

MEMORIA DEL ESTUDIO TÉCNICO–ECONÓMICO PARA LA IMPLANTACIÓN DE UNA PLANTA EXPERIMENTAL DE FOTOBIORREDUCCIÓN DE CO₂ MEDIANTE EL CULTIVO FORZADO DE MICROALGAS

ANTECEDENTES

La producción en masa de microalgas fue planteada por R. Harder y H. von Witsh en 1942 para producir industrialmente lípidos mediante el cultivo de diatomeas sometidas a limitación de nitrógeno (Richmond 1986). A partir de los años 50 y desde entonces la investigación en este campo ha ido progresando de manera continuada. Diversos trabajos norteamericanos fueron demostrando que la composición química de *Chlorella*, principalmente su contenido en lípidos y proteínas, podían ser fácilmente controlados variando las condiciones de cultivo. Sin embargo, a nivel industrial fue Japón quien logró desarrollar los cultivos de microalgas y comercializar *Chlorella* como “alimento natural” o en forma de un extracto soluble en agua denominado “*Chlorella* factor de crecimiento” (Richmond 1986).

Los sistemas de cultivo iniciales se basaron en la siembra del cultivo en laboratorio y en una posterior fase de producción en tanques circulares de entre 5-15 m de diámetro y unos 30-40 cm de profundidad con agitación mecánica. Posteriormente fueron afianzándose los sistemas de cultivo denominados sistemas “raceway”, consistentes en tanques rectangulares con paredes divisorias y agitación por paletas. Las dimensiones de los *raceway* industriales oscilan entre 500 y 4,000 m², por lo cual pueden ser replicados fácilmente (García Reina 1999). Son sistemas altamente productivos permitiendo tasas de duplicación de la biomasa en 2-3 días con lo que el cosechado de la biomasa puede realizarse de forma continua.



En la actualidad se va afianzando el cultivo de microalgas en fotobiorreactores compuestos por tubos transparentes (de vidrio, plexiglás, polietileno, etc.) de entre 2 y 40 cm de diámetro, por cuyo interior fluye el cultivo. Esta técnica permite aumentar la producción por unidad de volumen, reduciendo las pérdidas por evaporación de agua y maximizar la eficacia en la utilización de nutrientes y CO_2 que se inyecta de manera forzada. En estos fotobiorreactores se alcanzan tasas de duplicación de la biomasa de 3-4 h. La eficiencia de este tipo de sistemas obliga a monitorizar, controlar y automatizar las instalaciones a fin de detectar cualquier carencia o anomalía del cultivo.

Si bien el cultivo de microalgas estuvo relacionado inicialmente con la producción de alimentos, enseguida se pensó utilizar fotobiorreactores en los programas espaciales como sistema de regeneración de aire (absorber CO_2 y generar O_2) y de los residuos metabólicos de la actividad humana (fertilizantes) generando alimento de alto valor nutritivo durante las misiones extraterrestres. En la actualidad, uno de los principales objetivos es el de la producción de biocombustibles, con dos líneas básicas, la producción de bioalcohol y la de biodiesel. Particular mención merece el interés creciente que está concitando el cultivo de microalgas, por su alta tasa de eficiencia en la producción de materia orgánica, la fijación biotecnológica de CO_2 atmosférico para retirarlo del ciclo aéreo del carbono y confinarlo en formas sólidas —orgánicas— a fin de disminuir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

En este contexto es donde se incardina el presente proyecto: la fijación biotecnológica de anhídrido carbónico atmosférico para producción de materia orgánica susceptible de diversos usos, entre los cuales se encuentra su reutilización como combustible dentro de la planta productora del CO_2 , en sustitución de algunos de los utilizados actualmente, como los lodos de depuradora de aguas residuales, o incluso los derivados del petróleo.



OBJETIVOS GENERALES DEL PROYECTO.

