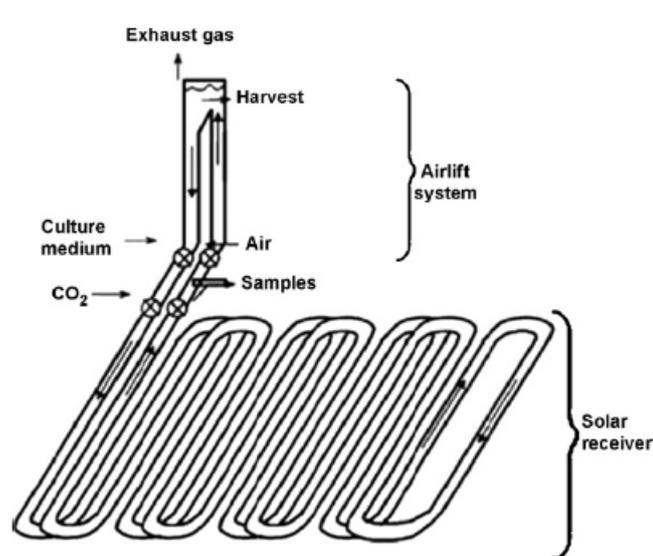


Figura 1.6: PBR tubular en hélice (Singh y col. 2012)

Conclusión

Los PBRs son una gran alternativa a los cultivos en estanque o en entornos naturales. Tienen un gran control de los parámetros de proceso y de la cosecha. Son efectivos en el control del cultivo y en la reducción de la contaminación. (Sirohi y col. 2022) Como se ha visto existen una gran variedad de PBRs, en concreto los PBRs de paneles planos y los tubulares son los PBRs más prometedores para llevar a cabo un proceso industrial, ya que consiguen grandes áreas iluminadas y un control eficaz. Sin embargo, los costes de mantenimiento son mayores, además se requiere de un detallado conocimiento de la distribución lumínica, transferencia de materia, escalabilidad y de la biología de las propias microalgas. (Wang y col. 2012). Ninguna de las configuraciones por sí sola consigue cumplir los requerimientos anteriores- En cambio, los PBRs híbridos han demostrado ser eficaces en la producción de biomasa algal en comparación con los diseños sencillos por la capacidad de combinación de las ventajas de diferentes configuraciones de PBRs. (Singh y col. 2012)

1.3.4 Cosechado

Una vez conseguido una concentración de biomasa algal en el medio de cultivo es necesaria una operación de cosechado para poder extraer la biomasa y darle un valor de mercado. En primer lugar, el proceso de cosecha estará influido por el uso que se le quiera dar a la biomasa. Otro aspecto a tener en cuenta es encontrar el método que resulte más eficiente y que consiga extraer la mayor cantidad de biomasa.

Métodos químicos

Coagulación/floculación

Este método es uno de los principales planteamientos a la hora de conseguir una optimización económica de la cosecha de microalgas. Se suele aplicar a grandes volúmenes de cultivos. Además, puede ser aplicado a una gran variedad de especies. Consiste en concentrar la suspensión de biomasa en el caldo de cultivo entre 20 a 100 veces. Se incrementa el tamaño de partícula para poder separarla por métodos físicos, optimizando así estas últimas etapas. La coagulación/floculación puede definirse como la coalescencia de partículas finamente divididas en suspensión en agregados más grandes seguido de la aglomeración de estos en flocúlos más grandes que se asientan en el fondo del recipiente, dejando un sobrenadante en la superficie del caldo de cultivo. (Barros y col. 2015)

Se añaden químicos para conseguir agregar las células de las microalgas y que se produzca la floculación. Se basa en que las células están cargadas negativamente y se repelen entre ellas, al añadir sales metálicas como el cloruro férrico, las cargas se neutralizan causando un agregado. También son utilizados floculantes orgánicos. Seguidamente, se utilizan coagulantes que pueden ser polímeros o coagulantes férricos o alúminicos para concentrar las partículas. (Tan y col. 2018)

Este método también puede darse de forma natural en procesos conocidos como autofloculación. El primero se da con los cambios de pH, al incrementarse de forma natural, debido

a que las algas eliminan el CO₂ del medio de cultivo. Esto provoca que las microalgas en medios más básicos formen nuevos inones y se estructuren de manera que pueden acelerar su sedimentación. Este efecto se puede conseguir de manera artificial añadiendo NaOH al medio de cultivo.

Finalmente, es conocido el efecto de la biofloculación, producido por algunas especies de microalgas, las cuales sintetizan por sí solas biopolímeros que les permiten formar agregados mayores más fáciles de precipitar, (Barros y col. 2015)

Métodos físicos

Flotación Una vez obtenida una biomasa algal lo suficientemente concentrada se puede cosechar mediante el método de flotación. En este se cosecha la biomasa que ha conseguido flotar por sí sola, usualmente cuando tiene un gran contenido de lípidos, o se le aplican sistemas que consigan flotabilizar las microalgas.

Cuando la biomasa no se consigue flotabilizar por sí sola se suele utilizar sistemas de burbujeo de aire en una unidad cosechadora que consiguen elevar la biomasa a la superficie. Se puede conseguir mediante burbujeo de aire por un difusor poroso al medio de cultivo, así las pequeñas burbujas acaban elevando la biomasa a la superficie. Otro diseño utilizado es la disolución de aire en el medio de cultivo, esto se consigue difundiendo aire en forma de pequeñas burbujas en un rango de 10 a 10 μ m para conseguir dispersar y coagular aún más las células de las microalgas, a la vez que las eleva hasta la superficie. (Tan y col. 2018). Estos métodos requieren de energía y de aire en grandes presiones para poder llevarse a cabo.

Sedimentación Este método podría considerarse la inversa a la flotación, ya que se recoge la biomasa en el fondo de la unidad de cosecha. Este método se considera muy económico ya que no se requiere de ningún reactivo ni de energía para recoger la biomasa. Tan solo es necesario esperar a que las partículas de biomasa sedimenten en un tanque construido para tal propósito, lo que lleva a la principal desventaja, la cual es el elevado tiempo de espera que se puede dar en algunas microalgas para sedimentar completamente. Usualmente los cultivos con una gran densidad son fáciles de sedimentar por gravedad, así como los que tienen una gran densidad algal. En los casos en los que no sea posible una sedimentación rápida se puede aumentar la eficacia utilizando tanques de láminas utilizados comúnmente en estos casos.(Barros y col. 2015)

Filtración Cuando se trata de separar la biomasa coagulada del medio de cultivo líquido la filtración es uno de los métodos más utilizados. Se necesita una caída de presión a lo largo del sistema para forzar el fluido a correr por la membrana o el filtro a utilizar. La principal desventaja es la acumulación de biomasa que tiende a hacerse más gruesa y a incrementar la resistencia a la filtración. Esta técnica se suele utilizar en pequeñas producciones para separar biomasa de algas filamentosas o que tengan tamaños relativamente grandes (>70 μ m). Tamaños inferiores requieren técnicas de ultrafiltración (UF) y microfiltración (MF). (Tan y col. 2018)

La acumulación antes mencionada en membranas de UF y MF requiere de lavados regulares con lo que no se pueden construir sistemas continuos, sino que se necesitan de duplicados o de pausas de mantenimiento. Los principales costes de este diseño estan relacionados con el bombeo hidráulico y los reemplazos de membranas.

Centrifugación La centrifugación es el método de cosecha más rápido, pero también el más caro debido al alto coste energético, lo cual limita su aplicación a productos con un alto valor añadido como ácidos grasos insaturados o productos farmacéuticos.

Los sistemas de centrifugación son capaces de cosechar la gran mayoría de microalgas, en algunos casos son capaces de trabajar como el único método de cosecha, en otros se utilizan para preconcentrar la biomasa. Si se utiliza en combinación con otros métodos como la coagulación/floculación se puede conseguir una reducción del consumo energético. (Barros y col. 2015)

Electrocoagulación Este método consiste en la coagulación de la biomasa por una oxidación electrocatalítica. Se basa en que como las algas están cargadas negativamente, cuando se les aplica un campo eléctrico estas se pueden acumular en los electrodos o precipitarse.

Se utilizan dos tipos de electrodos, de sacrificio y de no sacrificio. En los primeros los iones metálicos se liberaran en el caldo de cultivo, en consecuencia las microalgas se agregarán en estos iones. En los de no sacrificio las microalgas se acumulan en el ánodo y requiere de lavados. (Tan y col. 2018)

Conclusión

A pesar de que estos métodos permiten cosechar eficazmente las microalgas, sus requisitos energéticos, así como los costes del equipo son muy caros para aplicaciones a gran escala. Se requiere de un correcto escalado de los electrodos, optimizando parámetros como el pH, la temperatura, la agitación, la distancia de los electrodos, el material de construcción. Hablar de como extraer quimicos y lipidos

2 Objetivos

Objetivo principal

El objetivo principal de este trabajo es estimar y diseñar una planta para la producción de 100 kg./día de biomasa de *Nannochlorella gaditana*

Objetivos específicos

mas largoooo y especificado

- Seleccionar del microorganismo más adecuado para el cultivo
- Encontrar un reactor piloto que tenga la mayor productividad
- Escalar el reactor a la producción deseada
- Seleccionar los equipos y las técnicas necesarias para el proceso
- Escalar y dimensionar los equipos al proceso que se va a llevar a cabo
- Calcular los costes de capital de la futura planta
- Contabilizar los costes de operación
- Estimar los costes no conocidos
- Obtener el coste final de producción

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En base a los contenidos tratados en este trabajo, se puede afirmar que se alinea con los siguientes ODS:

- **2. Hambre cero:** producción de biomasa con potencial como superalimento
- **6. Agua limpia y saneamiento:** uso de efluentes de aguas residuales como materia prima
- **9. Industria, innovación e infraestructura:** Desarrollo de una industria pionera que contribuye al crecimiento de la infraestructura
- **11. Ciudades y comunidades sostenibles:** Integración de desechos humanos en el proceso y una producción sostenible
- **14. Vida submarina:** Contribución a la reducción de la sobrepesca al favorecer la piscicultura

3 Selección

En este capítulo se van a explicar los motivos por los que se ha escogido el microorganismo para el cultivo. Para ello, se revisarán sus principales características y propiedades, así como los parámetros más importantes a tener en cuenta en su cultivo. Además, se explicará el reactor piloto elegido y se describirán sus partes principales, así como su funcionamiento y el modo de operación.

3.1 Selección del microorganismo

Una vez revisados los distintos productos que pueden ser obtenidos a partir de microalgas, así como de los diferentes métodos para producirlos y obtenerlos, se puede escoger un microorganismo en concreto capaz de producir en unas cantidades aptas para la producción industrial y que genera productos con alto valor añadido.

En concreto se ha escogido el microorganismo de la especie *Nannochlorepis gaditana* Lubián CCMP 527. Se trata de una microalga planctónica en forma de pequeñas esferas (Figura 3.1) que puede existir en ambientes marinos, por lo que resulta ventajoso su cultivo ya que no compromete las reservas de agua dulce para otros usos. (Pedro y col. 2013)

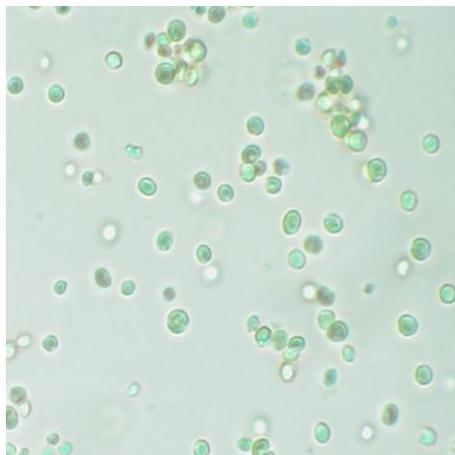


Figura 3.1: *Nannochlorepis* sp. bajo el microscopio, foto de Wageningen University.

Esta especie de microalga es conocida por la elevada producción de biomasa y el alto contenido de lípidos que genera. Esta considerada un alga oleaginosa, es por ello que la producción de lípidos es un criterio fundamental a la hora de escoger esta especie ya que otorga un alto valor añadido a la biomasa producida. (Ma y col. 2014). La especie *Nannochlorepis gaditana*, presenta una elevada productividad de biomasa en menos días de producción que otras especies de su género. Por otra parte, no es la que consigue una mayor producción de ácidos grasos insaturados o de lípidos, pero si que tiene una mayor variabilidad a diferentes condiciones de cultivo, por lo que es capaz de ser utilizada en diversas aplicaciones variando tan solo algunos parámetros de cultivo. (Ma y col. 2014). Además, es de las especies más estudiadas para la realización de PBRs piloto y a plantas de producción a gran escala.

Otro aspecto favorecedor para esta especie es que se puede controlar la acumulación de lípidos en el interior de las paredes celulares controlando un solo parámetro como es la concentración de nitratos (Pedro y col. 2013). En concreto al llevar el medio de cultivo a unas concentraciones de nitratos limitantes las microalgas empiezan a acumular lípidos en sus paredes y se consigue aumentar en grandes proporciones la cantidad de lípidos en la biomasa. Por otra parte, la producción de biomasa se ve afectada, a cambio de un producto de mayor valor.

A la hora del cultivo los principales parámetros que se pueden variar para aumentar la productividad son la salinidad, la intensidad de la luz y el fotoperiodo, a la vez que la concentración de nitrato antes mencionada. En el estudio de Mitra y col. 2015, se encontró que a una salinidad de 0.2 g/L se conseguía la mayor producción de biomasa. Por otra parte, la intensidad de la luz afectaba directamente a la productividad tanto de biomasa como de lípidos, sin embargo se reducía la cantidad de ácidos grasos insaturados. En cuanto al fotoperiodo, se encontró que en un régimen de 12h de luz y 12h de oscuridad al día se conseguía la mayor productividad tanto de biomasa como de ácidos grasos poliinsaturados. De todos los factores, el fotoperiodo se discernió como el más positivo a la hora de la mejora de la cantidad de ácidos grasos. (Mitra y col. 2015)

En conclusión, se ha seleccionado un microorganismo muy versátil con el que se pueden obtener distintos productos con un alto valor añadido en cantidades que podrían ser llevadas a escala industrial fácilmente. Este microorganismo además, presenta unas productividades muy variables dependiendo de ciertos parámetros y has sido ampliamente estudiado, por lo que se poseen numerosas referencias y datos con los que trabajar y poder diseñar un sistema productivo.

3.2 Selección del reactor

Tal y como se ha descrito en el apartado 3.1 cuando se está buscando una producción rentable de algas oleaginosas como la que ocupa este trabajo, es muy importante seguir el criterio de la máxima productividad de lípidos, que son los que aportan un alto valor añadido a este cultivo. Esto está directamente relacionado con la producción de biomasa, y ha sido este el criterio elegido para escoger un reactor piloto con el que trabajar. De todos los trabajos revisados el reactor propuesto por Ación Fernández y col. 2001, fue el que mayor productividad de biomasa, y por tanto de lípidos consiguió. En concreto se alcanzaron unos 0.6 g/L al día de biomasa.

