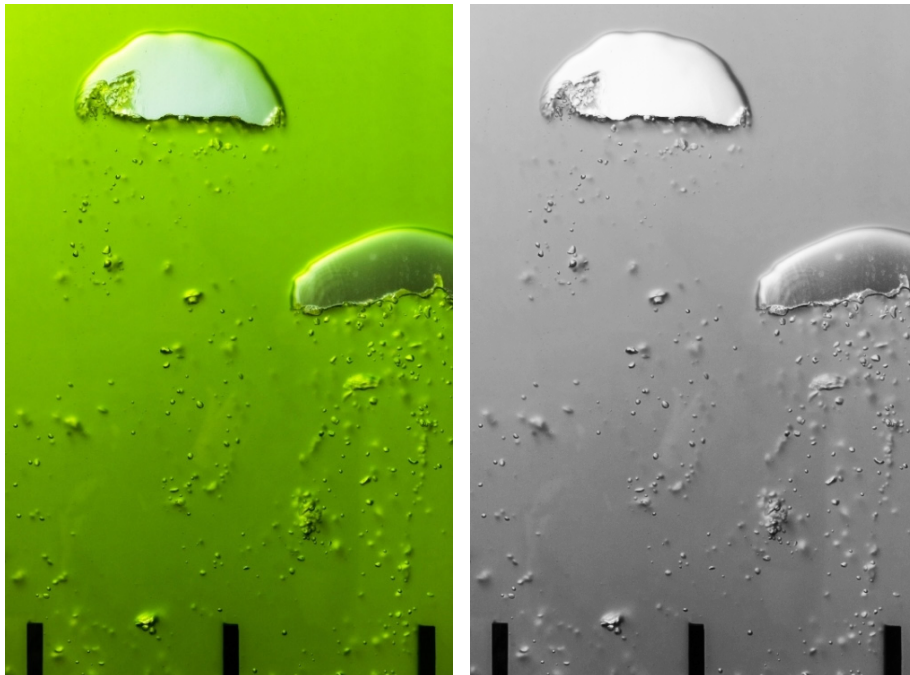


## CONSTRUIR NATURALEZA

El empleo de microalgas en la arquitectura sostenible



Emma Lomas Escribano

## **CONSTRUIR NATURALEZA**

### **El empleo de microalgas en la arquitectura sostenible**

#### *Alumna*

Emma Lomas Escribano

#### *Tutor*

Francisco Javier Neila

Aula 2 TFG

Javier Mosteiro, *coordinador*

Consolación Ana Acha Román, *adjunto*

13-06-2017

# INDICE

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

INTRODUCCIÓN

1. ESTADO DE LA CUESTIÓN
  - Microalgas
  - Cultivo de microalgas
  - BIQ House
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL
  - Preparación de los experimentos
  - Primeros ensayos
  - Ensayos comparativos
3. DISEÑO DE UN SISTEMA ARQUITECTÓNICO
  - Recopilación de datos
  - Descripción del sistema
  - Diseño del sistema

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

ANEXO I TERMINOLOGÍA





## RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Las microalgas y sus aplicaciones llevan siendo investigadas en diversos campos de la bioquímica e ingeniería durante décadas, haciendo incapié en las propiedades energéticas o nutritivas de su biomasa. Ahora es turno de que la arquitectura se sumerga en este campo de trabajo, sirviéndose de estos microorganismos para desarrollar nuevas envolventes sostenibles para nuestros edificios.

Una línea de investigación encabezada por el edificio BIQ House, que es pionero en la incorporación de microalgas en el paramento de sus fachadas. Este edificio consigue, a través de su fachada fotosintética, obtener el calor y energía necesario para poder poner en marcha el edificio y dar servicio a sus usuarios, a su vez que absorbe el dióxido de carbono del ambiente. Su fachada, formada por paneles fotobiorreactores con microalgas, se enmarca dentro del concepto de «Smart Materials», que son aquellos materiales que responden dinámicamente ante las condiciones climáticas y ambientales.

El presente trabajo realiza un estudio de el citado edificio, analizando sus puntos fuertes y sus limitaciones, con el fin de plantear una serie de implementaciones que se podrían aplicar en el diseño de otros edificios similares. Todo con el fin de obtener una arquitectura que se sirva de la naturaleza para mejorar la calidad de vida de los usuarios.

### Palabras clave

Microalgas  
Arquitectura sostenible  
Experimentación  
Energías renovables  
Biomasa  
Envolvente



# INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo vive un cambio de paradigma en el que el ente tecnológico se adueña de la cotidianidad de nuestras vidas, nuestros hogares y nuestra manera de enfrentarnos a las adversidades. Estamos frente a un homo hiper-tecnologizado, globalizado, desvinculado de sus orígenes y de la naturaleza. Este trabajo tiene como objetivo una reflexión sobre la posible simbiótica relación entre lo futurístico y lo milenario, innovación y observación; en definitiva, tecnología y naturaleza.

El trabajo propone, a través de unos organismos milenarios como son las microalgas, explorar la capacidad para enfrentarnos y solucionar los grandes problemas ambientales del siglo XII como son la contaminación ambiental, el calentamiento global o la extinción de los recursos naturales que el ser humano utiliza como fuentes de abastecimiento, con soluciones biológicas implementadas en el edificio. Científicos e ingenieros llevan décadas observando estas micropartículas y convirtiéndolas en una fuente más de recursos renovables que, en un futuro no muy lejano, podría aspirar a sustituir al petróleo y derivados; y en un futuro más lejano, a la alimentación tal y como se conoce hoy en día.