Los objetivos generales del proyecto son los siguientes:

1. Desarrollar y poner a punto un sistema biotecnológico fiable, eficaz y eficiente capaz de captar cantidades arbitrarias de anhídrido carbónico procedente de la combustión de combustibles fósiles y fijarlas en formas orgánicas mediante el cultivo forzado de microalgas.
2. Diseñar un sistema de cultivo de microalgas que sea modulable y susceptible de ser replicado a fin de escalar la capacidad de digerir CO₂, de acuerdo a la producción o disponibilidad de gas.
3. Aplicar el diseño a una planta de producción de cemento con el fin de reducir las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión en los hornos de clinker.



NECESIDAD DE ABORDAR EL PROYECTO

Cementos del Marquesado, S.A. tiene previsto iniciar sus actividades productivas en breve. El dimensionamiento de la planta prevé un volumen de producto para cuya consecución será necesario emitir a la atmósfera hasta unas 800.000 toneladas de anhídrido carbónico (CO₂) al año. Este gas es el resultado de los propios procesos de fabricación del cemento, más los productos de la combustión mediante la cual es posible alcanzar la temperaturas de cocción necesaria, que también se suman a la emisión final.

La autoridad medioambiental, en concreto la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía mostró en su día la disconformidad con la actividad si no se reducía el volumen de emisiones de CO₂ anuales, sin cuya condición no emitiría una Declaración de Impacto Ambiental positiva.

El punto muerto en la toma de una decisión final y la inexistencia de procedimientos estandarizados que permitan la reducción de las emisiones de CO₂ han ocasionado hasta la fecha un retraso en la ejecución del proyecto de inversiones, con el consiguiente costo de oportunidad.

Estudiadas detenida y cuidadosamente las posibilidades razonables de dar satisfacción a las exigencias del órgano medioambiental, Cementos del Marquesado se ha comprometido a reducir al 50% sus emisiones anuales de gases de efecto invernadero, lo que en consecuencia supone reducir las emisiones estimadas desde unas 800.000 toneladas anuales a tan solo 400.000. En otras palabras, Cementos del Marquesado va a poner en marcha un ambicioso y novedoso proyecto mediante el cual se desarrollarán metodologías prácticas para confinar hasta 400.000 toneladas de CO₂ anuales.



POSIBLES PROYECTOS FUTUROS DERIVADOS DEL PROYECTO.

Una vez establecidas las condiciones óptimas para el cultivo a escala industrial de las microalgas y diseñado y probado el sistema modular de fotobiorreactores, existen tres vías de investigación y desarrollo posteriores inmediatas:

1. **P1. Escalado industrial del proceso.** Aplicación directa a la captura de CO₂ de la planta cementera del Marquesado. Mediante este futuro proyecto se diseñará el escalado del sistema para adecuarlo a la producción real de gas de la planta. Se probarán y resolverán los problemas derivados de la nutrición de los fotobiorreactores y de la cosecha masiva de materia orgánica. Se pondrán a punto los sistemas de automatización de la planta y de la medición, monitorización y control de los parámetros de cultivo: condiciones físicas, químicas y biológicas. Será de especial relevancia el desarrollo de la sistematización del proceso de cosecha de microalgas y el diseño óptimo de los sistemas industriales de separación y transporte de los productos hasta el lugar de empleo o distribución.
2. **P2. Ingeniería genética.** Dentro de este proyecto, mediante investigación y mejora genética, se depurarán las líneas para producir cepas de microalgas más eficientes en la conversión de carbono inorgánico en formas orgánicas y de mejor rendimiento para producción de energía térmica en la planta cementera o en otros usos de calefacción, al tiempo que se obtendrán variedades resistentes a los agentes adversos externos, como infecciones por bacterias y presencia de gases tóxicos en los ciclones de alimentación.
3. **P3. Desarrollo de usos alternativos de mayor valor añadido.** La línea de investigación y desarrollo más atractiva reside en el establecimiento de usos alternativos para las microalgas cultivadas y cosechadas. Dentro de éstos se encuentran en primer lugar los bioenergéticos, con la producción de



biocombustibles a escala industrial, particularmente biodiesel, en tasas eficientes. Pero tampoco hay que descartar los usos alimentarios. Tiene un prometedor futuro la producción de alimentos a partir de las microalgas. En un primer paso, la producción de piensos para alimentación animal y, dentro de un programa mucho más ambicioso, la investigación y el desarrollo de metodologías para la producción de pulpa gluco-lipo-protéica susceptible de ser empleada en alimentación humana, primeramente en mezclas y finalmente son la sola presencia de aditivos autorizados.