Con este PBR se han realizado dos estudios, en el de Romero Villegas y col. 2017 se utilizaba CO_2 proveniente del gas de flujo de un generador diésel, el cual era tratado y se suministraba con un caudal constante de 0.05 v/v min, en el otro diseño de San Pedro y col. 2014 se optaba por utilizar CO_2 puro en un caudal de 0.01 v/v min. Este último es el tomado para el diseño ya que simplifica el proceso y se utiliza un gas de concentración conocida. El medio de cultivo es recirculado por los tubos del PBR, gracias a la impulsión del CO_2 y de aire en la columna *airlift*, este último a un caudal constante de 0.1 v/v min. Por otra parte, en el primer estudio, Romero Villegas y col. 2017, se empleaba como medio de cultivo agua marina con concentrado de agua residual diluido. De esta manera se conseguía que las microalgas utilizaran los nutrientes que se encontraban en el agua residual para incorporarlos a la biomasa, a la vez que se conseguía tratar el agua en condiciones muy favorables para el vertido. Así se consiguió aumentar las cantidades de proteínas (25 %), carbohidratos (50 %) y de lípidos (25 %), utilizando un medio de cultivo de agua residual al 20 % y una dilución diaria de 0.3 l/día. En esta dilución se retiraba parte del medio de cultivo al final del día para añadirle nuevo y poder separar así la biomasa generada. Se trabaja por tanto en un proceso semicontinuo.

Estos son por tanto, las condiciones de operación óptimas para trabajar con este PBR y la microalga escogida, y a partir de estas se va a realizar el escalado del reactor. El diseño en detalle del reactor ha sido revisado a partir del artículo de Ación Fernández y col. 2001, donde se presenta la metodología para diseñar reactores tubulares en los que el fluido es circulado por una columna *airlift*. El método de diseño combina los aspectos relevantes como son el crecimiento celular dependiente de la irradiación externa, la acumulación de oxígeno, y la hidrodinámica de la columna para determinar la velocidad a través del PBR. Se diseña así un PBR que combina la excelente capacidad de absorber la irradiación como un reactor tubular, con un reactor que puede realizar correctamente la transferencia de gases entre el medio de cultivo y la atmósfera como es la columna *airlift*.

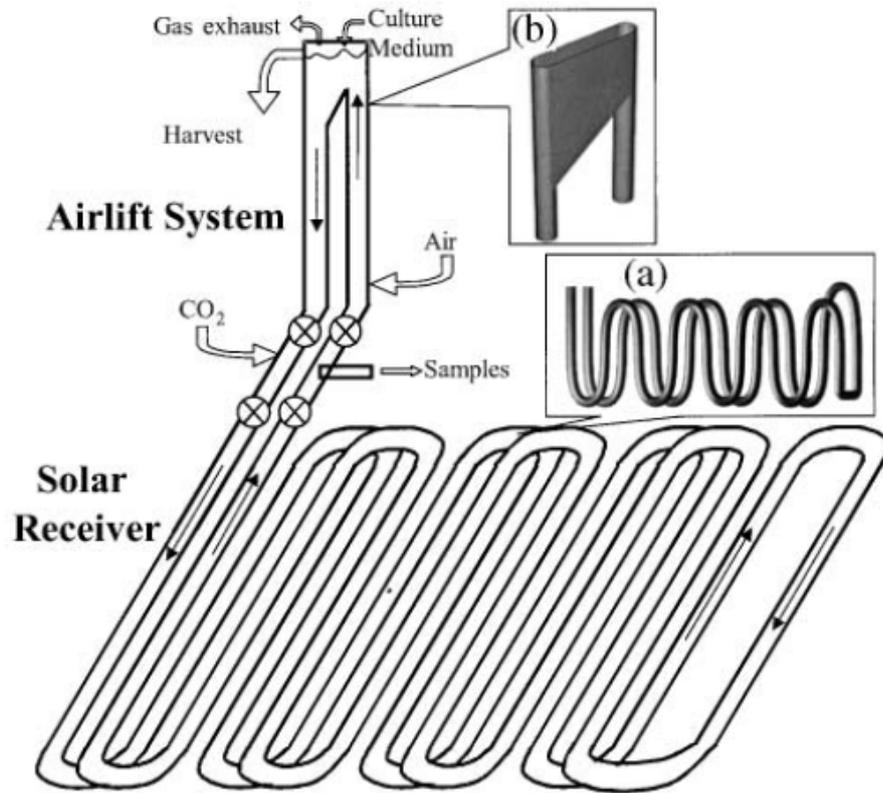


Figura 3.2: PBR tubular helicoidal, diseño de Ación Fernández y col. 2001

Cada reactor individual (Figura 3.2) tiene un volumen de trabajo de 340 l. y consiste de un receptor solar tubular (a.) (125 m. de largo y un diámetro de 0.05 m.) inclinado 45° y dispuesto en orientación este-oeste. Además incorpora la columna *airlift* (b.) para realizar el intercambio de gases, remoción de O_2 , y el intercambio de calor (1.92 m. altura y 0.25 m. de diámetro). El medio de cultivo fluye a una velocidad de 0.5 m/s gracias a la inyección de aire y CO_2 en la columna *airlift*. Los tubos están dispuestos en forma de bucle helicoidal para conseguir la máxima superficie irradiada en el menor espacio posible. Se tiene así un PBR con una superficie de 13 m^2 y un ratio volumen/superficie de 26.15 l./m^2 . En el trabajo de San Pedro y col. 2014, se estudió junto a otros reactores y para ello se dispuso con una separación de 1.6 m, para evitar ensombrecimiento entre PBRs.

Tabla 3.1: Dimensiones PBR piloto

Parámetro	Unidades	Resultado
Longitud tubo	m	125
Diámetro	m	0.05
Sección	m^2	0.00196
Tiempo de residencia	s.	86.58

4 Escalado y dimensionamiento

En este capítulo se va realiza un escalado y dimensionamiento de la planta. Para ello se escala la producción desde la del PBR piloto hasta la de la producción diaria deseada. Se recalculan tamaños y caudales de la planta y se compone un diagrama de flujo que de a entender el proceso. Finalmente, se escala el PBR desde el reactor piloto para poder dar cabida a la productividad deseada y ser incorporado eficientemente en la planta.

4.1 Escalado de producción

Para obtener las dimensiones de la planta, se realiza un escalado a partir del PBR tubular del trabajo de Romero Villegas y col. 2017 y San Pedro y col. 2014. El diseño y el funcionamiento de este quedan explicados en el apartado 3.2. Con los parámetros óptimos una vez delimitados se consigue una productividad máxima de 0.6 g/(l. día) en un volumen de 340 l., ocupado en un área de 13 m². Se tiene así un ratio V/S de 26.15 l./m². Si se toma como base de cálculo una producción deseada de 100 kg./día. Para esta producción se requieren de 166666.7 l. y de una superficie de 6373.486 m². Conocido esto se puede realizar un escalado repitiendo los módulos de la planta piloto obteniéndose así 490 unidades de PBR tubular.

Tabla 4.1: Cálculos escalado de PBR piloto a planta industrial

Parámetro	Unidades	Resultado
Productividad vol.	g/(l. dia)	0.6
Ratio V/S	l/m ²	26.15
Vol. Piloto	l.	340
Área piloto	m ²	13
Productividad real	g/dia	100000
Vol. escalado	l.	166666.66
Área escalada	m ²	6373.48
Unidades vol.	490.19	490
Unidades area	490.26	490

En la tabla 4.1, se han obtenido las dimensiones necesarias para producir 100 kg/día de biomasa algal con PBRs como el piloto. Esta base de cálculo ha sido escogida ya que se ha estimado que es lo suficientemente grande como para poder llevar a cabo una producción industrial rentable y sostenible. El volumen escalado se obtiene del cociente entre la productividad real y la productividad volumétrica. El área escalada es el cociente de el volumen escalado entre el ratio V/S. Realizando el cociente de estos dos últimos parámetros entre el área piloto y el volumen piloto, se obtienen el numero de unidades de PBR necesarias para llevar a cabo la producción diaria deseada. Ambas se aproximan a 490 PBRs piloto.

Este gran número de unidades es necesario para la consecución del objetivo de producción diario, pero claramente encarece el coste de ella tanto por los costes de equipamiento, como por los costes de mantenimiento de tantos equipos. Es por ello que se opta por un diseño en módulos en serie que unifiquen las unidades de los PBRs tubulares y que permitan simplificar los equipos utilizados y por tanto la operación y el coste. Para que el diseño de la disposición de los PBRs sea más simétrico y razonable se escala a un número más grande, 500 PBRs. Además, los PBRs se unifican en módulos de 5 en serie, que consisten en un PBR que recoja toda la longitud del receptor solar de los 5 PBRs piloto y con una sola columna airlift. Finalmente la disposición queda con 10 secciones de 10 módulos de 5 en serie que comparten inyecciones de aire y de CO_2 , tal y como se ilustra en 4.1. Por tanto se dispone de 100 módulos de 5 PBRs unificados.

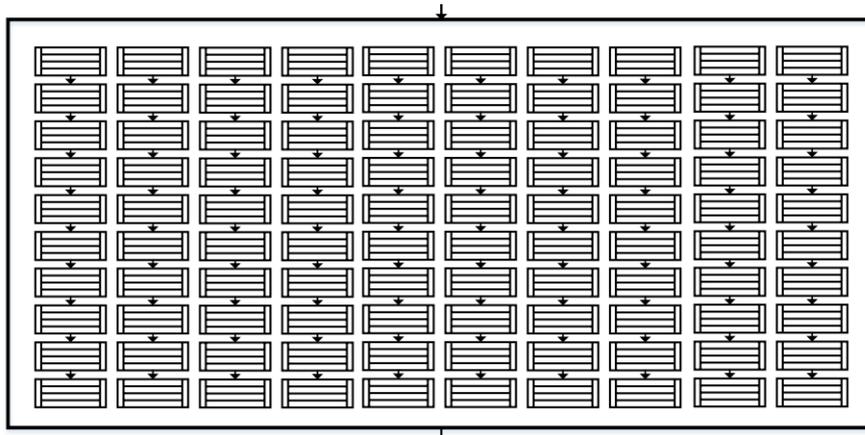


Figura 4.1: Disposición en planta de los PBRs

Finalmente, con 500 PBRs se recalcula el área y el volumen de la planta en general como el producto del área y el volumen del PBR piloto y los 500 PBRs necesarios. Tabla 4.2

Tabla 4.2: Área y volumen de la planta

	Unidades	Módulos de 5
Vol. Real	l	170000
Area real	m^2	6500

Se ha de tener en cuenta que el PBR piloto fue diseñado con unos caudales adaptados a su longitud y diámetro, el cual ha sido diseñado para tener el camino óptico ideal para este

cultivo, es por ello que se han de recalcular para estos nuevos módulos 5 veces más grandes, para así seguir las condiciones de operación llevadas a cabo en el PBR piloto. Tabla 4.3

Tabla 4.3: Cálculo bombeo

	Unidades	Piloto	Módulos de 5
Caudal bombeo	$Q(m^3/s)$	0.004	0.02
Velocidad bombeo agua	m/s	0.5	0.5

El bombeo, Tabla 4.3, se realiza de forma que el medio de cultivo circula a 0.5 m/s en la columna airlift piloto gracias a la inyección de aire comprimido al principio de esta, además de la difusión de CO_2 al final del sistema. Los caudales de inyección del PBR piloto se obtienen a partir del volumen total de la planta por el caudal en (v/v)/min. Estos dos caudales son recalculados para el módulo de 5 como el producto del caudal de inyección de aire y de CO_2 piloto 5 veces más grande. Así se consigue mantener la velocidad y el caudal de bombeo en el interior del módulo de 5 PBRs igual que en el PBR piloto, Tabla 4.4. Esto es necesario porque el PBR fue diseñado a esa velocidad de bombeo para mantener un flujo turbulento y con el tiempo de residencia óptimo para el cultivo.

Tabla 4.4: Cálculo caudales de inyección

	Unidades	Piloto	Módulos de 5
Caudal aire	(v/v)/min	0.100	
	m^3/s	0.28	1.42
Caudal CO2	(v/v)/min	0.010	
	m^3/s	0.028	0.14

Con estos caudales definidos se calculan los tiempos de residencia para cada módulos de 5 PBRs, teniendo en cuenta sus volúmenes y longitudes de tubo, y se obtiene como el cociente del volumen del módulo entre el caudal de circulación de cultivo. Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Dimensiones para la planta

	Unidades	Mod. 5 PBRs	Sección de 10 mod.	Planta
Longitud tubo	m	625.00	6250.00	62500.00
Volumen	m^3	1.70	17.00	170.00
T. de Residencia	s.	346.32	3463.21	34632.12
	min.	5.77	57.72	577.20
	h.	0.10	0.96	9.62

Así se consigue el mismo tiempo de residencia del medio de cultivo dentro del módulo que en el PBR piloto 3.1. De esta forma, se mantiene el régimen de circulación establecido por San Pedro y col. 2014 y Romero Villegas y col. 2017, 0.5 m/s, que permitía la productividad de 0.6 g/(l. día).

4.2 Diagrama de flujo

Ahora que se conoce como van a estar distribuidos los PBRs para conseguir la producción deseada, se realiza un diagrama de flujo de la planta que ilustre los elementos necesarios para sostener la producción diaria.

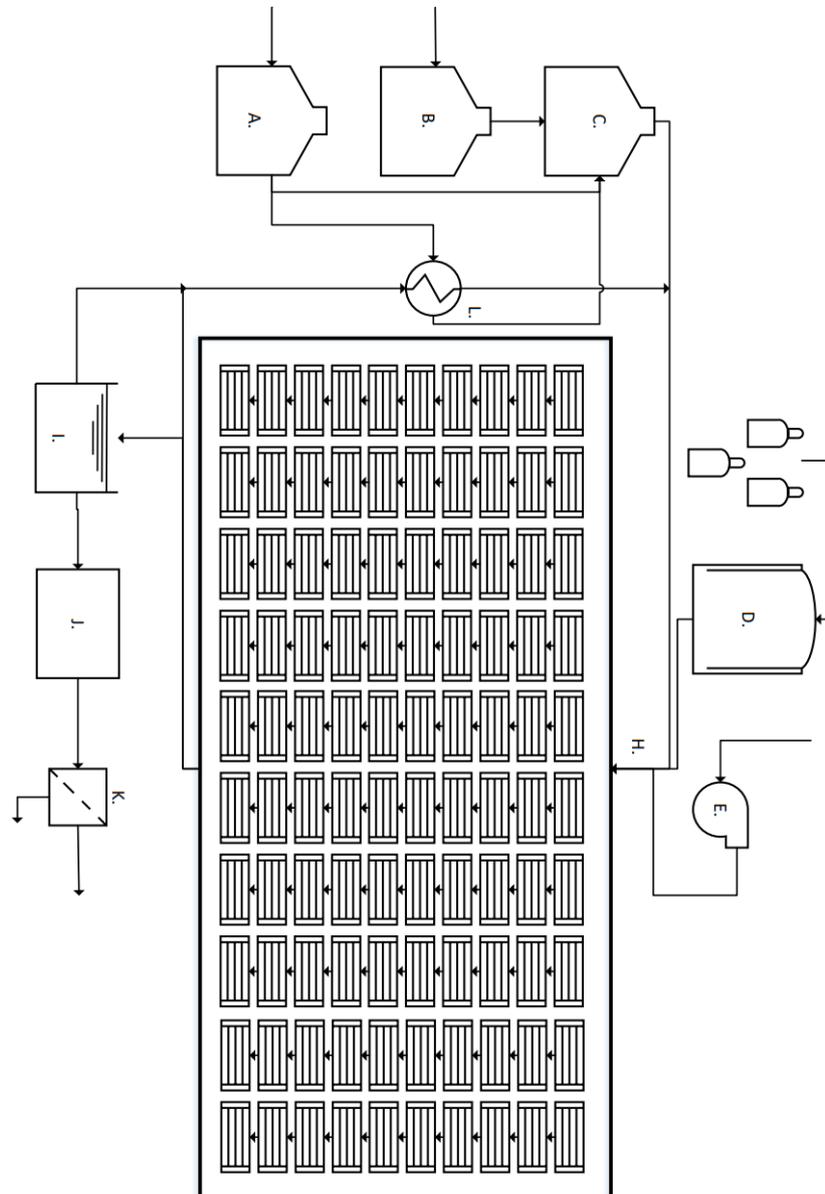


Figura 4.2: Diagrama de flujo de la planta

La planta estará formada por los siguientes módulos:

- A. Depósito de agua marina
- B. Depósito de agua residual
- C. Depósito de premezcla
- D. Tanque de CO_2
- E. Compresor de aire
- H. Receptor solar (PBRs)
- I. Estanque de descarga
- J. Tanque de separación
- K. Sistema de separación
- L. Intercambiador de calor

El proceso comienza recogiendo la base del medio de cultivo, la cual está formada por agua marina y agua residual (20%). Estas son recogidas del propio mar y de una línea de distribución de una planta de tratamiento de aguas residuales, respectivamente, y se almacenan en los módulos A. y B. Seguidamente, se lleva a cabo la premezcla del medio de cultivo en el módulo C., donde se añade el cultivo previamente llevado a crecimiento y los distintos nutrientes necesarios, además de las aguas de los módulos anteriores,.