Por lo tanto, este trabajo busca estudiar el tímido papel de la arquitectura en esta revolución silenciosa, y como conseguir que nuestros edificios del futuro estén a la altura de las energías y alimentos que se consumen en ellos. Un inmenso campo de estudio que acaba de nacer, donde los ejemplos encontrados no datan de hace más de diez años. Dada la escasez de información, tanto en la teoría como en la construcción, este trabajo propone hacer una revisión bibliográfica de la bioingeniería microalgal y su posible integración a la arquitectura; además de una modesta experimentación que pueda esclarecer algunas dudas surgidas sobre la temática escogida.

El trabajo cuenta con dos objetivos: el primero es dar a conocer mediante la investigación y el análisis ejemplos de arquitectura que han implantado tecnología microalgal en sus paramentos y envolventes. En concreto mediante el estudio y experimentación de la hipótesis planteada por el edificio BIQ House de Hamburgo, que es el primer edificio de viviendas del mundo construido que incorpora una envolvente de tales características. El segundo objetivo es trasladar lo aprendido al clima mediterráneo, proponiendo un diseño de envolvente con microalgas que mediante estrategias bioclimáticas se adapte a las necesidades y oportunidades del entorno.

Estos objetivos se desarrollan simultáneamente a través de tres fases de actuación que son en las que se estructura el presente trabajo. Una primera

fase de investigación o revisión bibliográfica de la tecnología del cultivo de microalgas y posteriormente del proyecto BIQ House, del que se analiza también su comportamiento energético. Una segunda parte que corresponde a la fase de experimentación, donde se toman mediciones sobre un pequeño prototipo de que simula la fachada de la BIQ House. Y por último una tercera fase que estudia más a fondo el sistema constructivo, tecnológico y de instalaciones que pone en funcionamiento una envolvente tan singular.





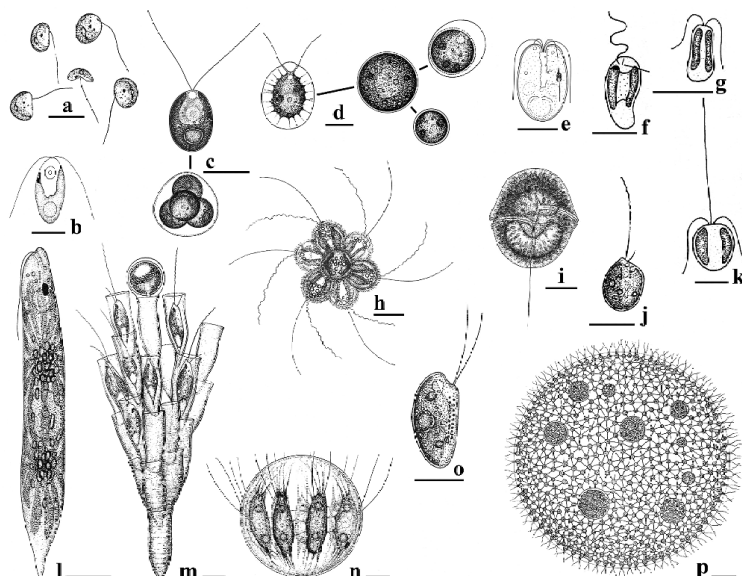
# 1 ESTADO DE LA CUESTIÓN

## 1.1 MICROALGAS

### Composición y fotosíntesis

Las algas son organismos fotosintéticos que crecen en ambientes variados, predominantemente en entornos acuáticos. Debido a su gran capacidad para desarrollarse en condiciones diferentes, las algas constituyen un grupo variado en el que cada especie se adapta a un hábitat. Dependiendo del tamaño, se pueden clasificar en dos categorías: macroalgas y microalgas. Las macroalgas son organismos multicelulares de entorno a un centímetro de tamaño que normalmente crecen en estanques de agua dulce o salada. Las microalgas son organismos unicelulares de aproximadamente entre cinco y diez micrómetros de tamaño que crecen en suspensión dentro de medios acuosos (figura 1.1).

Se considera que estos son los primeros organismos productores de oxígeno, ya que a través de la fotosíntesis son capaces de convertir la energía solar y el dióxido de carbono en biomasa, desprendiendo oxígeno durante el proceso. Aunque la fotosíntesis es un proceso común para todas las plantas, las microalgas tienen una mayor eficiencia de conversión de radiación solar y biomasa –en torno al doble-, ya que por ser unicelulares no tienen que hacer frente a la producción y mantenimiento de las estructuras que se dan en las plantas. Las algas contribuyen aproximadamente con el 50% de la producción fotosintética de la Tierra, la mayor parte ocurriendo en los océanos.



1.1 Ejemplo de ilustración de diversos géneros de microalgas

### *Antecedentes y desarrollo*

El interés en el cultivo y producción de biomasa a partir de microalgas viene dado por su alta capacidad fotosintética y adecuación para crecer en todo tipo de aguas y ecosistemas. Las primeras investigaciones sobre este tipo de microorganismos tienen datan de finales del siglo XIX cuando se consiguió aislar y definir el microalga *Chlorella vulgaris*, por el microbiólogo neerlandés Martinus Willem Beijerinck (figura 1.2). Durante el comienzo del siglo XX se empieza a estudiar la fotosíntesis de estos organismos y entorno a la mitad de siglo se desarrollan sistemas de producción y cultivo a gran escala en diferentes ciudades como Tokio, o Essen en Alemania. Estos cultivos, situados en zonas industriales, aprovechaban el dióxido de carbono de las combustiones de las diferentes maquinarias, constatando así la eficiencia de estos microorganismos para la fijación de  $\text{CO}_2$ .

Al mismo tiempo se empiezan a desarrollar las aplicaciones nutricionales de las microalgas, ya que estas están compuestas por hasta un 50% de proteína. Se descubrió que ya desde la antigüedad, los aztecas y los nativos del Chad consumían el género de microalga *Spirulina maxima* como fuente de proteínas y vitaminas. Lo mismo ocurre con otros generos que actualmente se consumen y comercializan en Mongolia, China, los Andes peruanos, Vietnam, India y otros tantos países.