FORMAS DE CONFINAMIENTO DEL CO_2

En el estado técnico y del conocimiento actual, existen diversos procedimientos de confinamiento del anhídrido carbónico para retirarlo de la atmósfera. Los procedimientos estandarizados pueden clasificarse en mecanismos físicos, químicos, biológicos y biotecnológicos.

Son mecanismos físicos aquéllos que no alteran la naturaleza íntima del gas producido, limitándose simplemente a transportarlo y almacenarlo en lugares alejados del centro de emisión y aislados de la atmósfera. Existen dos procedimientos principales:

1. Almacenamiento subterráneo. Consiste en conducir el CO_2 hacia cavidades subterráneas, frecuentemente minas abandonadas, donde se inyecta o se almacena comprimido.
2. Almacenamiento marino. Este tipo de almacenamiento requiere simplemente el transporte licuado del gas hacia mar abierto, en cuyo seno, a una profundidad idónea, se le hace burbujear, siendo disuelto por el propio agua marina, cuya capacidad de concentrar CO_2 aumenta al disminuir la temperatura. Así mismo, la salinidad incrementa la solubilidad del CO_2 . El transporte puede realizarse mediante cisternas o mediante gaseoductos adecuados.

En cuanto al primero de los dos procedimientos, existen diversos tipos, entre los que se citan las cavernas salinas y otras trampas geológicas profundas. Sin embargo, ninguna zona en Andalucía ha sido citada como apta dentro de los estudios recientes al respecto, si bien algunos documentos citan la cuenca del Guadalentín y el área de Alicún de la Torre como posibles sistemas naturales de almacenamiento.

El confinamiento marino fue propuesto por vez primera en 1977, y a partir de entonces se han ido sucediendo estudios e investigaciones, mucho más intensos en



los últimos años. Los fundamentos son bien conocidos pero la tecnología se encuentra en fase de diseño conceptual o de ensayo en laboratorio y no existe aún ninguna instalación experimental. Los modelos físicos desarrollados indican que la efectividad del secuestro puede alcanzar a cientos de años, dependiendo de la profundidad a la que se inyecte. Como dato negativo de esta tecnología se cita su alto consumo energético, ya que es necesario comprimir el CO_2 hasta presiones muy elevadas, lo cual se acentúa cuando la fuente de CO_2 no está cerca de la costa.

Dentro de los mecanismos químicos se consideran los procedimientos mediante los cuales se altera la naturaleza química del gas original, pasando a otras formas no solubles. De este modo, el carbono queda fijado inorgánicamente en la estructura química de otros compuestos. Hay ciertos minerales aptos para la captura del CO_2 como son la calcita, la magnesita o la siderita.

Los mecanismos biológicos son procesos basados en la fotosíntesis. Existen tres vías posibles, de acuerdo al organismo o sistema fotosintético que se utilice.

1. Fotosíntesis forestal. Fijación del CO_2 basada en la plantación y explotación racional de superficies forestales, con retirada periódica de biomasa.
2. Fotosíntesis agrícola. Fijación basada en el crecimiento de especies herbáceas o arbustivas destinadas a la producción de biomasa orientada a la alimentación animal o humana, a la producción de fibras textiles, o a la producción de biocarburantes, particularmente bioalcohol o biodiesel.
3. Utilización en cultivos bajo plástico. Uso del CO_2 para incrementar su concentración natural en cultivos forzados bajo plástico, especialmente en invernaderos, y propiciar un incremento de la productividad vegetal.



TECNOLOGÍA APLICABLE AL PRESENTE PROYECTO

Los procedimientos biotecnológicos siguen en esencia el mismo principio de fijación basado en la fotosíntesis, pero utilizando organismos más eficientes que los vegetales superiores en la conversión del carbono inorgánico a formas orgánicas.

La fijación biotecnológica de anhídrido carbónico está basada en el cultivo forzado de algas de diversas especies. En la experiencia con que se cuenta hasta la actualidad, los mejores resultados se han obtenido utilizando determinadas especies de algas pluri y unicelulares. Cada uno de estos tipos tiene características particulares, con ventajas e inconvenientes.