Una vez el medio de cultivo se ha premezclado se procede al llenado de los PBRs y al arrancado del proceso. Se llenan los PBRs (H.) por completo y se abre el circuito de recirculación. Seguidamente, se activa el sistema de inyección de aire (E.) el cual bombeará el cultivo a través de todo su recorrido, a la vez que se inyecta CO_2 desde el módulo D. Este circuito se llevará a cabo durante ciclos con una duración media diaria de 8.2h. ya que como se demuestra en Mitra y col. 2015 el régimen de trabajo de 8h/luz 16h/oscuridad y 12h/luz 12h/oscuridad, permitía conseguir la máxima cantidad de ácidos grasos insaturados en la biomasa de la microalga *N. Gaditana*, y por tanto se consigue una biomasa con un valor añadido más alto. Durante todo el ciclo se pueden ir añadiendo CO_2 y nutrientes a demanda desde los módulos D. y C. respectivamente. Además, para controlar la temperatura del medio de cultivo se utiliza el intercambiador de calor (L.), refrigerado con agua marina proveniente de A. Este agua se dirige al módulo C. para ser utilizada en la siguiente premezcla, o se vierte en caso de estar lleno el tanque.

Al haberse completado el ciclo de luz, dependiendo de la época del año, se inicia el ciclo de oscuridad donde no se inyecta CO_2 , pero se mantiene el cultivo en recirculación, no necesariamente con el mismo caudal que con el ciclo de luz.

La recogida del cultivo se realiza separando un 30 % del volumen del reactor durante 4 horas en las horas centrales de luz (Romero Villegas y col. 2017) en el estanque de descarga (E.), a la vez que se añade el mismo volumen de agua de mar y residual diluida. De aquí se pasa al tanque de separación (J.) y seguidamente se irá procesando en el módulo de separación (K.) donde se recogerá la biomasa y se separará el agua de mar que será vertida de nuevo.

4.3 Escalado del PBR

Como ya se ha comentado en el apartado 4.1, para simplificar tanto la distribución en planta, como la inyección de gases y la distribución de tuberías de la planta se compacta la producción en módulos de 5 PBRs, con las mismas características al del trabajo de Romero Villegas y col. 2017 y San Pedro y col. 2014. Se ha buscado la semejanza geométrica del reactor ya que este ha sido diseñado para que el camino óptico de los tubos sea el ideal para el crecimiento de la microalga escogida, además el volumen con el que ha sido diseñado es el que permite obtener el rendimiento de 0.6 g/(l. día) de biomasa. A su vez la columna airlift también ha sido diseñada para permitir un aireamiento eficaz de las microalgas y que puedan desarrollarse correctamente. Tomando que este diseño es el ideal, para un módulo de 5 PBRs como el piloto seguidos, se recalculan los diseños de la columna así como de la distribución de los tubos teniendo en cuenta los cálculos del apartado 4.1.

4.3.1 Diseño de la columna airlift

La columna airlift se trata de la parte del PBR encargada de mantener una correcta aireación del medio de cultivo, evitando que se acumule el oxígeno generado en el proceso fotosintético y que puede llevar a una pérdida de la producción por las razones dadas en el apartado 1.3.2.

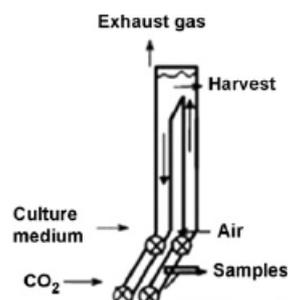


Figura 4.3: Funcionamiento de la columna (Romero Villegas y col. 2017 y San Pedro y col. 2014)

Lo que se busca, como se muestra en la figura 4.3, es inyectar el medio de cultivo proveniente del receptor solar con aire a presión para que ascienda por el tubo a la superficie y pueda desairearse turbulentamente en la zona del respiradero, donde el diseño en forma de cuña de la parte inferior favorece los remolinos y la correcta desaireación. Una vez conseguido esto se busca volver a inyectarlo en el tubo del receptor solar a la vez que se le proporciona más CO_2 al medio de cultivo.

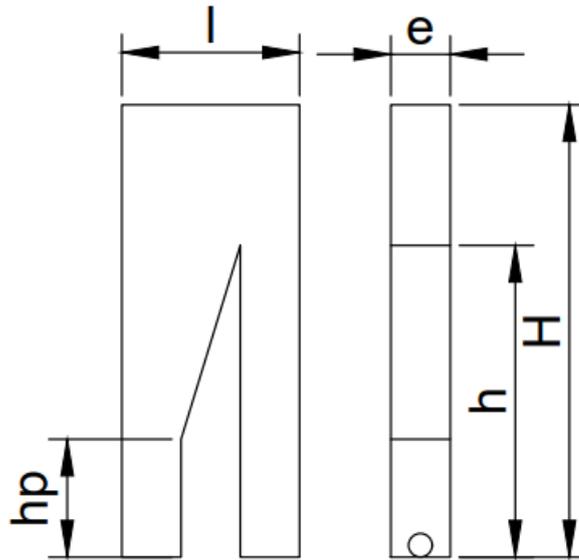


Figura 4.4: Croquis de las dimensiones de la columna

Según el trabajo de Romero Villegas y col. 2017 y San Pedro y col. 2014, la columna piloto tenía unas dimensiones de 1.92 m. de altura y 0.25 m. de diámetro. Como se aprecia en la figura 4.3, el diseño de la columna no puede describirse solamente como un cilindro. Es por ello, que se ha realizado una estimación de las dimensiones de esta para poder escalarla a la producción por módulos.

Siguiendo las indicaciones de las medidas de la figura 4.4, la columna piloto se estima que tendría las siguientes dimensiones:

Tabla 4.6: Dimensiones columna piloto

Airlift piloto			
H (m)	1.92	e (m)	0.25
h (m)	1.7	l (m)	0.75
hp (m)	0.5	D (m2)	0.25
V (m3)	0.25		
V (m3) escalado	1.23		

Con las dimensiones de la tabla 4.6 y teniendo en cuenta el volumen del receptor solar, 125 m. de longitud y 0.05 m. de diámetro. Se consigue un volumen de trabajo para el PBR cercano al descrito en los trabajos de Romero Villegas y col. 2017 y San Pedro y col. 2014.

Para calcular el volumen de la columna piloto se han tomado las siguientes indicaciones:

Donde el volumen de los cilindros se calcula como:

$$V.cilindros = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \cdot 2$$

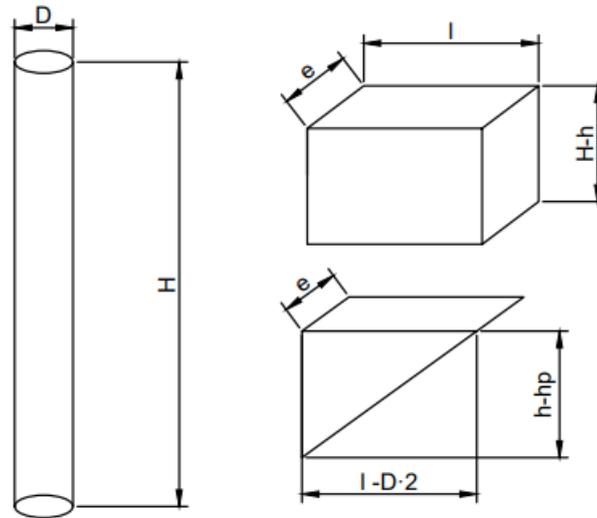


Figura 4.5: Esquema del cálculo del volumen de la columna

El del cubo del respiradero:

$$V.respiradero = e \cdot l \cdot (H - h)$$

Y el de la cuña:

$$V.cuna = \frac{(h - hp) \cdot e \cdot (l - D \cdot 2)}{2}$$

Finalmente, el de toda la columna:

$$V.columna = V.cilindros + V.respiradero + V.cuna$$

Así, una vez conocido el volumen, tabla 4.6, y para escalarlo al tamaño ideal para el módulo se multiplica el volumen de la columna por 5, ya que el caudal va a ser aumentado 5 veces al del PBR piloto. Se recalcula hasta conseguir un volumen cercano al de la tabla 4.6, buscándose una cierta semejanza geométrica con las dimensiones de la columna piloto y dejándose cierto margen de seguridad. Se obtienen las dimensiones de la tabla 4.7

Tabla 4.7: Dimensiones de la columna escalada

Airlift de modulo			
H (m)	3	e (m)	0.5
h (m)	2.5	l (m)	2.5
hp (m)	1.5	D (m2)	0.5
V (m3)	1.98		

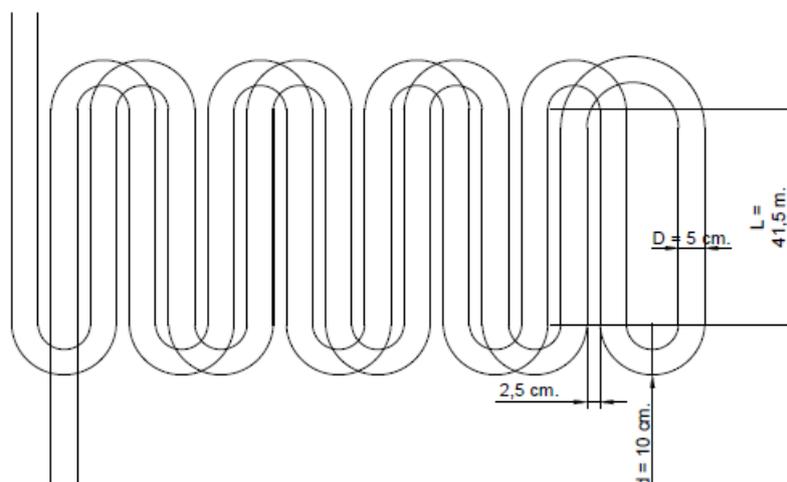


Figura 4.6: Croquis distribución tubos

4.3.2 Diseño del receptor solar

El receptor solar compuesto por los tubos será el encargado de sostener el medio de cultivo en circulación mientras recibe la luz solar necesaria para poder desarrollarse. En el PBR piloto utilizaban tubos de *plexiglass* de las siguientes dimensiones:

Tabla 4.8: Dimensiones de los tubos del PBR

Dimensiones	Unidades	PBR	PBR 5	Planta
Longitud tubo	m	125	625	62500
Diámetro	m	0.05	0.05	0.05
Sup. Planta	m^2	12.5	62.5	6250

En la tabla 4.8 se expresan las dimensiones para el PBR piloto, el PBR equivalente a 5 PBRs piloto y para la planta entera con 100 PBRs. Se calculan las superficies irradiadas como el producto del diámetro por la longitud del tubo dos veces, ya que en el trabajo de Romero Villegas y col. 2017 se tiene en cuenta todo el tubo como parte irradiada, no solo la superior.

Para poder distribuir los 625 módulos en un superficie razonable es necesario calcular cuantos codos va a tener el PBR para poder distribuir el tubo en forma de hélice como en la figura 3.2. En este diagrama se cuentan 15 codos que son los que se tendrán en cuenta para los cálculos. Se obtiene la siguiente distribución (Figura 4.6) con las medidas de la tabla 4.9

Tabla 4.9: Medidas tubo PBR

d	m	0.1
D	m	0.05
L	m	41.5

Y finalmente se consigue una superficie óptica (Tabla 4.10), semejante a la de 5 PBRs pilotos seguidos (Tabla 4.8), la superficie restante se conseguiría al alargar la distribución del tubo al añadir los inyectores de gas y los enganches para la columna. Asimismo, la longitud de los tubos también es la adecuada.

Tabla 4.10: Superficies módulo 5 PBRs

Sup. Módulo	m^2 óptica	62.40
	m^2 reales	78.02
	m^2 planta	40.98
Longitud	m	625.45

Para obtener estos resultados se han seguido estos cálculos:

La Sup. óptica sigue la siguiente expresión:

$$Sup.optica = L \cdot D + \frac{\pi(D+d)^2}{4} - \frac{d^2}{4} \cdot 15 \cdot 2$$

En cuanto a la superficie real se ha tomado en cuenta que entre tubos hay una separación de 0.025 m. y tal y como se explica en la Figura 4.6:

Se calcula, por tanto con la siguiente expresión:

$$Sup.real = Sup.optica + 0,025 \cdot (L + \frac{d}{2} + D \cdot 2) \cdot 15$$

Una vez calculada la superficie real que ocupan los tubos se calcula su superficie en planta, ya que estos se encuentran inclinados 45° .

$$Sup.planta = Sup.real \cdot \cos 45$$

Finalmente, la longitud de la totalidad del tubo del módulo:

$$Longitud.tubo = (L + \frac{(d + D/2) \cdot \pi}{2}) \cdot 15$$

5 Estructura de la planta

En este capítulo se van a describir los principales sistemas y módulos de la planta. Su ubicación final en el esquema de la planta y la distribución de corrientes, así como una breve descripción de los métodos y equipos escogidos para el proceso.

Una vez establecidas las dimensiones que tendrán los módulos de PBRs, es necesario dimensionar y calcular los servicios y módulos que permiten que la planta funcione correctamente. Estos han sido descritos en el apartado 4.2, donde se definían los flujos de entrada y salidas, principales de la planta, y teniendo en cuenta los resultados del apartado 4.1, donde se obtenían los principales caudales y dimensiones de la planta.

5.1 Esquema de la planta

El agua marina (azul oscuro) será bombeada por la bomba P1 al depósito A. El agua residual (verde claro) llegará de una planta de tratamiento de aguas residuales al depósito C. Las bombas P2 y P3 llevarán ambas aguas a los depósitos de premezcla. Una vez ahí se suministrará en caso de ser necesario nutrientes y fertilizantes (amarillo), en forma de sacos, K.