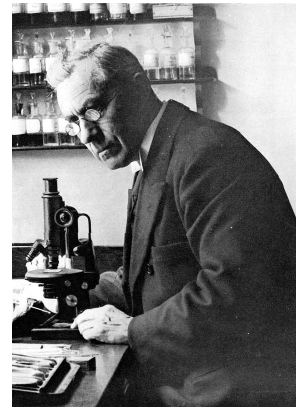
El empleo de microalgas como fuente de energía renovable se empieza a considerar durante la crisis del petróleo de los años 70, para la producción de biocombustibles como el biodiesel, bioetanol y bioqueroseno.

### *Proceso de fotosíntesis*

El cultivo de microalgas y sus aplicaciones tienen su base en el proceso denominado fotosíntesis. La fotosíntesis es un proceso único de conversión de energía solar donde compuestos inorgánicos y energía lumínica se convierten en materia orgánica gracias a organismos fotótrofos. Directa o indirectamente, todas las formas de vida de la Tierra dependen de la fotosíntesis como fuente de energía y materia orgánica para su metabolismo y crecimiento.

Este proceso se desarrolla a través de una serie de reacciones redox (reducción-oxidación), durante las cuales la energía luminosa, en forma de energía electromagnética, es absorbida por los pigmentos de clorofila y convertida en energía química. Esto resulta en la producción de oxígeno y azúcares, además de otros compuestos secundarios. La fotosíntesis se divide en dos fases: una primera fase luminosa durante la cual se produce un proceso químico de oxidación, y una segunda fase oscura donde se produce la fijación de  $\text{CO}_2$ .

La tasa fotosintética de estos organismos se describe mediante una curva que relaciona la producción de oxígeno con la radiación solar incidente, factor determinante para el desarrollo de este proceso. Del espectro electromagnético de la radiación solar, solo el espectro visible por el ojo huma-

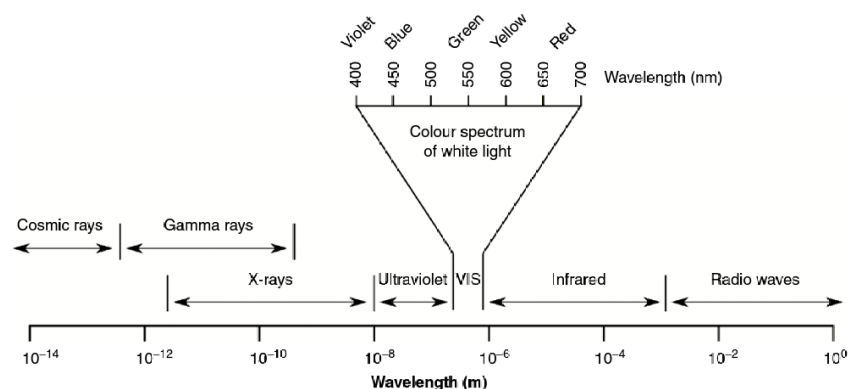


1.2 Martinus Willem Beijerinck (1851-1931)



no -de 400 a 700 nm- es empleado por las plantas durante el desarrollo de la fotosíntesis, denominando a esta radiación visible: radiación fotosintéticamente activa (radiación PAR).

1.3 Espectro electromagnético de la radiación solar y detalle del espectro visible (radiación PAR)



Derivado de la fotosíntesis, surge el proceso de fotoinhibición. Se trata de la inhibición de las células -en este caso de las microalgas- al estar expuestas a un exceso de radiación. Esto puede afectar a el aparato fotosintético de las células, causando así daños irreversibles. Este proceso tiene vital importancia en el cultivo de microalgas ya que la fotoinhibición provoca un decrecimiento del cultivo y por lo tanto de la producción de biomasa. Se estima que en condiciones de laboratorio este proceso comienza con irradiancias de entre 45 y 90 W/m<sup>2</sup>, o como se expresa en medidas de radiación PAR, entre 200 y 400 μmol/m<sup>2</sup>s. Hay que destacar que en un día soleado la superficie terrestre recibe 1.800 μmol/m<sup>2</sup>s de radiación solar directa<sup>1</sup>, por lo que las microalgas en estas condiciones sufren el proceso de fotoinhibición.

### Aplicaciones

Las microalgas están consideradas como una de las más prometedoras materias primas renovables para la producción de comida, nutrientes, químicos, materiales y biocombustibles. Se ha constatado su efectividad tanto como fuente de nutrientes para animales, como también para suplementos alimenticios para las personas. Se estudian sus propiedades para desarrollar nuevas medicinas y en la industria cosmética, dadas sus propiedades antioxidantes. En cuanto a sus aplicaciones energéticas, la biomasa obtenida a partir de las microalgas es una excelente fuente de biocombustibles o para el tratamiento de aguas residuales.

A continuación se van a describir y enumerar aquellas aplicaciones que tienen especial interés en relación al campo de la arquitectura, o que pueden ser de aplicación en este.

### Producción de biomasa

La mayor parte de las aplicaciones que podemos obtener de las microalgas tienen su origen en la biomasa de estas (figura 1.4). El proceso para transformar el cultivo en biomasa es quizás la parte más complicada del proceso

1. Véase RICHMOND, Amos; HU, Qiang. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. Chichester: Wiley, 2013; página 23.

debido al elevado coste de la tecnología para realizarlo. El proceso de cosecha de biomasa se realiza en dos fases. La primera fase consiste en separar la biomasa del resto del cultivo, mediante sedimentación o filtración, y una segunda fase donde se endurece el compost obtenido.