Las algas pluricelulares tienen menor eficiencia fijadora que las microalgas, es decir, su tasa de conversión o asimilación del CO₂ disuelto en el medio de cultivo es menor que el que corresponde al otro gran grupo de algas. Su cultivo se basa en sistemas artesanales que requieren la intervención intensiva de mano de obra, especialmente en las tareas de cosecha. Por su naturaleza, existe una cierta dificultad de automatización de los procesos productivos a escala industrial. Como ventaja con respecto al otro grupo está el carácter comestible de determinadas especies y su alta digestibilidad, lo que las hace muy adecuadas para ser empleadas en alimentación humana.

Los cultivos de microalgas tienen la mayor eficiencia en conversión del carbono de forma inorgánica a orgánica y además el contenido en carbono de su materia seca es el más alto de los conocidos entre el material vegetal. Puede cultivarse fácilmente en diversas modalidades, todas ellas de más fácil cosecha que los sistemas artesanales de las algas pluricelulares. Las formas más comunes de cultivo se llevan a cabo en tanques circulares, sobre sistemas *raceway* en tanques rectangulares y, finalmente, en fotobiorreactores.



En cuanto a especies probadas, existe bastante literatura científica al respecto, y destacan como géneros más estudiados *Spirulina sp.* y *Chlorella sp.*. Dentro de este último género, la especie que ha resultado ser más eficiente en la tasa de fijación de carbono es *Chlorella pyrenoidosa*.

La característica que hace preferible el método de fotobiorreactores es el control exhaustivo al que puede someterse el cultivo en todos los parámetros físicos, químicos y biológicos. Permite también la inyección de aire enriquecido en CO_2 en tasas conocidas. Usando los gases procedentes de la combustión de los quemadores de los hornos se posibilita al mismo tiempo mantener la temperatura de crecimiento ideal, ahorrando una importante cantidad de energía, que en cualquier otro caso habría que suministrar, habida cuenta del régimen térmico de la zona de implantación de la planta.

Los sistemas de cultivo en biorreactores pueden ser discontinuos o continuos. Estos últimos permiten la monitorización y control completo del proceso.

Un aspecto de suma importancia en la viabilidad del sistema a media y gran escala es la automatización de la cosecha, que habrá de adaptarse al sistema continuo. La opción más adecuada bajo estas circunstancias es la centrifugación industrial del caldo de cultivo, una vez alcanzado el plazo de crecimiento que se establezca.

En la propuesta de este Proyecto, el diseño del sistema se atenderá a tres condiciones básicas:

- Deberá ser modulable. El sistema de cultivo consistirá en unidades o módulos fácilmente manejables y que cumplan íntegramente las fases del cultivo.
- Será escalable. La instalación completa se compondrá del número requerido de módulos, de acuerdo a las necesidades de consumo de CO_2 , por simple replicación de éstos, todo ello bajo un diseño geométrico preestablecido que permitirá el manejo y el mantenimiento de la instalación.



- Finalmente, el equipo de desarrollo de este Proyecto se ha propuesto conseguir un diseño modular compacto, esto es, que ocupe la menor cantidad de superficie por unidad de volumen de caldo de cultivo. Las unidades de proceso serán susceptibles de transportar en contenedor normalizado de 20'x8'x8'6" (5898 mm x 2393 mm x 2393 mm).

Los fotobiorreactores más extendidos son los de tipo cilíndrico, y dentro de ellos existen diversos diseños, entre los que cabe señalar los tubulares, los de disposición vertical, los horizontales y los inclinados. La propuesta de este proyecto es utilizar un tipo de biorreactor cilíndrico de 42,5 cm de diámetro.



PRINCIPALES ACTIVIDADES TÉCNICAS DEL PROYECTO DE IMPLANTACIÓN

El desarrollo del futuro Proyecto de implantación contempla las siguientes actividades técnicas.