Al terminarse la premezcla y haberse preparado el medio de cultivo (negro) se bombea mediante P5 a los módulos de PBRs en serie, M. Se mantendrá el cultivo en movimiento dentro del ciclo gracias al aire comprimido (azul claro) desde E. y distribuido a cada módulo. Además se inyectará CO_2 (naranja) proveniente del tanque de CO_2 líquido, D. En caso de ser necesario se podrá controlar la temperatura del medio de cultivo gracias al intercambiador de calor, L., refrigerado con agua marina, bombeada por P4.

El medio de cultivo se mantendrá dentro del circuito hasta que se produzca la dilución. Se extraerá la cantidad necesaria al estanque de descarga, F. Desde aquí se bombeará mediante P5 al depósito de separación H., donde se almacenará el medio de cultivo mientras se separa. Se bombea mediante P7 al tanque de láminas, I. De aquí se obtiene agua marina apta para el vertido y lodos de biomasa (verde oscuro), que deben ser secados en el secador, J. Una vez secados se consigue la biomasa en seco.

Además, el control del medio de cultivo circulante se realiza mediante sensores (S1, S2, S3, S4) ubicados en el previo a las acciones de control como puedan ser el paso al intercambiador de calor, el suministro de CO_2 o el caudal de aire comprimido. Se podría implementar así un sistema de control en cascada que permitiera controlar los parámetros más importantes del medio de cultivo.

Una vez descrita la forma de operación de los principales módulos y sistemas que componen la planta, se obtiene este primer esquema, figura 5.1:

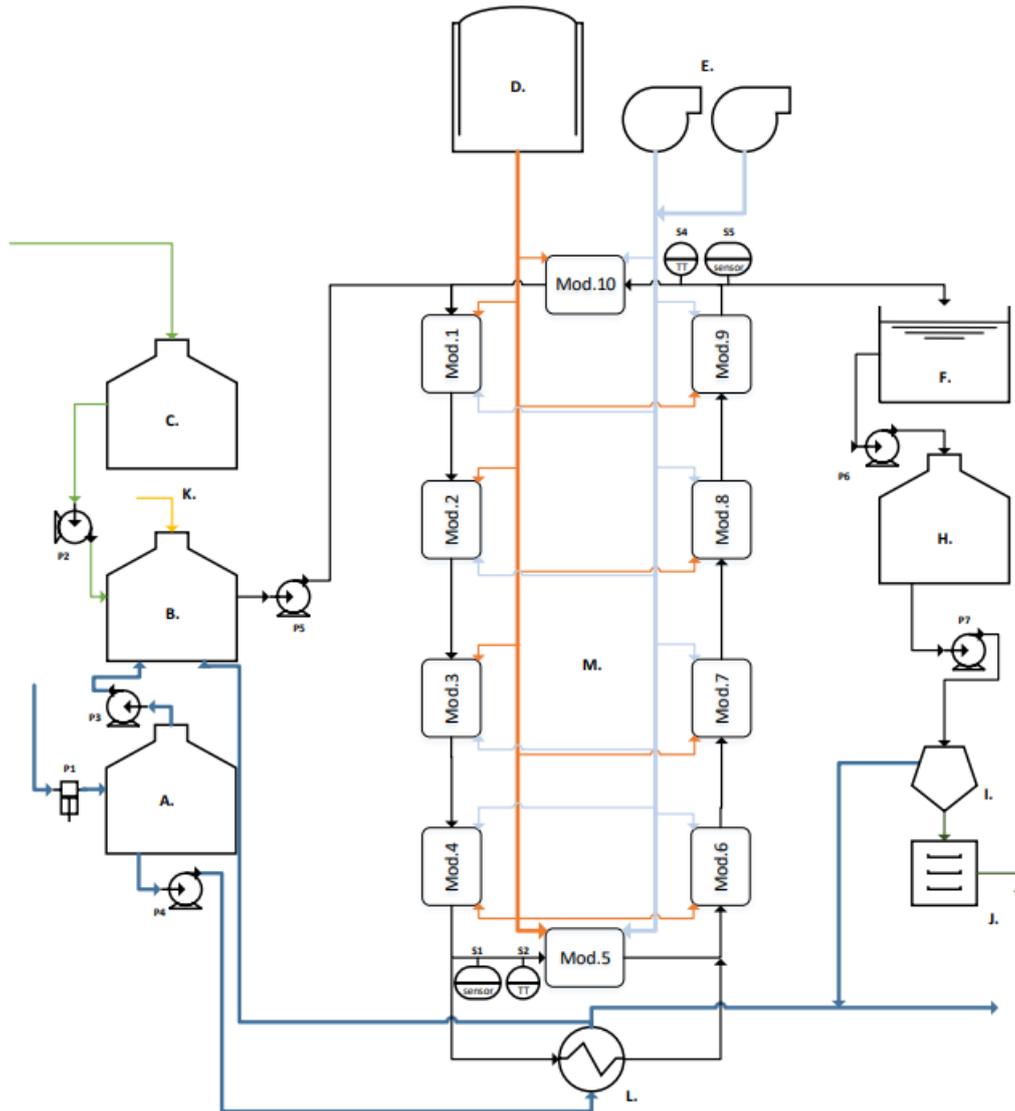


Figura 5.1: Esquema de la planta

Además, cada módulo de PBRs de la planta estará compuesto de 10 PBRs en serie con una distribución de gases centralizada y que se distribuye a cada columna airlift intermedia. Entre módulos y PBRs existen bypass para poder continuar la circulación en caso de fallo de algún PBR o de algún módulo.

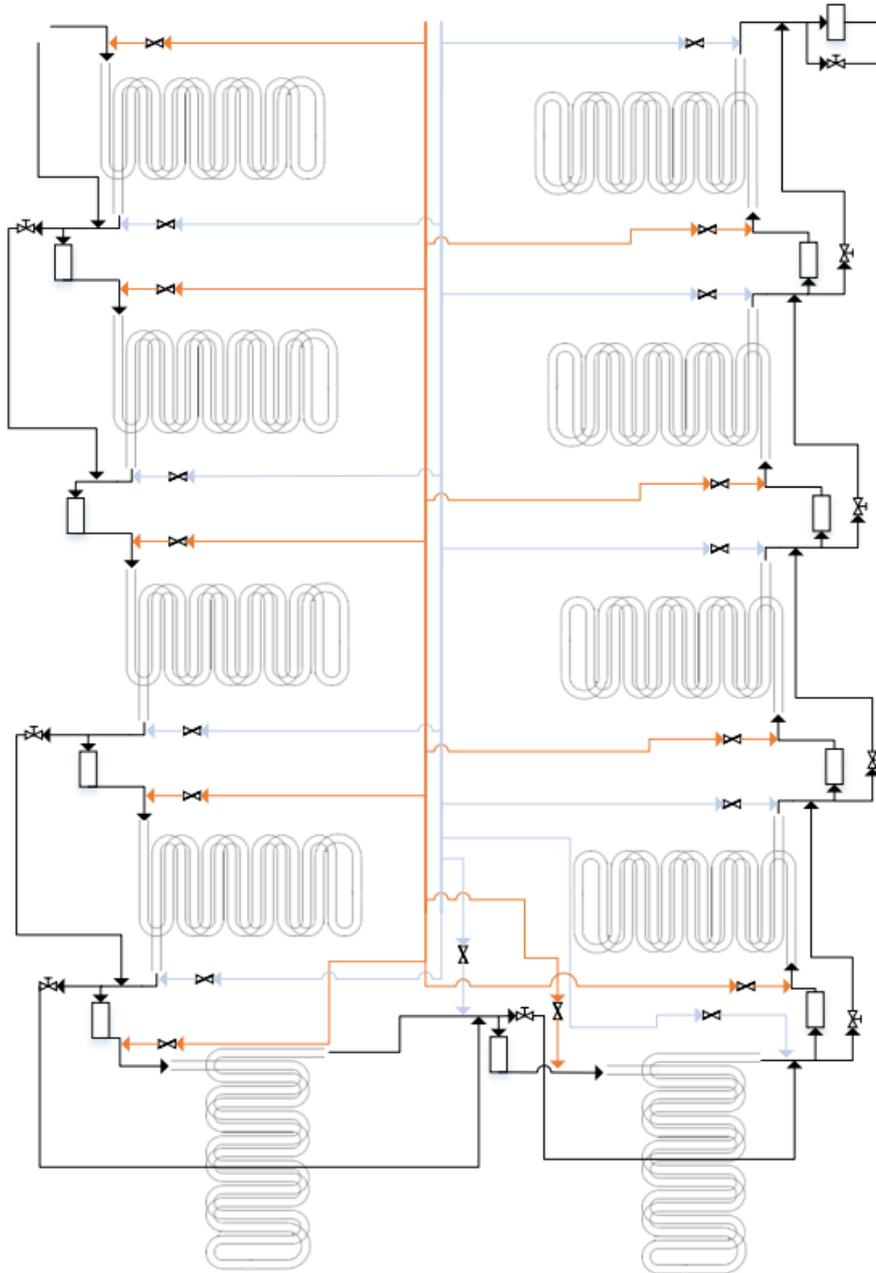


Figura 5.2: Módulo de 10 PBRs en serie

Tabla 5.1: Referencias esquema de la planta

Referencia	Cantidad	Nombre
A	1	Depósito agua marina
B	4	Depósito de premezcla
C	1	Depósito agua residual
D	1	Tanque CO_2
E	2	Compresores Ultima™ U110RS
F	1	Estanque
H	1	Depósito de separación
I	1	Tanque de láminas XBC-50
J	1	Secador solar
K	1	Fertilizantes y nutrientes
L	1	Intercambiador de calor
M	10	Módulos PBR
P1	1	DGX 200/2/G50V A0CM(T)5
P2	1	GT-80-140
P3	1	DGX 200/2/G50V A0CM(T)5
P4	1	DGX 200/2/G50V A0CM(T)5
P5	1	GT-80-140
P6	1	GT-80-140
P7	1	GT-80-140
S1	1	Sensor de temperatura
S2	1	Sensor de pH, CO_2
S3	1	Sensor de temperatura
S4	1	Sensor de pH, CO_2

5.2 Depósitos y estanques

Los depósitos y estanques serán los encargados de almacenar toda la materia prima líquida necesaria para el proceso, así como el medio de cultivo una vez desarrollado. Por una parte se tienen que dimensionar los depósitos de agua marina y residual necesarios para preparar el medio de cultivo. Cuando la planta está en un estado semicontinuo, actuando como un gran quimiostato, solo se producirá un balance de materia de $51 m^3$, correspondiente a la dilución de 0.3 l/día llevada a cabo en el PBR piloto. Esto significa que se extraerían el 30% de los $170 m^3$ que tiene en total la planta. En cuanto a las entradas, sería la suma del agua de mar y la residual (20%) para suplir los $51 m^3$ extraídos. Se necesitarían, por tanto, unos depósitos con las siguientes dimensiones Tabla 5.2.

Tal y como se explica en el diagrama de flujo, apartado 4.2, los $51 m^3$ de medio de cultivo, se recogerían en un estanque que pueda cubrir todo el volumen de la planta ($170 m^3$). Además, este estanque se podría utilizar en caso de tener que vaciar toda la planta y no verter el cultivo. Seguidamente los $51 m^3$ de medio de cultivo extraídos son llevados a un depósito donde se almacenan mientras se van tratando. Se necesitarían, por tanto, un depósito y un estanque con aproximadamente las siguientes dimensiones, Tabla 5.3.

Tabla 5.2: Dimensiones depósitos aguas

Balance masas aguas				
Salidas	V. real (m^3)	Diam (m)	Alt (m)	V. comercial (m^3)
Volumen tratado	51	5	2.6	51.05
Entradas				
Agua de mar dentro	40.8	5	2.1	41.23
Wwater dentro 20 %	10.2	3	1.5	10.60

Tabla 5.3: Dimensiones depósito y estanque de medio de cultivo

Estanque Vacíe PBRs				
V. real (m^3)		V. comercial (m^3)		
170	Diam. (m)	10	172.79	
	Alt. (m)	2.2		
	Lado (L) (m)	10	176	
	Ancho (A) (m)	8		
	Prof. (H) (m)	2.2		
Depósito separación				
V. real (m^3)		V. comercial (m^3)		
34	Diam. (m)	5	51	
	Alt. (m)	2.6		

Los depósitos para las entradas y salidas del proceso en estado semicontinuo ser tendrían las dimensiones indicadas en la Tabla 5.2 y para el depósito de separación en la Tabla 5.3. Esto correspondería a las dimensiones comerciales con las que se encargarían para su fabricación. Estos volúmenes permitirían almacenar la cantidad de aguas necesarias para mantener la planta en operación un día entero por si hubiese algún problema a lo largo del turno. Estarían fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), ya que es un material adecuado para el almacenamiento de aguas, tanto marinas como residuales y tiene un buen aislamiento térmico. Los depósitos van a ser diseñados con un volumen de seguridad de un 20 % por si hubiese algún fallo en el llenado, y para tener en cuenta los equipos de medición y bombeo, así como la valvulería.

Se tendrían por tanto los siguientes depósitos, tabla 5.4:

Tabla 5.4: Volúmenes finales de los depósitos

	Vol. real (m^3)	Vol. final (m^3)	Vol. comercial (m^3)
Agua marina	40.8	48.96	50
Agua residual	10.2	12.24	12
Depósito premezcla	51	61.2	60
Depósito separación	51	61.2	60

Y con las siguientes dimensiones, tabla 5.5:

Tabla 5.5: Dimensiones comerciales de los depósitos de aguas

	Diam (D) (m)	Alt (H) (m)	Vol. comercial (m^3)
Agua marina	3	7.1	50
Agua residual	2	3.8	12.00
Depósito premezcla	4	4.8	60
Depósito separación	4	4.8	60

Las dimensiones de la tabla 5.5 del depósito corresponderían al siguiente croquis:

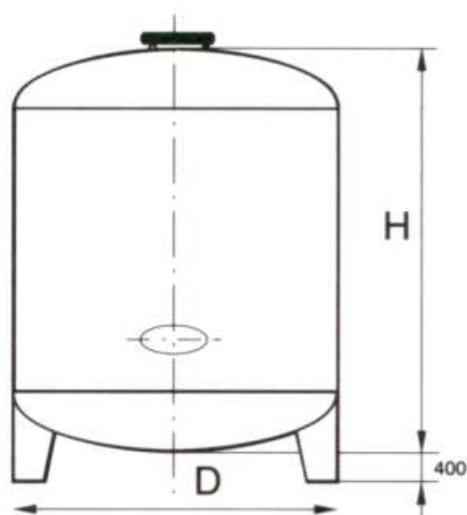


Figura 5.3: Depósito tipo H (AIQSA (AUXILIAR DE INSTALACIONES QUÍMICAS S.A.))

Por último el estanque estaría fabricado con las dimensiones definidas en la Tabla 5.3 y construido en hormigón impermeabilizado, siguiendo las medidas expresadas en el croquis:

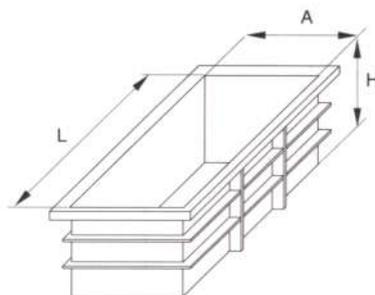


Figura 5.4: Estanque de hormigón (AIQSA (AUXILIAR DE INSTALACIONES QUÍMICAS S.A.))