Una forma muy común de separación de biomasa es mediante la flotación en aire disuelto (DAF), un proceso también utilizado en tratamiento de aguas residuales, por el cual se inyecta aire a presión en el cultivo de tal manera que se adhiere a materia suspendida que acaba flotando en el líquido, y posteriormente es recolectada.

### *Biocombustibles*

Una vez obtenida la biomasa esta se puede prensar para la obtención de aceite para la fabricación de biocombustibles. Los biocombustibles provenientes de las microalgas son una fuente de energía renovable alternativa a los combustibles fósiles tradicionales. Son más eficientes que otros cultivos de uso más extendido, provenientes de plantas oleaginosas, como el maíz o la palma, ya que la capacidad fotosintética y crecimiento de estos microorganismos es mucho mayor.

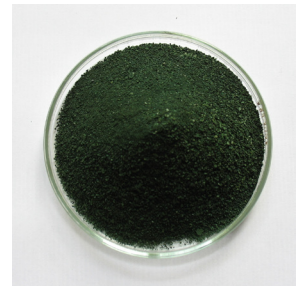
Las ventajas de obtener los biocombustibles de las microalgas frente a las plantas oleaginosas son numerosas: las microalgas no ocupan terreno fértil y pueden crecer en cualquier tipo de agua, ya sea salada o residual; además al contrario que el maíz o el girasol, no forman parte del mercado alimentario del que depende gran parte de la humanidad. Los biocombustibles provenientes de las microalgas se denominan biocombustibles «de tercera generación», no son tóxicos y son biodegradables, y pueden sustituir a los cultivos energéticos que ocupan grandes superficies agrícolas en zonas donde debería priorizarse un cultivo dedicado a la alimentación de sus habitantes.

El biodiesel producido a partir de microalgas se obtiene a través de la conversión termoquímica de biomasa a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Las microalgas resultan entre 500 a 1.000 veces más efectivas que las plantas terrestres en la producción de biodiesel debido a su gran capacidad de producir biomasa, alta capacidad fotosintética, y gran potencial de almacenamiento de lípidos siendo entre el 20 y el 50% de su peso seco<sup>2</sup>.

### *Fijación de CO<sub>2</sub>*

La fijación de CO<sub>2</sub> es un proceso derivado de la fotosíntesis, por el cual el CO<sub>2</sub> es absorbido por los organismos que la realizan y transformado en material orgánico o biomasa. El interés del estudio de la fijación del CO<sub>2</sub> en las microalgas reside en que no es un producto final, sino que es una forma de reducir las emisiones de gases invernaderos a la vez que se obtiene biomasa.

Este proceso tiene especial importancia en lo relativo a la sostenibilidad y el medio ambiente, ya que convierte los residuos del aire de las zonas in-



1.4 Ejemplo de biomasa proveniente de microalgas una vez tratada.

2. Véase TEBANNI, Sihem; FILARI, Rayen; LOPES, Filipa; DUMUR, Didier; PAREAU, Dominique. *CO<sub>2</sub> Bio-fixation by Microalgae: Automation Process*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014; página 6.

dustriales o las grandes urbes en productos de interés como el biodiesel. Diferentes estudios han mostrado que la producción de biomasa es mayor cuando se incorporan al cultivo de microalgas gases industriales que cuando se usa CO<sub>2</sub> puro<sup>3</sup>. En teoría, las microalgas son capaces de convertir más del 9% de la radiación solar que reciben en 280 toneladas de biomasa por hectárea por día, consumiendo cerca de 513 toneladas de CO<sub>2</sub>.

#### *Producción de agua caliente sanitaria*

La utilización de microalgas en la producción de Agua Caliente Sanitaria como alternativa a los tradicionales colectores solares es una técnica que se ha empezado a desarrollar en el edificio BIQ House situado en Hamburgo, un caso de estudio que se detalla más adelante en este trabajo. Durante la fotosíntesis, las microalgas disipan la energía sobrante que no pueden utilizar para la fabricación de biomasa en forma de calor, calentando así el medio de cultivo en el que están sumergidas. En ciertos climas, se podría utilizar este fluido como un pre-calentamiento de agua caliente o calefacción, reduciendo así el coste y el consumo energético del proceso.

La eficacia de este método de obtención de ACS no está todavía demostrada, ya que solo existe un edificio construido que lo haya aplicado, aunque todavía no lleva en funcionamiento el suficiente tiempo como para que sus datos sean concluyentes. Por ello, se ha decidido realizar una experimentación sobre esta aplicación de las microalgas que se desarrolla en la segunda parte de este trabajo.

#### *Tratamiento de aguas residuales*

Los nutrientes que asimilan las microalgas para su crecimiento se corresponden en gran medida a elementos que son tóxicos para el medio ambiente. Estos elementos se encuentran en las aguas residuales y la incorporación de microalgas a las plantas de tratamiento de aguas residuales puede ayudar a acabar con el fenómeno de la eutrofización. Este fenómeno es una de las consecuencias de la contaminación de las aguas de ríos, océanos... provocado por un exceso de nitrógeno y fósforo en las aguas. Este exceso de nutrientes provoca que las plantas y peces que habitan en las aguas acaben muriendo y se destruya el ecosistema.