1. TRABAJOS DE DISEÑO CONCEPTUAL Y CÁLCULO
 - 1.1. Estudio del marco legal
 - 1.2. Estudio del estado del arte
 - 1.3. Dimensionamiento general del sistema
 - 1.4. Trabajos preliminares
 - 1.4.1. Acondicionamiento del terreno
 - 1.4.2. Diseño de las explanaciones
 - 1.4.3. Movimiento de tierras
 - 1.4.4. Drenaje y saneamiento
 - 1.4.5. Muros de contención
 - 1.5. Sistema de captura de gases
 - 1.5.1. Boina de captura
 - 1.5.2. Sistema de depuración de humos
 - 1.5.2.1. Sistema de reducción selectiva catalítica de NO_x
 - 1.5.2.2. Sistema de reducción de SO_x por vía seca
 - 1.5.3. Canalización de gases
 - 1.5.4. Intercambiador de calor
 - 1.6. Módulo fotobiorreactor
 - 1.6.1. Diseño funcional
 - 1.6.2. Cálculo estructural
 - 1.6.3. Cálculo hidráulico
 - 1.7. Sistema de fertilización
 - 1.7.1. Dimensionamiento y diseño
 - 1.7.2. Cálculo hidráulico y mecánico
 - 1.8. Conducciones
 - 1.8.1. Diseño
 - 1.8.2. Galerías de servicio
 - 1.8.3. Cálculo hidráulico
 - 1.8.4. Cálculo estructural y mecánico
 - 1.8.5. Diseño de la valvulería



- 1.9. Maquinaria
 - 1.9.1. Sistema de cosecha pseudocontinua
 - 1.9.1.1. Diseño y dimensionamiento
 - 1.9.1.2. Cálculo
 - 1.9.2. Sistema de desecación
 - 1.9.2.1. Diseño y dimensionamiento
 - 1.9.2.2. Cálculo
 - 1.9.3. Sistema de condensación y recuperación de agua
 - 1.9.3.1. Diseño y dimensionamiento
 - 1.9.3.2. Cálculo
 - 1.9.4. Sistema de almacenamiento y expedición de la harina
 - 1.9.4.1. Diseño y dimensionamiento
 - 1.9.4.2. Cálculo
- 1.10. Construcciones auxiliares
 - 1.10.1. Balsa de regulación de agua limpia
 - 1.10.2. Depósito de cosecha
 - 1.10.3. Silos de harina
 - 1.10.4. Tanque de re-inyección
 - 1.10.5. Nave de maquinaria
 - 1.10.6. Nave almacén
 - 1.10.7. Nave taller
 - 1.10.8. Edificio de oficinas y laboratorio
- 1.11. Electrificación
 - 1.11.1. Media tensión y centros de transformación
 - 1.11.2. Baja tensión
 - 1.11.3. Cuadros de protección y mando
- 1.12. Automatismos y control
 - 1.12.1. Diseño
 - 1.12.2. Mediciones y cálculo
 - 1.12.3. Cuadros de monitorización y control de proceso
 - 1.12.4. Telecomunicaciones
 - 1.12.5. Puntos de acceso remoto
 - 1.12.6. Redacción de carta de especificaciones
- 1.13. Urbanización
 - 1.13.1. Pavimentaciones
 - 1.13.2. Iluminación
 - 1.13.2.1. Diseño y dimensionamiento



- 1.13.2.2. Cálculo
- 1.13.3. Cerramiento perimetral
- 1.13.4. Medidas correctoras de impacto ambiental
- 1.13.5. Jardinería
- 1.14. ESTUDIO DE COSTES DE EXPLOTACIÓN
 - 1.14.1. Costes de explotación
 - 1.14.2. Costes de mantenimiento
 - 1.14.3. Estudio de amortización
- 2. TRABAJOS DE REDACCIÓN DE ANTEPROYECTO Y ESTUDIO DE VIABILIDAD
 - 2.1. Redacción de Anteproyecto (según UNE 157001)
 - 2.1.1. Índice
 - 2.1.2. Memoria
 - 2.1.3. Anejos
 - 2.1.4. Planos
 - 2.1.5. Pliego de Condiciones
 - 2.1.6. Mediciones
 - 2.1.7. Presupuesto
 - 2.1.8. Estudios con entidad propia
 - 2.1.8.1. Estudio de Seguridad y Salud Laboral
 - 2.1.8.2. Estudio de Impacto Ambiental
 - 2.1.8.3. Gestión de Residuos
 - 2.1.8.4. Control de Calidad
 - 2.2. Redacción del Estudio de Viabilidad Económico-Financiera



PRINCIPALES ACTIVIDADES TÉCNICAS DEL PROYECTO EXPERIMENTAL

Para que la implantación a gran escala sea posible es necesario abordar previamente un Proyecto Experimental, al que se refiere particularmente esta Memoria.