5.3 Inyección CO_2 y aire

Se va a inyectar CO_2 puro al final del recorrido de cada columna airlift tal y como se representa en la figura 4.3 y se realiza en el trabajo de San Pedro y col. 2014. Los caudales de CO_2 necesarios fueron definidos en el apartado 4.1, conociendolos y sabiendo que el tiempo medio de operación del ciclo de luz son las 8.2 h. de sol diarias se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 5.6: Inyección de CO_2

Tiempo operación	8.2	h
Volumen CO_2	836.40	m^3 /día
Masa CO_2	1 578.11	kg/día
Precio CO_2/ día	473.43	€/día

La masa de CO_2 de la tabla 5.6 se conoce a partir del dato de la ficha técnica 8.0.1, ya que 1 kg de CO_2 licuado corresponden a 0.541 m^3 de CO_2 a 1 atm y 15°C. El precio ha sido consultado al fabricante *Linde Gas* y para tales cantidades diarias se recomendaba la instalación de un depósito de CO_2 líquido con su equipo correspondiente, que se llenan mediante cisternas criogénicas a granel, con un precio de 0.3€/kg de CO_2 . Además el alquiler anual de este tipo de equipos proporcionados por la empresa suministradora es de unos 6000€/año. El sistema de descompresión del CO_2 líquido ya está incorporado en este tipo de equipos por lo que la única parte a tener en cuenta en el diseño son las tuberías de distribución y las válvulas y difusores de gas.

Esta gran cantidad de CO_2 5.6 será variable según las condiciones del cultivo lo requieran, teniendo en cuenta las horas de luz y la acidificación del medio de cultivo que tanto afecta al desarrollo de las microalgas. *Nannochloopsis sp.* no crece por debajo de un pH 4, Peng y col. 2020, por lo que su caudal se regulará mediante un sistema de control y válvulas que permitirán controlarlo adecuadamente.

En cuanto al sistema de compresión de aire, y para el volumen de la planta de 170 m^3 , se obtienen los siguientes caudales de aire comprimido a inyectar en la totalidad de los PBRs:

Estos caudales, Tabla 5.7, serán variables según las condiciones del cultivo lo requieran, variabilidad del tiempo de residencia, turbulencia del flujo, concentración de oxígeno en

Tabla 5.7: Caudales de inyección de aire

Caudal aire	Planta 170 m^3
v/v/min	0.1
m^3/s	0.28
m^3/min	17.00
m^3/h	1 020.0

el medio de cultivo. Para ello se regularán mediante un sistema de control y válvulas que permitirán controlarlo adecuadamente.

Este caudal tan elevado, Tabla 5.7, requiere de compresores muy grandes o de varios muy pequeños. Se escoge la primera opción ya que la instalación de tantos equipos es más costosa a largo plazo por los gastos en mantenimiento. Sin embargo no se puede optar por la instalación de un solo equipo de compresión de aire, es por ello que se duplica y se escoge un modelo que trabaje a media potencia cubriendo la mitad del caudal necesario.

**Figura 5.5:** Compresor Ultima™ MODELO U110RS (*CompAir*)

El compresor elegido es el Ultima™ MODELO U110RS, figura 5.5, de la empresa *CompAir*. Es un compresor de aire muy eficiente que se caracteriza por un elevado rendimiento proporcionado por un equipo compacto y eficiente. Dispone de un tornillo de compresión 100 % libre de aceites y siliconas este equipo sigue, por tanto, la normativa ISO 8573-1 (2010) CLASE 0, por la cual se rigen todos los compresores de aire libres de aceite y que es tan importante ya que no se quiere inyectar aire contaminado con aceites al cultivo.

Tiene una capacidad de aire libre suministrado (FAD) de $23.3 \text{ m}^3/\text{min}$, por lo que se cubriría con total soltura los $17 \text{ m}^3/\text{min}$ necesarios para la operación de la planta. Se trabajaría con dos compresores por duplicado para garantizar lo operatividad de la planta en caso de avería. El resto de especificaciones técnicas se encuentran en el apartado 8.0.2

5.4 Intercambio de calor

El crecimiento de las microalgas es fuertemente dependiente de la temperatura, esto es debido a que sus procesos fisiológicos, como la fotosíntesis tienen etapas que dependen fuertemente de esta. En general las microalgas como la especie elegida tienen una gran resistencia a los cambios de temperatura, pero tienen un crecimiento más elevado a determinadas temperaturas. En concreto el género *Nannochloopsis sp.* encuentra su mayor tasa de crecimiento a una temperatura de 35°C ., Peng y col. 2020. Por encima de los 40°C pierde productividad, al igual que por debajo de 20°C , este será tomado como el rango de productividad.

Estas temperaturas no se pueden mantener constantes durante todo el año, a pesar de que el diseño recirculado y enclaustrado en plexiglass contribuye enormemente a mantener una temperatura en torno a los 35°C . Sin embargo, se necesita un sistema que permita cierto intercambio de calor en caso de ser necesario. Para ello, se propone la instalación de un intercambiador de calor que utilice agua marina con una temperatura tomada como constante a 20°C , Tredici y col. 2016.



Figura 5.6: Intercambiador de calor URANUS 240 Zodiac

Se escogen dos intercambiadores de calor URANUS 240 de la marca *Zodiac*, figura 5.6. Se trata de intercambiadores de placas de titanio, altamente resistentes a la corrosión. Cada uno con un caudal de $8.3 \text{ m}^3/\text{h}$. Por tanto dos intercambiadores serán capaces de mantener el caudal de la planta, Tabla 4.3. Sin embargo, estos no estarán operativos siempre, solo en las ocasiones en las que se requiera controlar la temperatura del medio de cultivo ya que se sale del rango de productividad viable para el cultivo. El resto de especificaciones técnicas se encuentran en el apartado 8.0.3

5.5 Separación y cosechado

Una vez han sido separados y aislados los 51 m^3 diarios, se procede a tratar este volumen de medio de cultivo para separar el agua tratada de la biomasa algal.

Los diferentes métodos de cosechado y separación fueron revisados en el apartado 1.3.4. Los métodos de coagulación/floculación no son convenientes para separar biomasa por la alta concentración de sales metálicas, que normalmente se utiliza como coagulante, puede tener un efecto negativo en la pureza y calidad del producto final que va a ser utilizada en alimentación. El uso de coagulantes no asimilables, y el elevado precio de coagulantes aptos para alimentación hacen inviable esta operación en cultivos a gran escala. Los otros métodos no son viables económicamente por la poca capacidad de separación o el alto coste energético.

En el artículo de Show y col. 2019 se concluyó que solo la centrifugación y la precipitación pueden ser económicamente factibles siendo la centrifugación marginal para la separación de biomasa con un alto valor añadido, debido al alto coste energético.

Utilizando el método de sedimentación se pueden conseguir sólidos concentrados entre 30-50 veces, comparables a una coagulación/floculación, la única desventaja es el largo tiempo que tardan en asentarse las partículas de biomasa. Este problema puede acelerarse con un sedimentador de láminas (lamella separator). Este consiste en un tanque de sedimentación al que se le distribuye tangencialmente el medio de cultivo que tiende a precipitar al circular entre unas láminas dispuestas de manera óptima para que los sólidos sedimenten, al facilitarse el contacto entre las distintas partículas de la biomasa algal. Este método tiene como ventaja que no ejerce estrés en las células de las microalgas y por tanto no las rompe, con la consiguiente pérdida de propiedades de la biomasa.

Una vez separada la biomasa algal del agua del medio de cultivo se obtiene una pasta muy húmeda que requiere ser tratada para eliminar el exceso de humedad que aún le queda. Para ello se utilizan distintos métodos de secado. En el trabajo de Show y col. 2019 se revisaron distintos métodos de secado, siendo el secado al sol el más utilizado. Este tipo de secado solo requiere del esparcimiento de la pasta de algas en una superficie al sol y dejándola en secándose al sol. Este método es apto tanto para la obtención de biomasa para biodiesel, como su uso en alimentación animal y para extraer sus componentes esenciales para las industrias farmacéuticas.

Para la sedimentación se utiliza un tanque de sedimentación de láminas XBC-50 de la marca *Gonyuan Enviroment*, figura 5.7, este se trata de un tanque de acero inoxidable y de unas láminas de PVC. Se tiene así un módulo de separación altamente durable en el tiempo por sus propiedades anticorrosivas y por la capacidad de intercambio de las láminas de PVC una vez desgastadas.

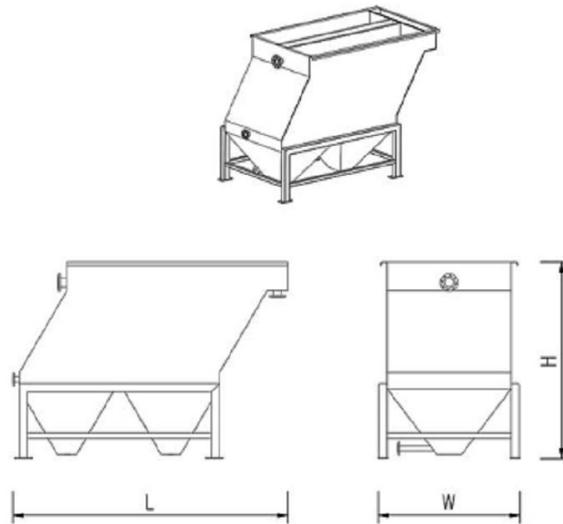


Figura 5.7: Lamella tank XBC-50 *Gonyuan Enviroment*

Este tanque de sedimentación de láminas es capaz de tratar $50 \text{ m}^3/\text{h}$ de medio de cultivo, por lo que en poco más una hora se podría procesar todo el volumen extraído del día. El resto de datos técnicos se encuentran en el apartado 8.0.4.

En cuanto al proceso de secado se ha de tener en cuenta que se van a obtener 100 kg de biomasa de los 51 m^3 extraídos en la dilución al día. Se tienen por tanto la siguiente densidad, tabla 5.8.

Tabla 5.8: Depósito de separación

Depósito separación		
Volumen (m^3)	kg. Obtenidos	Densidad (kg/m^3)
51	100	1.960784314

Teniendo en cuenta que en la etapa de sedimentación en el tanque de láminas se puede concentrar la biomasa entre 30 a 50 veces, Show y col. 2019, se obtienen la siguiente densidad, tabla 5.9.

Tabla 5.9: Tanque de láminas

Tanque de láminas		
Densidad biomasa (kg/m^3)	kg. Obtenidos	Volumen biomasa (m^3)
78.43	100	1.28

Se necesitaría por tanto un secador solar para eliminar la humedad que pudiera quedar al separar la biomasa del medio de cultivo. Para ello se diseña un secador solar que consiste en 24 bandejas con las siguientes dimensiones, tabla 5.10.

Tabla 5.10: Dimensiones secador solar

Secador solar	Bandejas		24	
Lado (m)	5.6	Lado (m)	1.2	Vol. biomasa (m^3)
Ancho (m)	4.8	Ancho (m)	1	1.275
Alto (m)	1.5	Alto (m)	0.05	Vol. bandejas (m^3)
Grupo Bandejas	4	Bandejas/grupo	6	1.44

Se distribuyen en 4 grupos de 6 bandejas distribuidas verticalmente. Cada bandeja tiene una profundidad de 5 cm., y para garantizar una correcta aireación tienen una separación vertical de 20 cm. Además, entre grupos de bandejas existe una separación a lo largo y a lo ancho de 20 cm. Con esto se obtienen también las dimensiones mínimas del secador solar 5.10.

El secador consistiría en una estructura que seguiría la siguiente forma, figura 5.8:



Figura 5.8: Secador solar

En esta estructura 5.8 el aire fresco se calentaría en la superficie irradiada del techo y descendería hacia las bandejas para retirar la humedad. Se podría combinar con un generador de calor termoeléctrico para los días en que no se pueda conseguir energía solar.

5.6 Equipos de bombeo y tuberías

El agua marina requerida para el proceso será bombeada directamente desde el mar mediante una bomba de aspiración. Se ha escogido el modelo DGX 200/2/G50V A0CM(T)5 de la marca *Zenit*. Se trata de una bomba de aspiración fabricada en acero inoxidable AISI 316, adecuada para ambientes salinos, con un paso ancho que permite la expulsión de sólidos como la arena. Tiene un caudal máximo de hasta $50 \text{ m}^3/\text{h}$ con una altura de bomba de 2 m. Las especificaciones de la bomba se encuentran en el apartado 8.0.5.

Esta misma bomba se instalará en el depósito de agua marina para el bombeo al depósito de premezcla y al intercambiador de calor. En cuanto al bombeo de las aguas residuales y el medio de cultivo, se realizará mediante electrobombas centrífugas GT-80-140 de la marca *Bombas Hasa*. Son electrobombas autoaspirantes con un eje de acero inoxidable y capaz de suministrar un caudal de $90 \text{ m}^3/\text{h}$ a una altura manométrica de 6 m. Las especificaciones de la bomba se encuentran en el apartado 8.0.6.

Los diámetros y longitudes de las tuberías no han podido ser estimados ya que aún no se cuenta con la distribución final de la planta, pero se diseñarían teniendo en cuenta las diferentes alturas de los equipos y su ubicación en el plano de la planta. En cuanto a la distribución de los gases se escogería un diámetro que iría descendiendo a medida que se distribuye a cada módulo y seguidamente a cada inyección en la columna airlift. Se deberían escoger también las diferentes bocas de inyección de gas. En cuanto al material de las tuberías, deberían de ser materiales baratos por la elevada distribución de fluidos que tiene la planta y por ello se propone su construcción en PE 100 PN10 para la distribución de gases y aguas.

5.7 Funcionamiento y modo de operación

A pesar de que en el apartado 4.2 ya se avanzó el modo de operación de la planta, se han tomado ciertas consideraciones posteriores al escalado que requieren de cierta explicación para comprender el funcionamiento final de ella.

El arranque de la planta comienza con el relleno los depósitos de agua marina y de agua residual. Mientras se va preparando en los depósitos de premezcla el volumen entero del medio de cultivo (170 m^3) con las proporciones de agua marina (80%) y agua residual (20%). Además, se añaden los nutrientes necesarios, en este caso fosfato potásico en forma de sólido, teniendo en cuenta la recomendación de los autores Romero Villegas y col. 2017 de mezclarlo en proporción 5:1, P y N. Es decir, 43.8 mg/L o 7.446 kg para el volumen de la planta. Además se inserta el inóculo previamente preparado en un laboratorio de campo que dispone de reactores a pequeña escala para su preconcentración tal y como argumentan en Tredici y col. 2016.

Una vez preparado el medio de cultivo se procede a rellenar los módulos de los PBRs y se arranca el ciclo de luz activando la inyección de CO_2 y aire comprimido para el bombeo. Se mantiene el ciclo de luz hasta las horas centrales del día donde se procede a la dilución actuando como un quimiostato, Romero Villegas y col. 2017 y San Pedro y col. 2014. Se

retira un 30% ($51 m^3$) del medio de cultivo al estanque de almacenamiento. Mientras tanto se rellenan con otros $51 m^3$ previamente premezclados a lo largo del día. Este proceso se lleva a cabo en las 4 horas centrales del día, ya que permitía cosechar la biomasa en plena actividad fotosintética y con un mayor valor añadido. Este ciclo de luz es variable entre épocas del año pero tiene una media anual de 8.2h.