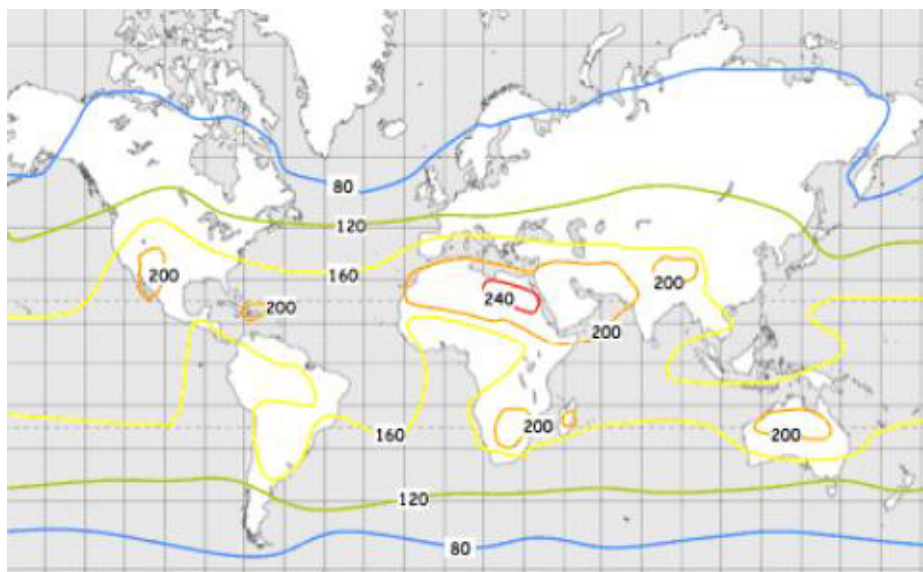
Por ello en diferentes lugares del mundo se han implementado los sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de microalgas. La principal desventaja de estos sistemas es que requieren una gran superficie de estanques, aproximadamente una hectárea por cada 100-2000 personas, lo cual hace al sistema altamente costoso y difícil de aplicar.

3. Véase TEBANNI, Sihem; FILARI, Rayen; LOPES, Filipa; DUMUR, Didier; PAREAU, Dominique. *CO<sub>2</sub> Bio-fixation by Microalgae: Automation Process*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014; página 23.

## 1.2 CULTIVO DE MICROALGAS

### Sistemas de cultivo

El cultivo de microalgas en el mundo supone una producción estimada de 10.000 toneladas al año. La mayor parte de la producción tiene lugar en China, que aglutina el 50% de la producción. Debido a que producción depende de la radiación incidente en los cultivos, el emplazamiento de estos es un factor clave para su desarrollo. Numerosos estudios han desarrollado maps de zonas según la aptitud para el cultivo a escala industrial de microalgas (figura 1.5). Las zonas de mayor productividad se corresponden a aquellas zonas del planeta que tienen niveles más altos de radiación, correspondiendo con la zona del ecuador.



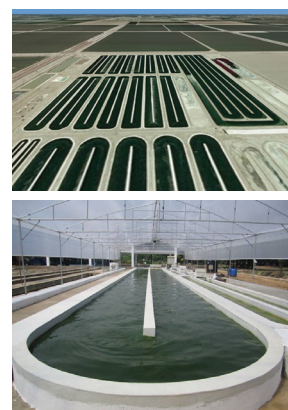
1.5 Curvas planetarias de productividades teóricas que se lograrían con un sistema de cultivo del tipo fotobiorreactor tradicional en función de los niveles de irradiación

Debido a la variedad de aplicaciones y requerimientos ambientales para el cultivo de microalgas se han desarrollado diferentes sistemas de cultivo, que esencialmente se dividen en dos tipos: cultivos al aire libre y cultivos en sistema cerrado.

### Cultivos al aire libre

Este tipo de cultivos son los más sencillos y económicos, debido a su bajo coste constructivo. Se componen de estanques artificiales, generalmente de tipo raceway de circuito abierto (figuras 1.6 y 1-7), donde para la agitación y mezcla del cultivo se emplean ruedas con palas. Normalmente se utilizan aguas residuales provenientes de zonas industriales como base para el cultivo.

Sin embargo, estos sistemas presentan numerosos inconvenientes ya que al tratarse de grandes sistemas abiertos expuestos a la radiación solar no se pueden controlar parámetros como la irradiancia, temperatura o pH. Además, al estar abiertos están expuestos a ser contaminados por otros microorganismos que tengan mayor capacidad de crecimiento y el cultivo acaba siendo inservible.



1.6 y 1.7 Ejemplos de cultivos de microalgas abiertos tipo raceway

### *Cultivos cerrados o fotobiorreactores*

Este tipo de cultivos en fotobiorreactores permiten un mejor control de las variables que influyen en el crecimiento de las microalgas. Además, al tratarse de sistemas que están aislados, se reducen las probabilidades de contaminación del medio de cultivo. En estos cultivos las microalgas se exponen a la radiación solar a través de un material transparente que actúa como recipiente de estas. Estos recipientes pueden tener diferentes geometrías, siendo más recurrentes las formas tubulares y planas.

Los fotobiorreactores tubulares (figura 1.8) están compuestos por uno o varios tubos colocados en vertical u horizontal. Su principal ventaja es que al tener sección circular hay una mayor parte del cultivo que está expuesta a la radiación solar, por lo que el crecimiento es mayor. Sin embargo no toda la radiación es aprovechada ya que los tubos se somborean los unos a los otros. Como ventaja, destacar que el medio de cultivo y los nutrientes están en continua circulación.

Los fotobiorreactores planos (figura 1.9) están formados por dos paneles rectangulares transparentes entre los cuales circula el medio de cultivo. Unos tubos perforados por los que se suministra el aire y nutrientes recorren el fondo del panel. La gran ventaja de estos paneles es el gran ratio superficie-volumen. Debido a su forma estos biorreactores son los que más se adecuan para una implementación en la envolvente de los edificios.

Los principales inconvenientes de los sistemas cerrados son el elevado coste de producción, la pérdida de parte de la radiación incidente por reflexión y el biofouling, que ocurre cuando las microalgas se adhieren a las paredes fotobiorreactor e impiden que la luz penetre eficazmente en el interior del mismo.