Este Proyecto Experimental se desarrollarán en tres fases sucesivas. En la primera se establecerá el diseño inicial de los elementos esenciales de la instalación, se construirá un prototipo a escala real, se pondrá a prueba el diseño adoptado y se introducirán las modificaciones oportunas, si hubiere lugar.

En una segunda fase se duplicará el prototipo para poner en marcha una unidad de proceso a pequeña escala y se contribuirá de esta manera a solucionar los problemas de replicación del módulo fotobiorreactor básico.

Finalmente se desarrollará un tercera fase en la que se validará el sistema y se establecerán las pautas para la futura replicación a gran escala de la instalación, según las actividades técnicas enumeradas en el apartado anterior.

En el proyecto experimental se seguirá un flujo de procesos esquematizado como sigue:

1. Fase 1. Diseño conceptual y cálculo

1.1. Estudio del estado del arte.

En la actualidad existen diversos métodos de confinamiento del anhídrido carbónico para retirarlo de la atmósfera. Obviando los mecanismos físicos y químicos, en esta fase del trabajo se profundizará en los procedimientos microbiológicos, poniendo al día los conocimientos y las tecnologías desarrolladas a nivel de laboratorio y a pequeña escala experimental, a fin



de partir de una sólida base que permita un avance más seguro en el planteamiento general de la actuación.

Más allá de la experiencia que el equipo investigador tiene en el diseño de los sistemas de cultivo forzado de microalgas, consideramos vital este punto para evitar recorrer cualquier camino que pudiera retrasar la implantación exitosa del proyecto.

1.2. Dimensionamiento del sistema

Un punto extremadamente sensible en el dimensionamiento del sistema completo es la estimación de la productividad del cultivo de microalgas. La literatura científica proporciona márgenes bastante amplios que llevan a dimensionamientos que difieren hasta en un orden de magnitud unos de otros. Las investigaciones desarrolladas desde hace años por miembros del equipo investigador, en cuya materia son especialistas de reconocido prestigio internacional, permiten asegurar un margen de error mínimo, solamente derivado de la transposición de la escala de cultivo en laboratorio a la escala de producción industrial, y aun ello, controlable a través de los parámetros de cultivo y de las medidas de monitorización y de gobierno que se prevé introducir en el diseño.

1.3. Módulo fotobiorreactor

1.3.1. Diseño funcional

El punto crucial de todo el proceso que se plantea en este Proyecto es sin lugar a dudas el diseño del módulo básico de fotobiorreactor. De su viabilidad y eficiencia derivará el de toda la planta de proceso futura, y en consecuencia, el cumplimiento o no del compromiso de confinar 400.000 t anuales de CO₂.

Los cultivos de microalgas tienen la mayor eficiencia en conversión del carbono de forma inorgánica a orgánica y además el contenido en carbono de su materia seca es el más alto de los conocidos entre el material vegetal. Pueden cultivarse fácilmente en diversas modalidades, todas ellas de más fácil cosecha que los sistemas artesanales de las algas pluricelulares. La experiencia del Equipo



Redactor le inclina a utilizar como especie de alga *Chlorella pyrenoidosa*, por ser la más eficiente en la tasa de fijación de carbono, y el sistema de cultivo elegido es el de fotobiorreactores, frente a los demás sistemas *raceway*.

La característica que hace preferible el método de fotobiorreactores es el control exhaustivo al que puede someterse el cultivo en todas los parámetros físicos, químicos y biológicos. Permite también la inyección de aire enriquecido en CO₂ en tasas conocidas. Usando los gases procedentes de la combustión de los quemadores de los hornos se posibilita al mismo tiempo mantener la temperatura de crecimiento ideal, ahorrando una importante cantidad de energía, que en cualquier otro caso habría que suministrar, habida cuenta del régimen térmico de la zona de implantación de la planta.