Seguidamente, el medio de cultivo separado en el estanque se recoge en un depósito de precosechado donde se almacenará mientras se va suministrando al tanque de láminas para su separación. De aquí se obtendrá agua marina ya tratada y lista para verter, Romero Villegas y col. 2017 y un lodo compuesto por biomasa y humedad. Este lodo se llevará al secador solar donde se eliminará la humedad y se procederá a su tratamiento preventa.

Finalmente, el ciclo de oscuridad se iniciará cuando ya no se disponga de una irradiación suficiente. En este se cortará el suministro de CO_2 y se reducirá el caudal de inyección de aire para el bombeo, hasta alcanzar una velocidad de flujo que permita al cultivo mantenerse en movimiento sin asentarse. Los depósitos de aguas se rellenan para el día siguiente.

6 Estudio económico

En este capítulo se va a realizar un estudio económico de viabilidad de la planta donde se estima si es viable su realización. Para ello se analizan los costes de capital directos e indirectos, así como los costes de operación de la planta.

Ahora que ya se conocen los principales equipos y módulos que componen la planta, se puede realizar una estimación de los costes de capital y operación necesarios para realizar este proyecto.

6.1 Costes de capital (CAPEX)

Los costes de capital (Capital Expenditure), vienen referidos a los costes en adquisición de material para la construcción de la planta, así como los gastos en llevar a cabo el proyecto de construcción. Es por ello, que se dividen en costes de capital directos para la construcción de la planta, que incluyen los costes de adquisición de equipos, así como de estimaciones realizadas para partes de la planta que no han sido diseñadas por su complejidad o porque no abarcan la extensión de este trabajo.

En concreto, para los costes de capital directos, tabla 6.1, se han capitalizado los costes para los equipos principales consultando presupuestos a los fabricantes una vez fueron dimensionados. En cuanto a los módulos PBR se tuvo en cuenta que todos estaban fabricados en plexiglass transparente y se tuvo en cuenta los m y m^2 necesarios para su construcción. Los costes del laboratorio de campo fueron estimados a partir de las consideraciones tomadas por Tredici y col. 2016, ya que se consideró que las dimensiones del proyecto eran similares y se podía tomar como válido. Por último los coeficientes para estimar el resto de los costes de construcción fueron tomados del trabajo de Garret 1989 tomando como referencia los índices de la figura 6.1, y las dimensiones del proyecto; un alto coste en tuberías por la gran cantidad de conexiones necesarias entre módulos, costes de las estructuras para los PBRs y para el secador y ciertos módulos, y bajos costes de instrumentación por las consideraciones de 5.1.

Tabla 6.1: Costes de capital directos (Construcción)

Costes de capital directos (Construcción)			
Concepto	Cantidad	Precio (€)	%
Depósito agua marina	1	6 485.16	
Depósito de premezcla	4	30 708.64	
Depósito de separación	1	7 677.16	
Depósito agua residual	1	1 955.56	
Estanque	1	172 625.00	
Compresores Ultima™ U110RS	2	192 000.00	
Tanque de láminas XBC-50	1	7 500.00	
Intercambiador de calor	1	1 500.00	
DGX 200/2/G50V A0CM(T)5	3	4 500.00	
GT-80-140	4	4 800.00	
Laboratorio de campo	1	50 000.00	
Superficie planta (m2)	9375	9375	
Módulos PBR	100		
Longitud tubo (m)	62500	1 130 350.00	
Superficie airlift (m2)	942.70	23 567.48	
TOTAL EQUIPAMIENTO		1 643 044.00	
Montaje			0.30
Tuberías			0.80
Instrumentación y control			0.10
Sistemas eléctricos			0.20
Estructuras			0.30
Subtotal de costes directos		4 436 218.79	170 %

Tabla 6.2: Costes de capital indirectos (No construcción)

Costes de capital indirectos (No construcción)		
	Precio (€)	%
Arranque		0.1
Ingeniería y Diseño		0.3
Contingencias		0.1
Subtotal costes indirectos del capital	2 464 566 €	50.00 %

PLANT COST ESTIMATES 29

Table 3-4
Plant Cost Estimating Factors

<i>Component</i>	<i>Plant Cost Factor, Fraction of Total Purchased Equipment Cost</i>	
Purchased equipment	1.00	
Piping	0.15-0.70	
Electrical	0.10-0.15	
Instrumentation	0.10-0.35	
Utilities	0.30-0.75	
Foundations	0.07-0.12	
Insulation	0.02-0.08	
Painting, fireproofing, safety	0.02-0.10	
Yard improvements	0.05-0.15	Optional Estimating Factors, Fraction of (Subtotal) Plant Costs
Environmental	0.10-0.30	
Buildings	0.05-1.00	
Land	0-0.10	
	Subtotal	1.96-4.80
Construction, engineering	0.30-0.75	0.10-0.40
Contractors fee	0.10-0.45	0.03-0.10
Contingency	0.15-0.80	0.05-0.20
Total	2.51-6.80	2.31-8.16
<i>Usual limits for total factor</i>		<i>Lang Factor</i>
Minimum (solids processing)	3.00	3.4
Average (mixed processing)	4.00	
Maximum (fluid processing)	5.50	5.2
<i>Other capital requirements</i>	<i>Additional Factor, % of Total Plant Cost</i>	
Off-site facilities	0-30	
Plant start-up	5-10	
Working capital	10-20, or 10-35 % of mfg. cost	

Figura 6.1: Índices CAPEX (Garret 1989)

En cuanto a los costes de capital no relacionados directamente con la construcción, tabla 6.2, se han tenido en cuenta los costos de ingeniería y diseño necesarios para la construcción, así como un fondo para contingencias durante el proyecto, con los índices de Garret 1989. Además se ha estimado el porcentaje relativo al arranque, teniendo en cuenta la adquisición del inóculo en grandes cantidades y su preparación en el laboratorio de campo.

Tabla 6.3: Costes totales de capital 2022

Costes totales de capital 2022	6 900 784.79 €
---------------------------------------	-----------------------

Finalmente, se obtienen los costes finales de capital para la construcción y desarrollo del proyecto de la planta, 6.3.

Si se conoce que la producción estimada será la de la tabla 6.4 y se toma una vida útil de la planta de 20 años (A pagar en 20 anualidades) con una tasa de interés para la inversión del 4.3% (Préstamos de más de 4 años del ICO, Instituto de Crédito Oficial), se calcula el CRF (Capital Recovery Factor) y la amortización de la inversión.

Tabla 6.4: Producción estimada

Producción estimada (kg/día)	100
Producción estimada (kg/año)	36500

Tabla 6.5: Cálculos amortización

Vida útil del proyecto (años), n	20.00
Interes anual, i	0.043
(1+i)n	2.32
CRF (capital recovery factor):	0.0755

Con el CRF, el cuál es la relación entre una anualidad constante y el valor presente de recibir esa anualidad durante un período de tiempo determinado. Usando una tasa de interés i , calculándose como:

$$CRF = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Se obtiene pues la siguiente amortización anual de la inversión en capital directo:

Tabla 6.6: Amortización de la inversión

	€	€/kg
Amortización de la inversión	521 351.84 €	14.28 €

6.2 Costes de operación (OPEX)

Se obtienen ahora los costes de anuales de operación de la planta, tabla 6.7, estos están relacionados con los costes de operación y mantenimiento anuales de la planta. Estos se subdividen en costes variables, los cuales dependerán de la producción que se quiera llevar a cabo, y los costes fijos, los cuales están predefinidos por sí mismos.

Entre los costes variables se encuentra la energía consumida, está dependerá de la producción diaria de biomasa, que está directamente relacionada con los caudales de medio de cultivo y aire comprimido suministrados por los distintos equipos, tabla 6.8.

Entonces, conociendo el consumo energético de cada gran equipo utilizado y un precio de la electricidad de 0.0939 €/kWh, se obtienen los costes variables en energía, tabla 6.7. Por otra parte, se tienen los costes fijos ligados a la potencia suministrada por la comercializadora eléctrica que corresponden a la suma de las potencias de todos los equipos, tabla 6.8, por el precio del término de potencia 0.0764 €/kWh día.

Tabla 6.7: Costes de operación y mantenimiento

	€	€/kg	%
Costes Variables			
Energia	134 540 €	3.69 €	34.00 %
Productos Quimicos	3 968 €	0.11 €	1.00 %
Alquiler depósito CO2	6 000 €	0.16 €	1.52 %
Subtotal costes variables	317 311 €	8.69 €	80.19 %
Costes Fijos			
Termino de potencia	953 €	0.03 €	0.24 %
CO2 líquido suministrado	172 803 €	4.73 €	43.67 %
Personal	57 663 €	1.58 €	14.57 %
Mantenimiento	19 786 €	0.54 €	5.00 %
Subtotal costes fijos	78 402 €	2.15 €	19.81 %
Total costes O&M	395 713 €	10.84 €	100.0 %

Tabla 6.8: Consumo energético de los equipos

Equipo	m3/día	kWh/día	Pot kWh/m3
Compresor E1 Ultima™ U110RS	12240	1395.36	0.114
Compresor E2 Ultima™ U110RS	12240	1395.36	
Bomba P1 DGX 200/2/G50V A0CM(T)5	60	270	1.5
Bomba P4 DGX 200/2/G50V A0CM(T)5	6.3	28.35	
Bomba P3 DGX 200/2/G50V A0CM(T)5	40.8	183.6	
Bomba P2 GT-80-140	10.2	40.8	4
Bomba P5 GT-80-140	51	204	
Bomba P6 GT-80-140	51	204	
Bomba P7 GT-80-140	51	204	
		3925.47	
		1 432 796.55	kWh/año

En cuanto al coste de los productos químicos, este hace referencia al uso de fertilizantes como el fosfato de potasio (1.46 €/kg) para aportar fósforo y otros elementos esenciales para el desarrollo de las microalgas tomando las consideraciones aportadas en el apartado 5.7.

Por otra parte se tiene el CO_2 criogénico suministrado por la empresa *Linde Gas* con un precio de 0.3 €/kg y que es aportado en forma de depósitos de CO_2 líquido. Este se almacena en un módulo criogénico que cuenta con todo el equipo necesario para su uso en planta y que tiene un coste fijo de 6000€ al año.

Otro coste fijo es el ligado a los empleados. Se ha estimado que para el tamaño de la planta, y el modo de operación, apartado 5.7, se precisarían de 4 empleados. Dos técnicos equivalentes al grupo profesional 5 (BOE 171, de 19 de julio de 2021), y un técnico del grupo profesional 7 como jefe de planta, para el ciclo de día. Mientras que para el ciclo de noche solo se requeriría un técnico del grupo 5 por el menor volumen de trabajo, tabla 6.9)

Tabla 6.9: Empleados

1 Tecnico Equivalente Grupo Profesional 5 Producción y Mantenimiento.	23 810 €
3 Tecnico Equivalente	71 429.79 €
1 Tecnico Equivalente Grupo Profesional 7 Dirección	33 853 €
TOTAL	105 283 €

Finalmente, se destina un 5 % del total de costes de operación al mantenimiento de la planta, utilizando los índices de la figura 6.1.

6.3 Costes de producción

Finalmente, se obtienen los costes de producción, tabla 6.10, teniendo en cuenta la amortización del capital (Tabla 6.6) y los costes anuales de operación (Tabla 6.7), para la producción anual de la Tabla 6.4.

Tabla 6.10: Costes de producción

	€	€/kg
Total costes producción	544 919.32 €	25 €

7 Conclusiones del trabajo

Una vez realizado el estudio económico del proceso, apartado 6, se obtiene un coste de 25 €/kg de biomasa. Cabe señalar que este trabajo es un primer diseño preliminar muy prematuro y que si se desarrollara más extensamente se podrían afinar y reducir costes.

Este coste estaría ligeramente fuera de los rangos de costes para la producción de microalgas en reactores tubulares y similares, N. y col. 2011, sin embargo, se podría considerar como un precio aceptable dependiendo de las aplicaciones que se le de a esta biomasa.

Además, también se podrían plantear y desarrollar mejoras como el uso de CO_2 proveniente de gases de flujo de otras industrias, lo que reduciría en gran medida los costes de operación. También se podrían estudiar otros diseños que no requieran tanta inyección de aire, como los PBRs de paneles planos, o utilizar diseños de estanques con geometrías optimizadas (estanques en cascada), ya que pueden existir diseños de PBRs que aún no han sido probados y que podrían resultar más ventajosos. Por último, es de esperar que si la producción se aumentara se conseguiría reducir los costes de operación al unificar módulos y sistemas auxiliares, lo cual también abarataría la inversión por kg. de biomasa producida.

En cuanto a las aplicaciones, el uso para obtener biodiésel está completamente descartado para producciones que cuesten más de 1€/kg, Tan y col. 2018, ya que se incrementaría mucho el precio después del procesado para obtener los aceites necesarios para el biodiésel.

Sin embargo, su uso como complemento alimenticio y para la alimentación animal, acuicultura y ganadería extensiva si podría estar contemplado. En concreto la biomasa de *Nannochlorepis gaditana* es muy rica en ácidos grasos insaturados, así como en proteínas y carbohidratos. Es un producto con un alto valor añadido que ya se comercializa, aunque no tiene un mercado muy desarrollado. Si se utilizara la biomasa obtenida para esta finalidad se podría vender a precios de entre 60 y 100 €/kg dependiendo de como se distribuya y se comercialice. Es por ello que este primer diseño realizado para la planta de producción de *Nannochlorepis gaditana* puede ser un primer paso para la elaboración de un proyecto muy rentable y favorecedor para los inversores y la sociedad.

Bibliografía

- Acién Fernández, F.G. y col. (2001). “Airlift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: assessment of design and performance”. En: *Chemical Engineering Science* 56, págs. 2721-2732 (vid. págs. [25](#), [26](#)).
- Barros, A.I. y col. (2015). “Harvesting techniques applied to microalgae: A review”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, págs. 1489-1500 (vid. págs. [18-20](#)).
- Garret, Donald E. (1989). *Chemical Engineering Economics*. 1.^a ed. Van Nontrand Reinhold, pág. 29. ISBN: 9789401165464 (vid. págs. [51](#), [53](#)).
- Grubišić, M. y col. (2019). “Potential of Microalgae for the Production of Different Biotechnological Products”. En: *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 33, págs. 161-181 (vid. págs. [2-6](#), [16](#)).
- Hernández-Pérez, A. y col. (2014). “Microalgas, cultivo y beneficios”. En: *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 49, págs. 157-173 (vid. págs. [3](#), [4](#), [6](#), [8-13](#)).
- Ma, Y. y col. (2014). “Evaluation of the potential of 9 Nannochloropsis strains for biodiesel production”. En: *Bioresource Technology* 167, págs. 503-509 (vid. pág. [24](#)).
- Mitra, M. y col. (2015). “A euryhaline Nannochloropsis gaditana with potential for nutraceutical (EPA) and biodiesel production”. En: *Algal Research* 8, págs. 161-167 (vid. págs. [24](#), [31](#)).
- N., Norsker y col. (2011). “Microalgal production — A close look at the economics”. En: *Biotechnology Advances* 19, págs. 24-27 (vid. pág. [57](#)).
- Packer, Mike (2009). “Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy”. En: *Energy Policy* 37, págs. 3428-3437 (vid. pág. [2](#)).