1.8 Ejemplo de fotobiorreactores cerrados tubulares, situados en la planta de AlgaEnergy en Barajas, Madrid



1.9 Ejemplo de fotobiorreactores cerrados planos, situados en la planta de AlgaEnergy en Barajas, Madrid.





## Ejemplos del uso de microalgas en la arquitectura

El empleo de microalgas en la arquitectura es un campo que está en una primera etapa de desarrollo. Aunque hay una amplia base de proyectos teóricos que rara vez se llevan a cabo y construyen. El ejemplo más característico de esto sería la BIQ House (figura 1.10), el primer edificio construido con una fachada fotobiorreactora. Debido a la importancia de este proyecto en el presente trabajo, se ha decidido dedicarle un apartado para el estudio en profundidad del edificio. A continuación se van a exponer una serie de prototipos y pequeñas instalaciones que incorporan las microalgas a su diseño.

### EcoLogicStudio

El primer ejemplo estudiado es el de EcoLogicStudio, una firma de arquitectura y urbanismo con base en Londres fundada por Claudia Pasquero y Marco Poletto (figura 1.11), especializada en el diseño sostenible, autosuficiente y que integre la naturaleza. Han desarrollado varias propuestas que incorporan las microalgas a su diseño.

H.O.R.T.U.S. es una instalación desarrollada por primera vez en la AA de Londres, donde los organismos forman un nuevo prototipo de jardín. Este proto-jardín contiene macro y microalgas, así como otras bacterias luminiscentes que se encuentran en los estanques y lagos londinenses. A través de controlar la radiación solar, suministrar el CO<sub>2</sub> a los organismos y procesos digitales, los espectadores interactúan con la instalación creando así un nuevo concepto de jardín urbano (figuras 1.12, 1.13 y 1.14).



1.10 Fotografía del proyecto BIQ House, Hamburgo, 2013



1.11 Claudia Pasquero y Marco Poletto, 2014



1.12, 1.13 y 1.14 Fotografías de la instalación H.O.R.T.U.S., realizada por EcoLogicStudio en la AA de Londres en 2012.

Urban Algae Canopy, también de EcologiStudio, es un pabellón diseñado para la exposición 'feeding de planet' en Milán 2014 (figuras 1.15, 1.16 y 1.17). El pabellón está formado por unos paneles triangulares por cuyo interior discurren las microalgas y el medio de cultivo, en constante circulación. Sin embargo, la característica más importante de estos es el empleo del material ETFE (etileno tetrafluoroetileno copolímero), un polímero de gran resistencia al calor, soportando temperaturas de hasta 170°C, corrosión y teniendo un peso 100 veces inferior que el vidrio, es reciclable y una buena alternativa para la edificación.

La elección del material no es casual, ya que este absorbe el calor e impide a las microalgas calentarse por encima de su temperatura límite (entorno a los 25°C).



1.15, 1.16 y 1.17 Fotografías del proyecto Urban Algae Canopy, realizado por EcoLogicStudio en Milan 2014.



1.18 Cesare Griffa, Antonio Ravarino y Federico Rizzo

### Cesare Griffa

El siguiente estudio se trata de Cesare Griffa (figura 1.18), un estudio con base en Turín, especializado en técnicas de fabricación digital y tecnologías de microalgas para el desarrollo de arquitectura sostenible. Han desarrollado varios prototipos experimentales de fachadas con piel de microalgas, y a una escala menor, desarrollando catálogos 'Do It Yourself' para que los usuarios puedan crear sus propios huertos de microalgas.

WaterLilly Gramp 2012 es un prototipo de fachada modular presentada en una instalación durante la Bienal de Arquitectura de Venecia de 2012. For-

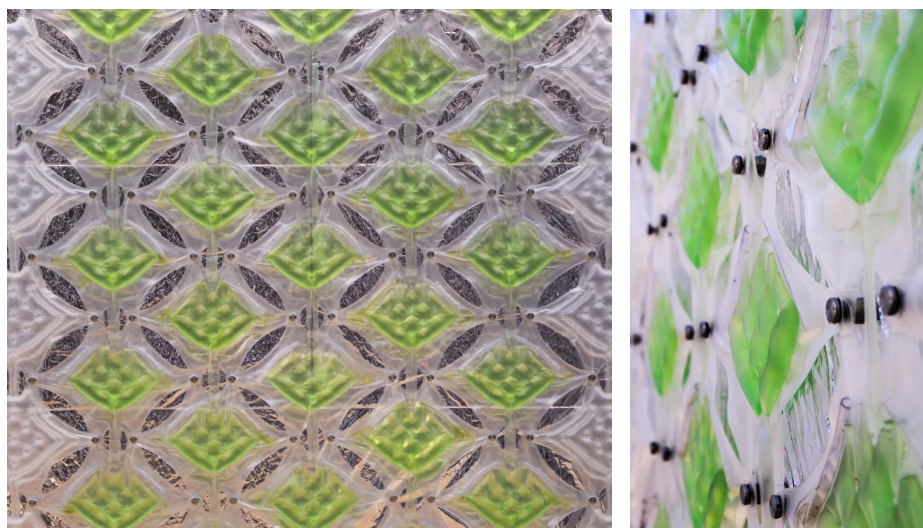


mada por una serie de tubos que recorren el edificio transportando el fluido de un lugar a otro, interactuando como fluido caloportador con las instalaciones del edificio. Iluminada con tecnología LED, las formas sinuosas que crea la envolvente pueden sugerir un nuevo paisaje urbano sostenible y atractivo en nuestras ciudades, a su vez que contribuye a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. El prototipo diseñado es modelo del dibujo que podría llegar a cubrir todo un edificio (figuras 1.19, 1.20 y 1.21).



1.19, 1.20 y 1.21 Fotografías de la instalación Waterlilly Gramp realizada por Cesare Griffa en Venecia en 2012.