Los sistemas de cultivo en biorreactores pueden ser discontinuos o continuos. Estos últimos permiten la monitorización y control completo del proceso. Un aspecto de suma importancia en la viabilidad del sistema a media y gran escala es la automatización de la cosecha, que habrá de adaptarse al sistema continuo. La opción más adecuada bajo estas circunstancias es la centrifugación industrial del caldo de cultivo, una vez alcanzado el plazo de crecimiento que se establezca.

En la propuesta de este Proyecto, el diseño del sistema se atenderá a dos condiciones básicas:

- Deberá ser modulable. El sistema de cultivo consistirá en unidades o módulos fácilmente manejables y que cumplan íntegramente las fases del cultivo.
- Será escalable. La instalación completa se compondrá del número requerido de módulos, de acuerdo a las necesidades de consumo de CO₂, por simple replicación de éstos, todo ello bajo un diseño geométrico preestablecido que permitirá el manejo y el mantenimiento de la instalación susceptibles de transportar en contenedor normalizado de 20'x8'x8'6" (5898 mm x 2393 mm x 2393 mm).



Cada módulo contendrá 68 cilindros de cultivo de material transparente en el que se hará burbujear el gas enriquecido en CO₂ filtrado y depurado de compuestos tóxicos.

1.3.2. Cálculo estructural

Se ha previsto que cada módulo de fotobiorreactores sea transportable en un camión estándar y de ahí la adaptación al diseño de contenedor de 20'. El mantenimiento y la reparación de los módulos obliga a un diseño estructural que permita levantarlo de su posición en campo, una vez vacío, mediante una pequeña grúa puente y cargarlo en un camión. Se extremará el compromiso entre resistencia y ligereza en el diseño y los especialistas del Equipo de Redacción estudiarán en esta fase la posibilidad de utilizar materiales alternativos al acero, como el aluminio o la fibra de carbono.

Incluye también el cálculo de la cimentación de los módulos.

1.3.3. Cálculo hidráulico

La operatividad del módulo de fotobiorreactores y la facilidad para su colocación y retirada obliga a simplificar al máximo el sistema hidráulico de alimentación de agua, vaciado de caldo para la cosecha y aireamiento forzado de cada tubo fotobiorreactor. A ello hay que añadirle las canalizaciones para el monitoreo de los parámetros bio-físico- químicos del cultivo. Por ello se ha prediseñado un conjunto de colectores que terminan en un conjunto de bridas y/o conexiones único por módulo, de modo que la operación de colocación o retirada sea extremadamente simple y rápida.

En este punto del Proyecto se terminarán de diseñar y de dimensionar todas esas instalaciones

1.4. Sistema de fertilización

1.4.1. Dimensionamiento y diseño



No sólo de CO₂ vive la *Chlorella*, sino también de una serie de micro y oligoelementos necesarios para su crecimiento, como material vegetal que es. Es necesario fertilizar el cultivo para asegurar unas tasas de crecimiento adecuadas.

Una de las posibilidades que se contemplan es la alimentación del cultivo mediante agua residual procedente de localidades relativamente cercanas y cuya canalización sea viable desde el punto de vista económico. Pero si surgen inconvenientes insoslayables, se tendrá preparado un procedimiento alternativo simple como es la adición de fertilizante químico y/u orgánico al agua de reinyección tras el ciclo de cosecha. En este punto se estudiarán las necesidades reales de nutrientes y se diseñará este subsistema.

1.4.2. Cálculo hidráulico y mecánico

Tras el diseño del subsistema de fertilización, se procederá al cálculo hidráulico y/o mecánico, dependiendo del sistema finalmente elegido.