- Pedro, A. San y col. (2013). “Marine microalgae selection and culture conditions optimization for biodiesel production”. En: *Bioresource Technology* 134, págs. 353-361 (vid. págs. [23](#), [24](#)).
- Peng, X. y col. (2020). “Effect of pH, Temperature, and CO2 Concentration on Growth and Lipid Accumulation of *Nannochloropsis* sp. MASCC 11 ”. En: *Oceanic and Coastal Sea Research* 19, págs. 1183-1192 (vid. págs. [43](#), [45](#)).
- Romero Villegas, G.I. y col. (2017). “Outdoor production of microalgae biomass at pilot-scale in seawater using centrate as the nutrient source”. En: *Algal Research* 25, págs. 538-548 (vid. págs. [25](#), [27](#), [29](#), [32](#), [33](#), [35](#), [49](#), [50](#)).
- San Pedro, A. y col. (2014). “Outdoor pilot-scale production of *Nannochloropsis gaditana*: Influence of culture parameters and lipid production rates in tubular photobioreactors”. En: *Bioresource Technology* 169, págs. 667-676 (vid. págs. [25-27](#), [29](#), [32](#), [33](#), [43](#), [49](#)).
- Show, K. y col. (2019). “Chapter 7 - Algal biomass harvesting and drying”. En: *Biofuels from Algae* 2, págs. 135-166 (vid. págs. [46](#), [47](#)).
- Singh, R.N. y col. (2012). “Development of suitable photobioreactor for algae production – A review”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ,Elsevier 16, págs. 2347-2353 (vid. págs. [13-18](#)).
- Sirohi, R. y col. (2022). “Design and applications of photobioreactors- a review”. En: *Bioresource Technology* ,Elsevier 349, págs. 904-912 (vid. págs. [13](#), [14](#), [16-18](#)).
- Tan, X. Bei y col. (2018). “Cultivation of microalgae for biodiesel production: A review on upstream and downstream processing”. En: *Chinese Journal of Chemical Engineering* 26, págs. 17-30 (vid. págs. [18-20](#), [57](#)).
- Torres-Tiji, Y. y col. (2020). “Microalgae as a future food source”. En: *Biotechnology Advances* 41 (vid. págs. [3](#), [4](#)).
- Tredici, M. R. y col. (2016). “Techno-economic analysis of microalgal biomass production in a 1-ha Green Wall Panel (GWP®) plant”. En: *Algal Research* 19, págs. 253-263 (vid. págs. [45](#), [49](#), [51](#)).
- Tsai, D. Dah-Wei y col. (2017). “The potential of carbon dioxide capture and sequestration with algae”. En: *Ecological Engineering Quarterly* 98, págs. 17-23 (vid. págs. [2](#)).
- Tsoglin, L.N. y col. (1996). “Closed photobioreactors for microalgal production”. En: *Russ J Plant Physiol* 43, págs. 131-136 (vid. págs. [8](#)).

Wang, B. y col. (2012). “Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier 30, págs. 904-912 (vid. págs. [9-11](#), [13](#), [15](#), [17](#), [18](#)).

8 Documentación

8.0.1 CO₂

→ Hoja de producto



Dióxido de Carbono Líquido

Denominación: Dióxido de Carbono (CO₂).

Pureza: ≥ 99,8% (de la fase líquida gasificada).

Normativa: ISO 14175 - C1 - C

Formas de suministro:

- Para pequeños consumos: desde recipientes de 600 litros.
- Para grandes consumos: se instalan en el cliente los depósitos de dióxido de carbono líquido, con su equipo correspondiente, que se llenan mediante cisternas criogénicas.

Factores de conversión:	m ³ gas (1 bar y 15 °C)	litros gas licuado (en equilibrio a -56,6°C y 5,2 bar)	kg
	1	1,569	1,848
	0,637	1	1,178
	0,541	0,849	1

Clasificación de Transporte / ADR: Clase 2,3° A N° UN 2187

Características: El Dióxido de Carbono es un gas incoloro e inodoro, presente en la atmósfera en un 0,03% vol.

El Dióxido de Carbono se suministra licuado a temperatura ambiente bajo su presión de vapor.

Nombre químico:	Dióxido de Carbono
Fórmula química:	CO ₂
Masa molar:	44,01 g/mol
Temperatura crítica:	304,21 K (31,06 °C)
Temperatura de ebullición o sublimación a 1013 mbar:	194,67 K (-78,47 °C)
Calor latente de sublimación:	136 kcal/kg
Densidad relativa al aire (1 bar, 15 °C):	1,528
Presiones de condensación:	50 bar (a 15 °C) 58,8 bar (a 20 °C)
Concentración máxima admisible en ambiente de trabajo (TLV/VLA):	5.000 ppm/v

Aplicaciones: Soldadura MAG.
Elaboración de mezclas de soldadura.
Elaboración de atmósferas controladas.
Industria química.
Carbonatación de aguas.
Tecnología alimentaria.
Tecnología criogénica.
Tecnología de estado supercrítico.

Otras formas de suministro: - Dióxido de Carbono Seco-Sonda
- Dióxido de Carbono Sonda SFE.
- Dióxido de Carbono Alta Pureza.

Sujeto a modificaciones: 33868/05.20

Región Nordeste:
Bailén, 105 - 08009 BARCELONA
Tel. Call Center: 902 426 462
customerservice@linde.com

Región Centro:
Ctra. Alcalá - Daganzo, km. 3,8
Pol. Ind. Bañuelos, Haití, 1
28806 ALCALÁ DE HENARES (Madrid)
Tel. Call Center: 902 426 464
customerservice@linde.com

Región Sureste (Levante):
Camino de Liria s/n, Apdo. de Correos, nº25
46530 PUÇOL (Valencia)
Tel. Call Center: 902 426 463
customerservice@linde.com

Región Sureste (Sur):
Pol. Ind. Ciudad del Transporte,
Real de Vellón, P-27
11591 JEREZ DE LA FRA. (Cádiz)
Tel. Call Center: 902 426 465
customerservice@linde.com

8.0.2 Compresor *Ultima™* MODELO U110RS



Fiabilidad y eficacia
sin concesiones



FICHA TÉCNICA

MODELO U110RS

Datos de rendimiento

Máx. Presión de trabajo	bar (g)	10
Rango de presión	bar (g)	4 a 10
Presión de funcionamiento	bar (g)	8
Capacidad FAD a presión de funcionamiento	m ³ /min	23,93
Potencia específica	kW min/m ³	6,84
Temperatura ambiente	°C	1 a 45
Diferencia de temperatura de descarga sobre el aire ambiente	°C	12
Nivel de ruido **	dB(A)	70

Datos de refrigeración

Capacidad del ventilador	m ³ /min	335
Calor rechazado (% máximo de la potencia de entrada)	%	95
Temperatura de descarga del aire de refrigeración por encima de la temperatura ambiente	°C	35
Pérdida de carga admisible en el conducto a temperatura ambiente 35°C / 45°C	Pa	75 / 0
Tamaño de la abertura de salida del aire de refrigeración	mm	1195 x 555

Datos eléctricos

Tensión de alimentación	V	400 +/- 10%
Frecuencia de la fuente de alimentación	Hz	50

Motor principal

Tipo	/	IE3 (IP55)
Tamaño del motor (1ª etapa / 2ª etapa)	kW	160 (80/80)

Dimensiones y peso

Longitud	mm	3244
Anchura	mm	1394
Altura	mm	1992
Peso	kg	3360

Brida de conexión de aire comprimido: según EN 10226- R 2 1/2"

Pesos y dimensiones para la máquina base, para otras variantes consulte el plano de disposición general

* Datos medidos y declarados de acuerdo con la norma ISO 1217 Edición 4, Anexo C y E

Presión de entrada de aire - 1 bar a / 14.5 psi.a

Temperatura de entrada de aire - 20 °C / 68 °F

Humedad - 0%(seco)

Medido en condiciones de campo libre y de acuerdo con la norma ISO 2151, tolerancia +/-3dB(A)

8.0.3 Intercambiador de calor URANUS 240 Zodiac



Uranus + Básico y montado - Intercambiador de calor por placas

Calentadores eléctricos > Intercambiadores > Uranus + Básico y montado - Intercambiador de calor por placas

2 AÑOS
GARANTÍA

- + Compatible con todo tipo de sistemas de calefacción doméstica (bomba de calor, caldera, geotermia y solar), incluso a baja temperatura
- + Máxima resistencia (placas de titanio, cuerpo de Noryl / Poliamida)
- + Regulación digital



Uranus de placas de titanio básico



Uranus de placas de titanio montado



URANUS 35

URANUS 70

URANUS 120

URANUS 240

Cód. Alfanumérico: Z06

PRECIO TARIFA

	URANUS 35	URANUS 70	URANUS 120	URANUS 240
Modelo básico	WJ000001 1.307 €	WJ000003 1.774 €	WJ000005 2.436 €	WJ000007 3.276 €
Modelo con carcasa	WJ000002 2.228 €	WJ000004 2.892 €	WJ000006 4.183 €	WJ000008 5.021 €

EQUIPAMIENTOS URANUS + PLUS (UAP)

- Intercambiador de placas de TITANIO de alto rendimiento
- PRIMARIO con selector regulable de 2 vías 1/4 vuelta.- 1 anti-retorno - en stand-by rosca macho Ø26/34 con boquillas para soldar Ø20/22
- SECUNDARIO - PVC Ø50
- Bomba de circulación de bajo consumo Clase A
- Cable de alimentación de 2,5 m premontado y enchufe
- Termostato con display LCD
- Interruptor de caudal
- Cable monofásico 230 V con enchufe
- Tapón de desagüe

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

	URANUS 35	URANUS 70	URANUS 120	URANUS 240
Potencia con primario a 90 °C (kW)	55	80	120	240
Potencia con primario a 60 °C (kW)	27	38	63	123
Potencia con primario a 45 °C (kW)	15	21	34	68
Presión máxima admisible primario calefacción / secundario piscina	3 bar / 2 bar			
Temperatura máx. admisible primario calefacción / secundario piscina	90 °C / 40 °C			
Alimentación eléctrica	230 V / 1 / 50 Hz			

CONEXIONES

	URANUS 35	URANUS 70	URANUS 120	URANUS 240
PRIMARIO calefacción	Ø20/22	Ø20/22	Ø20/22	Ø26/28
SECUNDARIO piscina	PVC Ø50	PVC Ø50	PVC Ø50	PVC Ø50

CAUDAL (m³/h)

	URANUS 35	URANUS 70	URANUS 120	URANUS 240
PRIMARIO calefacción	1,6	2,1	2,8	6,3
SECUNDARIO piscina	2	2,9	4,3	8,7

PÉRDIDAS DE CARGA (mCA)

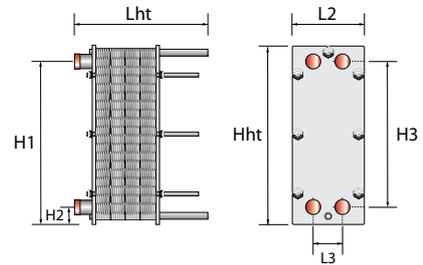
	URANUS 35	URANUS 70	URANUS 120	URANUS 240
PRIMARIO calefacción	1500	1200	1000	2000
SECUNDARIO piscina	2400	2300	2500	3800

PESO

	UAN/UAP 35	UAN/UAP 70	UAN/UAP 120	UAN/UAP 240
Modelo básico (UAN) (kg)	14	15	17	31
Modelo montado UAP (kg)	29	30	31	50

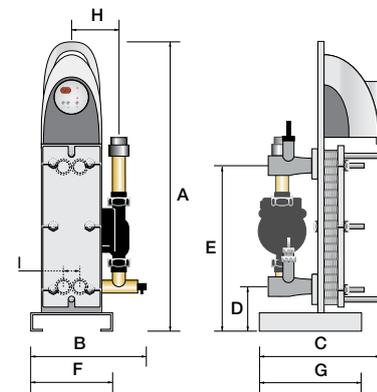
DIMENSIONES (MM) MODELO BÁSICO (UAN)

	UAN 35-70-120	UAN 240
Lht	255	407
L2	140	200
L3	50	60
Hht	380	500
H1	339	429
H2	41	75
H3	298	357



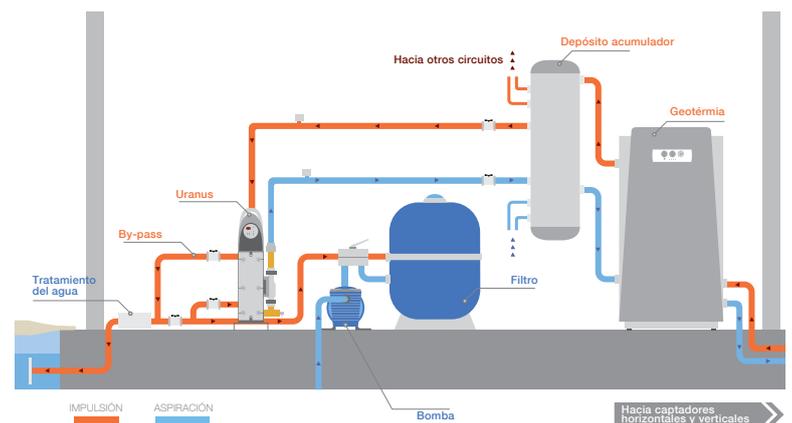
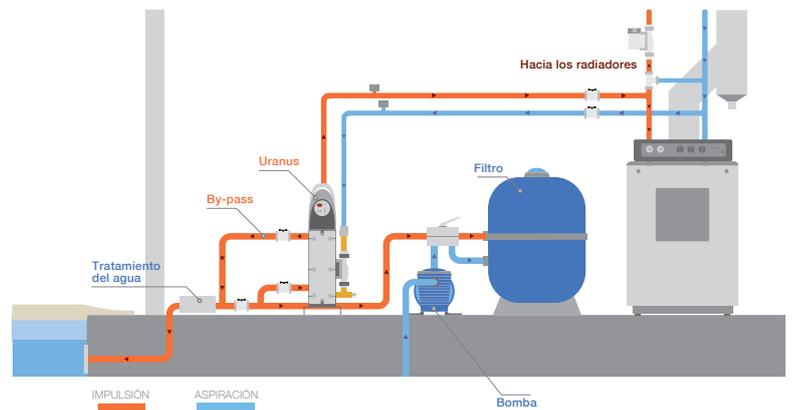
DIMENSIONES (MM) URANUS PLUS (UAP)

	UAP 35-70-120	UAP 240
A	758	840
B	334	347
C	415	480
D	116	137
E	414	494
F	250	250
G	200	450
H	127	148
I	50	60



INSTALACIÓN

- En el local técnico, cerca de la caldera, en la salida de la filtración (prever un bypass).
- Casos especiales: intercambiador alimentado por una central de geotermia o una bomba de calor. Hay que dimensionar el intercambiador en función de las necesidades de calentamiento de la piscina, las características del intercambiador con un primario a 45°C o 60°C (ver tabla de características) y la potencia de la geotermia.
- Para el correcto funcionamiento de la geotermia, aconsejamos ubicar un depósito de compensación (depósito de inercia), siguiendo el esquema de arriba.