WaterLilly 2.0 es un sistema para cultivar microalgas en las envolventes arquitectónicas (figuras 1.22 y 1.23). Cuando el cultivo satura la solución acuosa, se recolecta la biomasa para la producción de biodiesel o industria alimentaria, y una pequeña proporción se deja para comenzar el ciclo de nuevo. Se crea así una granja vertical urbana sostenible. Los arquitectos sostienen que las fachadas y cubiertas de los edificios representan billones de metros cuadrados, que en vez de ser hechos de un material inerte como el hormigón, podrían ser superficies fotosintéticas inteligentes que respondan a los problemas del calentamiento global.



1.22 y 1.23 Fotografías del prototipo de fachada Waterlilly 2.2 desarrollado por Cesare Griffa en 2014.



### 1.3 BIQ House

#### Sistemas de cultivo

El proyecto BIQ House se trata de un edificio de viviendas dentro del contexto de la colonia IBA Hamburgo, y es el primer ejemplo de fachada fotobiorreactora que se ha llevado a cabo (figura 1.24). Diseñada en 2013 por el estudio de arquitectura austriaco SPLITTER-WERK y la firma de ingeniería ARUP, este proyecto busca, a través de su fachada, ser energéticamente autosuficiente y sostenible. Este edificio cúbico de cinco plantas cuenta con paneles biorreactores en las fachadas sureste y suroeste, manteniendo en las dos restantes un cerramiento convencional. Las fachadas «vivas» sirven como base para el crecimiento de microalgas, que posteriormente se utilizarán para la producción de energía y el sombreado del edificio.



1.24 Fotografía frontal de la BIQ House, Hamburgo 2013



1.25 y 1.26 Fotografías de detalle del cultivo de microalgas de la BIQ House.

#### Paneles fotobiorreactores

La fachada biorreactora de la BIQ House se enmarca dentro del concepto de los Smart Materials, que son materiales que se comportan de forma dinámica cambiando con las condiciones del entorno y adaptándose a ellas. Estos procesos son desencadenados por condiciones físicas o químicas del ambiente, como cambios de temperatura o de intensidad solar en el caso de la BIQ House. En este caso las microalgas funcionan como materiales inteligentes dentro de los paneles biorreactores, utilizando la fotosíntesis para transformar energía lumínica en energía calorífica y biomasa. Así, la fachada se convierte en una instalación más del edificio.

El diseño de la fachada, formalmente y tecnológicamente hablando, es similar al desarrollado en los grandes cultivos industriales de microalgas. La fachada está compuesta por 129 biorreactores de 70 cm de ancho, 270 cm de alto y 8 cm de espesor, resultando en una cavidad de 1,7 cm para el vertido del medio de cultivo (figura 1.27). Los biorreactores se conectan en serie a través de tuberías que transportan el medio de cultivo y los nutrientes necesarios, que se inyectan a través de unas pipetas adosadas al fondo del panel. El fotobiorreactor está formado por dos cristales laminados de seguridad (LSG), y sellado con un marco de PVC, para evitar posibles corrosiones.

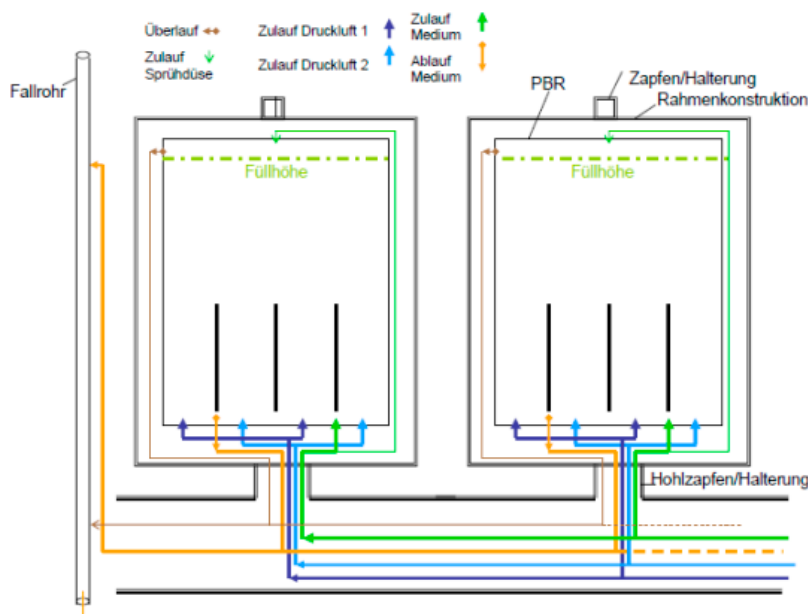
Fundamentalmente, los paneles funcionan como una especie de colectores solares biológicos que almacenan el calor durante el día, para luego ser utilizado como pre-calentamiento para la producción de ACS y calefacción. Se prevee un calentamiento diurno de los paneles de hasta 35°C, algo que choca con la literatura sobre el cultivo de microalgas que establece una



1.27 Dibujo de uno de los paneles fotobiorreactores de la BIQ House.

temperatura idónea de crecimiento de entre 20 y 25°C. Un aumento de la temperatura supondría una disminución de la producción de biomasa, que vendría representada por una disminución de la opacidad de los paneles y por lo tanto, de su capacidad de sombreamiento. La teoría contradice lo propuesto por los arquitectos, que describen la envolvente como si fuera una masa arbórea que permite el paso de la radiación solar en invierno y la bloquea en verano.

Para el cultivo de las microalgas, los fotobiorreactores se rellenan con agua potable mezclada nutrientes (fosforo y nitrógeno). A su vez se inyecta el aire comprimido y CO<sub>2</sub> proveniente de una caldera de combustión situada en el propio edificio. El medio de cultivo está en constante circulación permitiendo así la salida continua de medio para la producción de biomasa y calor, y la entrada continua de medio equivalente (figura 1.28).