1.5. Conducciones

1.5.1. Diseño

1.5.2. Cálculo hidráulico

1.5.3. Valvulería

La posibilidad de retirar uno o más módulos de fotobiorreactores para su reparación o mantenimiento en la futura instalación, sin detener el proceso del resto requiere instalar válvulas de corte que aseguren la continuidad y estanqueidad de la red presurizada de agua de reinyección, del caldo de cosecha y del gas forzado. Dada la cantidad de elementos es necesaria una planificación minuciosa de esta partida de proyecto, tanto desde el punto de vista del tipo y características de las válvulas como del modo de mando y de control remoto. En este punto se estudiarán y montarán los elementos que mejor cumplan con el diseño funcional.



1.6. Maquinaria

1.6.1. Sistema de cosecha pseudocontinua

En la etapa de prediseño que ha precedido a la elaboración del plan de trabajo se ha optado por utilizar centrifugadoras comerciales del mismo tipo que las utilizadas en la industria oleícola (decánter), adaptadas a la fluidez/viscosidad y demás características propias del caldo de cultivo a tratar. En proyecto experimental se instalará una máquina con una capacidad de proceso de materia húmeda en torno a 1.000 kg/24 h.

1.6.2. Sistema de desecación

Se estima que la humedad de la masa obtenida de la cosecha de microalgas será de alrededor de un 80%. Para transportar, almacenar y finalmente utilizar o reutilizar el producto final eficazmente es necesario desecarlo mediante calentamiento hasta conseguir una harina, cuya humedad se cifra en un 12%. En este punto se diseñará y dimensionará este subsistema.

1.6.3. Sistema de condensación y recuperación de agua

El agua extraída de la masa de cosecha durante el proceso de obtención de la harina de algas habrá de condensarse para ser recuperada y volver a alimentar el circuito de cultivo. En este punto se diseñará y dimensionarán las instalaciones necesarias para llevarlo a cabo. El agua de condensación será virtualmente pura y ello no es conveniente para la renovación del sistema de cultivo. Por ello se prevé la mezcla regulada de este flujo con el procedente de los fotobiorreactores antes de llegar a la centrifugadora de modo que el fluido resulte *contaminado* y sirva así de inóculo para la proliferación de las microalgas en los fotobiorreactores a los cuales va de nuevo a alimentar. La mezcla se regulará en un tanques auxiliar.

1.6.4. Sistema de almacenamiento y expedición de la harina

El proyecto que plantea Cementos del Marquesado gira en torno a la eliminación del ciclo atmosférico de una cantidad estipulada de CO₂.



El sumidero de este carbono inorgánico inmovilizado en forma orgánica es precisamente la harina obtenida al final del proceso. Pero dado el alto valor energético del producto, dicha harina no puede considerársela como un mero subproducto, sino como un fin en sí mismo. Existen dos alternativas para la harina final:

- Reutilizarlas en la propia cementera como parte del combustible necesario para mantener la cocción en el horno de clinker.
- Destinarlas a la generación de biocombustible, concretamente biodiésel.

La primera es la más sencilla y rápida y sólo requiere el transporte desde los silos de expedición hasta la fábrica de cemento. Sin embargo, dado el alto contenido en grasas que caracteriza a *Chlorella sp.* consideramos que sería desaprovechar un alto valor añadido que puede suponer una mejora notable en la rentabilidad de todo el sistema de confinamiento de CO₂. Este Proyecto no contempla en principio el uso posterior de la harina, sino que termina justo en la expedición, pero no debería descartarse de una parte acompañar su puesta en marcha con un proceso de mejora genética de las cepas de microalgas utilizadas, de modo que se consigan líneas o variedades más productivas desde el punto de vista de su utilización como generadoras de biocombustible, al tiempo que se mejoren también sus cualidades de resistencia a las temperaturas extremas y a los agentes químicos residuales que puedan quedar en los gases de combustión.

En esta fase se dimensionarán las instalaciones necesarias para procesar el volumen de harina previsto.

1.7. Electrificación

1.7.1. Baja tensión

1.7.2. Cuadros de protección y mando

1.8. Automatismos y control



2. Fase 2. Replicación del módulo

2.1. Introducción de modificaciones de acuerdo con los resultados de la Fase 1.

2.2. Estudio de la disposición.

2.3. Diseño del sistema hidráulico de alimentación y evacuación.

3. Fase 3. Validación de los parámetros de la instalación