8.0.4 Lamella tank XBC-50 Gonyuan Enviroment

Data / Model	XBC-5	XBC-10	XBC-20	XBC-30	XBC-40	XBC-50	XBC-60	XBC-80	XBC-100
Capacity(m ³ /h)	5	10	20	30	40	50	60	80	100
Motor power(kw)	/		0.55						
Scraper travelling speed (m/min)	/		2.26	2.1	2.3	2.5	2.55	2.64	2.68
Inclined plate quantity (pc)	10	15	38	46	50	56	58	60	64
Inclined plate size (mm)	1060*1200	1350*1465	750*1600	900*1600	1050*1600	1110*1600	1150*1800	1200*1200	1300*2000
Equivalent settling area (m ²)	6.36	14.83	22.8	33.12	42	49.7	60.03	72	83.2
Length (mm)	2400	3000	3750	4050	4340	4525	4725	4975	5175
Width (mm)	1340	1740	2220	2520	2820	3090	3190	3290	3490
Height (mm)	3050	3200	4650	4650	4700	4900	5100	5330	5330
The height from inlet pipe to ground (mm)	1300	1250	3350	3350	3350	3600	3600	3825	3825
The height from outlet pipe to ground (mm)	2550	2680	3400	3400	3450	3450	3450	3825	3825
Inlet pipe (mm)	DN80	DN100	DN125	DN150	DN150	DN150	DN150	DN200	DN200
Outlet pipe (mm)	DN80	DN100	DN125	DN150	DN150	DN150	DN150	DN200	DN200
Sludge discharge pipe (mm)	DN150		DN200						
Inspection manhole (mm)	/					DN600			

8.0.5 DGX 200/2/G50V A0CM(T)5 Zenit

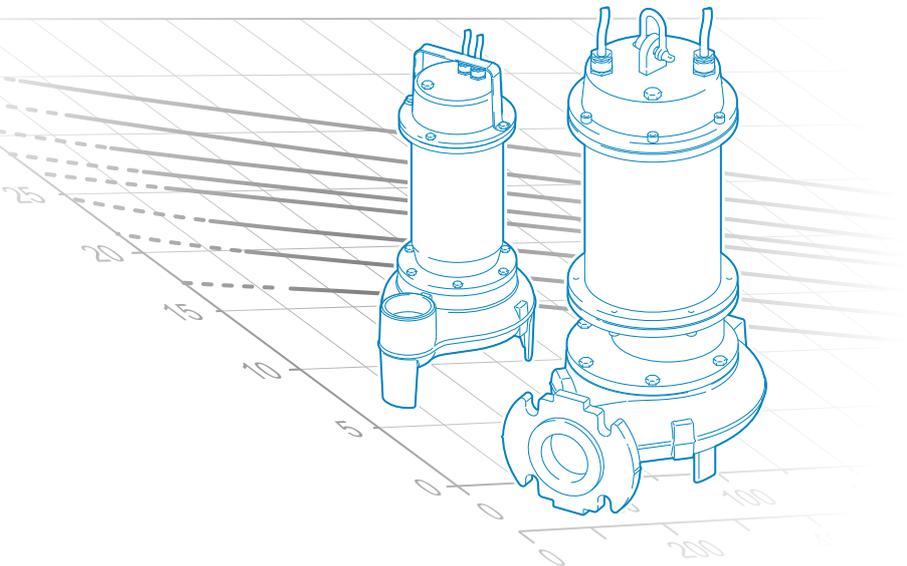


better together

50Hz

X - B - Y series

DGX
DRX
DGB
DRB
DRY



D A T A B O O K L E T

zenit.com

EN

X Series

General characteristics



- AISI 316 stainless steel lifting and carrying handle.
- CF-8M steel construction which makes the pump suitable for use in saline environments.
- Oil-bath motor with thermal protections.
- Shielded ball bearings with lifetime autolubrication
- Two mechanical seals in silicon carbide (2SiC).
- Wide free passage allowing the expulsion of solids and preventing fouling of the impeller (DGO)
- Intake strainer in stainless steel (DRO)

Hydraulic families



DG (Draga)

page 7

- Vortex impeller in CF-8M steel.
- Ideal for lifting strongly corrosive or aggressive strained liquids, especially in the chemical industry. Intended for specific industrial applications.



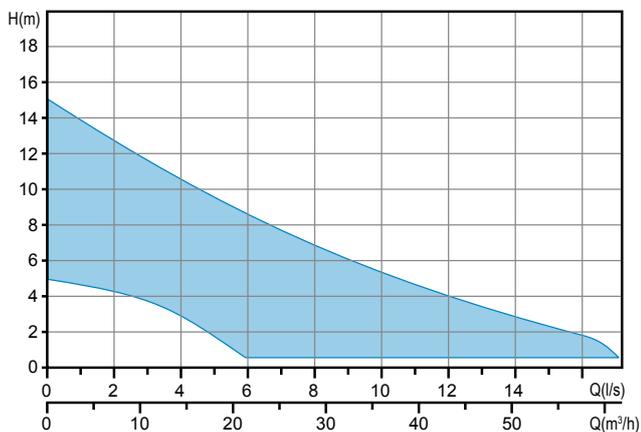
DR (Dreno)

page 15

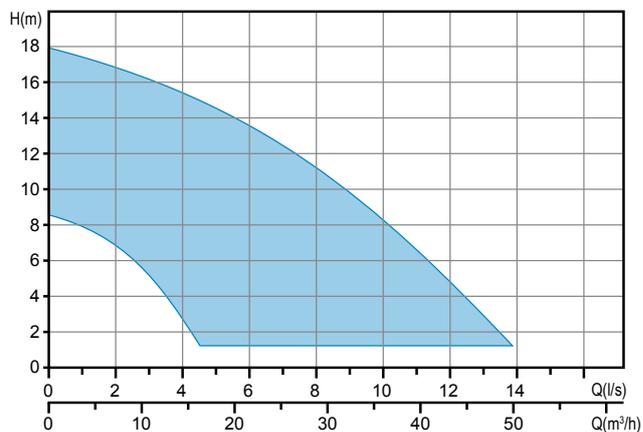
- Multichannel open impeller in CF-8M steel.
- Designed for the treatment of strongly corrosive or chemically aggressive liquids, especially in the chemical industry, this unit is for a specific industrial application.

Operating ranges

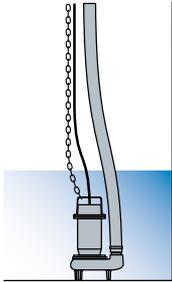
DGX



DRX

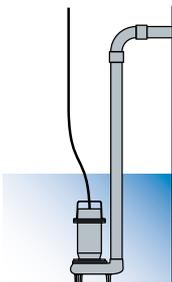


Installations



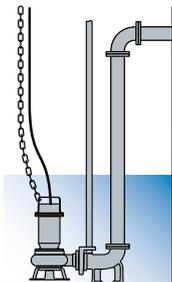
Free installation

The electric pump, standing on its feet or base, is connected to the delivery flexible pipe using a joint fixed to the discharge. This installation allows to move easily the electrical pump



Fixed installation

The electric pump, standing on its feet or base, is connected to the delivery pipe, which is screwed to the discharge if threaded, or fixed to a bend if the port is flanged. The pump-hose connection may be threaded or flanged, depending on the pump fitting.



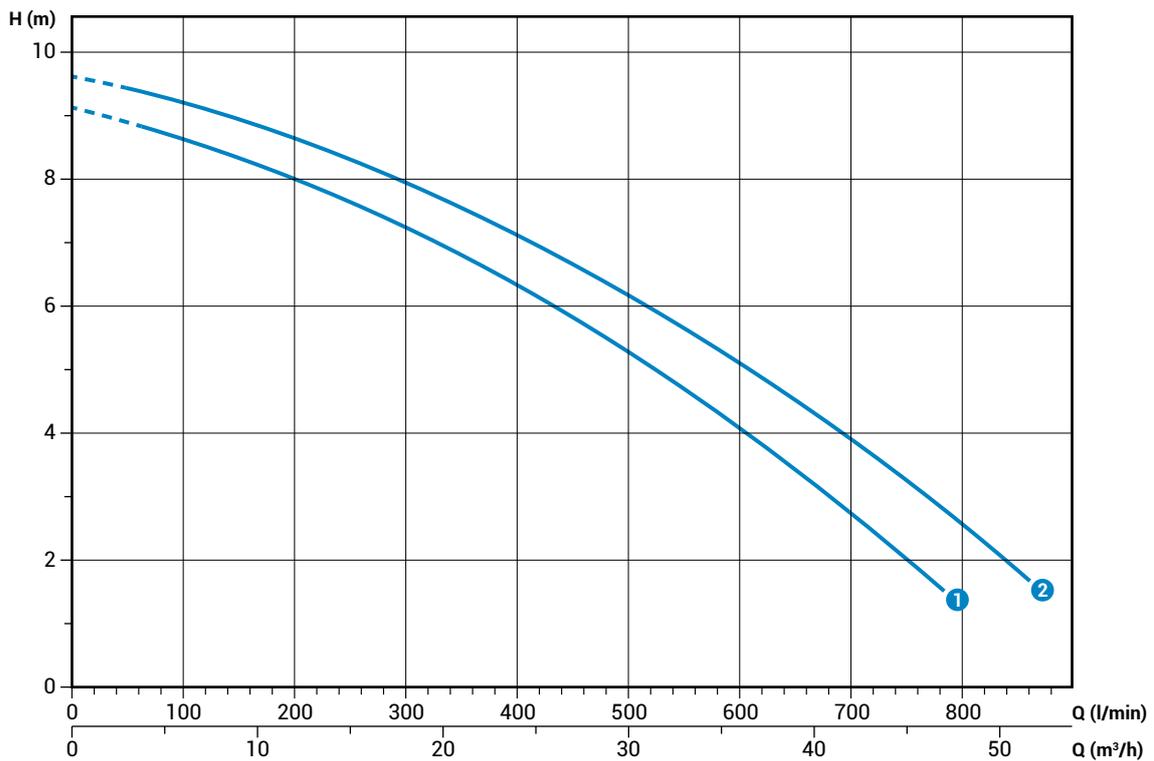
Installation with base coupling foot

For submerged installation, available for electric pumps with flanged or threaded horizontal discharge. The coupling device is fixed to the bottom of the tank and the pump is lowered in with the aid of two guide pipes fitted earlier, until the connection to the foot is completed. The delivery pipe is fixed to the coupling device discharge. This device makes routine checks, any maintenance work or replacement of the pump extremely easy, with no need to empty the tank.

Performances

	l/s	0	2	4	6	8	10	12	14
	l/min	0	120	240	360	480	600	720	840
	m³/h	0	7.2	14.4	21.6	28.8	36.0	43.2	50.4
1	DGX 150/2/65 A0CM(T)5	9.1	8.5	7.7	6.7	5.5	4.1	2.5	
2	DGX 200/2/65 A0CM/(T)5	9.6	9.1	8.4	7.5	6.4	5.1	3.7	2.0

Characteristic curves according to UNI/EN ISO 9906



Technical data

	V	Phases	P1 (kW)	P2 (kW)	A	Rpm	Start	Cable	Ø	Free passage	
1	DGX 150/2/65 A0CM5	230	1	-	1.1	8.2	2900	Dir	4G1	DN65	50 mm
2	DGX 200/2/65 A0CM5	230	1	-	1.5	9.3	2900	Dir	4G1	DN65	50 mm

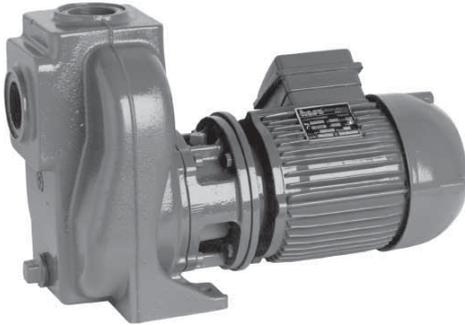
	V	Phases	P1 (kW)	P2 (kW)	A	Rpm	Start	Cable	Ø	Free passage	
1	DGX 150/2/65 A0CT5	400	3	-	1.1	2.7	2900	Dir	4G1	DN65	50 mm
2	DGX 200/2/65 A0CT5	400	3	-	1.5	3.5	2900	Dir	4G1	DN65	50 mm

8.0.6 GT-80-140 de la marca Bombas Hasa



Serie GT

Electrobombas centrífugas de superficie autoaspirantes para aguas residuales



APLICACIONES / APPLICATIONS / APPLICATIONS

- ES** | Electrobombas autoaspirantes ideales para el drenaje de zanjas, vaciado de estanques, pozos, bombeo de aguas residuales o líquidos químicos.
- EN** | Self-priming electro-pumps suitable for ditch drainage, pond emptying, wells, waste water or chemical liquid pumping.
- FR** | Électropompes auto-amorçantes idéales pour le drainage de fossés, la vidange d'étangs, de puits, le pompage d'eaux résiduelles ou de liquides chimiques.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS / TECHNICAL CHARACTERISTICS / CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Tipo Type	Motor Moteur	rpm	IP	Aislamiento Isolation	Refrigeración Cooling Refroidissement	Temp. max. (°C)	Viscosidad max. Max. viscosity Viscosité max.	Aspiración max. Max. suction depth Aspiration max.
Autoaspirante para aguas residuales Self-priming for waste water Auto-amorçante pour eaux résiduelles	Eje prolongado acoplado con brida Extended shaft coupled with flange Arbre prolongé couplé par bride	2900	54	F	Ventilación externa External ventilation Ventilation externe	95	150 mPa·s	7 m.

MATERIALES / MATERIALS / MATÉRIAUX

ES Cuerpo bomba: Fundición de hierro. Soporte motor: Fundición de hierro. Turbina: Fundición de hierro. Eje: Acero inoxidable. Cierre mecánico: Cerámica/Grafito.	EN Pump body: Cast iron. Motor bracket: Cast iron. Impeller: Cast iron. Shaft: Stainless steel. Mechanical seal: Ceramic/Graphite.	FR Corps de pompe: Fonte. Support moteur: Fonte. Turbine: Fonte. Arbre: Acier inoxydable. Garniture mécanique: Céramique/Graphite.
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

CURVA / CURVE / COURBE

Modelo Model Modèle	Cod.	P2		I (A)			Ø		Altura manométrica / Head / Hauteur (m)											Ø Sólidos Solids Solides (mm)			
		KW	CV	3 ~ 230V	3 ~ 400V	3 ~ 690V	Asp	Imp	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	32				
GT-32-110	1400	0,75	1	3,3	1,9	-	1 1/4"	1 1/4"	17	14,5	10,5	6	0,5									6	
GT-32-150	1401	2,2	3	8,5	4,9	-	1 1/4"	1 1/4"			21	19	17,5	15,5	13,5	11	8	2				5	
GT-40-110	1402	1,1	1,5	4,3	2,5	-	1 1/2"	1 1/2"			27	22	15,5	8	0,5								10
GT-50-125 B	1403	1,5	2	5,9	3,4	-	2"	2"			31	26	19	11	4								8
GT-50-125	1404	2,2	3	8,5	4,9	-	2"	2"				40	36	26	12	5							16
GT-65-135	1405	4	5,5	13,6	7,9	-	65	65				60	55	45	28	6							19
GT-65-155	1406	5,5	7,5	-	18,8	10,9	65	65					65	62	60	52	45	30	15	5			19
GT-80-140	1407	4	5,5	13,6	7,9	-	80	80				90	82	72	60	45	17						19