1.28 Diagrama de entrada y salida de nutrientes de los paneles fotobiorreactores. La línea verde indica la entrada de medio y la salida de este. Las azules marcan la entrada de aire comprimido y dióxido de carbono.

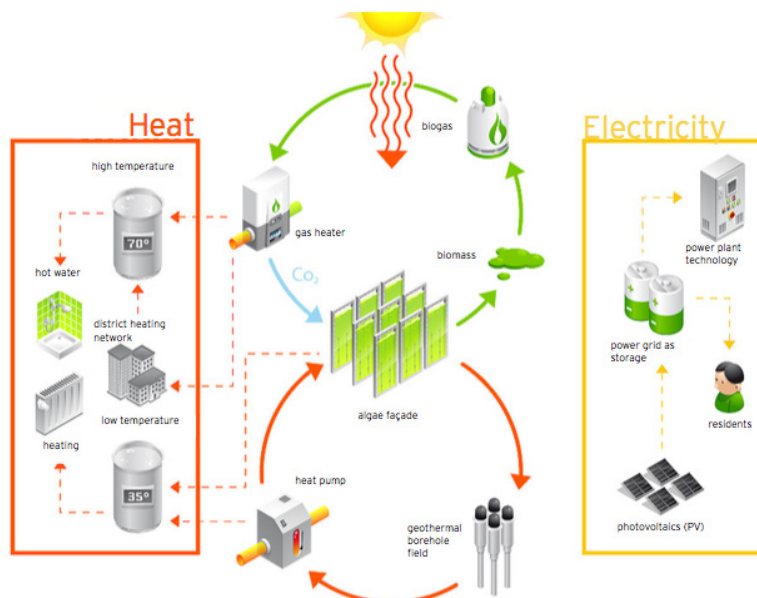
### Esquema de principio

El edificio BIQ pretende ser un organismo energéticamente autosuficiente, abasteciendo sus necesidades, de manera directa o indirecta, a través de la fachada fotobiorreactora. Siguiendo los estándares de la Passive House, la demanda de energía restante se obtiene exclusivamente mediante energías renovables. Dado que la superficie dedicada al cultivo de microalgas en este edificio no es suficiente para abastecer a todos los usuarios del mismo, las necesidades energéticas se completan gracias a la central energética sostenible Wilhelmsburg situada en la colonia IBA Hamburg.

Para la producción de agua caliente se utilizan los fotobiorreactores a modo de colectores solares. Durante el proceso de la fotosíntesis, las células de microalgas emiten calor, calentando así el líquido en el que están sumergidas. El agua de la mezcla alcanza una temperatura de aproximadamente 25°C que se mantiene constante mediante la entrada de medio fresco. La misma cantidad de medio fresco entrante es extraída del fotobiorreac-

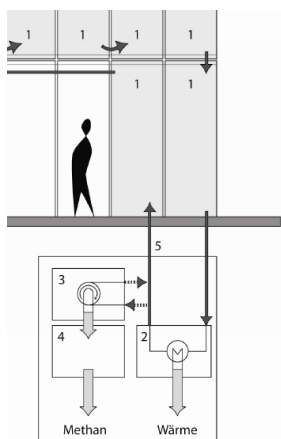
tor para la producción de agua caliente. Este fluido calentado pasa a través de un intercambiador de calor que transfiere ese calor a otro fluido que es el finalmente utilizado para la producción de ACS y calefacción. Una vez enfriado, tras su paso por el intercambiador de calor, el medio de cultivo vuelve a los paneles fotobiorreactores.

1.29 Esquema de principio de la BIQ House. Los paneles fotobiorreactores son el centro de la producción energética



El mayor problema de los sistemas que utilizan la energía solar para transformarla en calor es que la época de mayor demanda no coincide con la época de mayor producción. Por ello se necesitan instalaciones para albergar el calor producido durante el verano para que pueda ser utilizado en invierno. La BIQ House consigue este almacenamiento a través de unas sondas geotérmicas a 80 metros de profundidad situadas en la central eléctrica Wilhelmsburg situada en la propia colonia. El calor es almacenado en las sondas durante las épocas estivales y devuelto al edificio gracias a una bomba de calor geotérmica una vez que empieza la temporada de calefacción.

Los paneles fotobiorreactores no tienen como única función la generación de agua caliente, sino también la producción de biomasa. Esta característica es lo que los distingue, y hace más atractivos, de los colectores solares tradicionales. La obtención de biomasa se realiza una vez que el medio de cultivo ha circulado por el intercambiador de calor para la generación de agua caliente (figura 1.30). El fluido, una vez enfriado, pasa por un sistema de flotación, que es un proceso de separación de gravedad que utiliza burbujas de aire o gas, que se adhieren a las partículas solidadas y terminan flotando en la superficie del agua por donde serán removidas con un sistema de desnatado. Después de la separación, la mayor parte del medio de cultivo vuelve a los fotobiorreactores para mantener una temperatura constante del medio de cultivo a 25°C y la biomasa es procesada para la fabricación de biocombustibles. Este biogás se utilizara posteriormente en la caldera que proporciona agua caliente sanitaria a alta temperatura en el edificio y cuyos gases de combustión alimentan los fotobiorreactores.



1.30 Esquema de funcionamiento del intercambiador de calor de la BIQ House. El medio extraído de los paneles se divide entre la producción de calor y de metano (biomasa).

Se puede concluir verificando que la BIQ House es un prototipo autosuficiente donde las microalgas constituyen la materia prima de las diferentes fuentes de energía. Sin embargo, el edificio todavía depende de la red pública al demandar más energía de la que produce.

### **Análisis energético del edificio<sup>4</sup>**

A continuación se propone hacer una descripción de los aspectos de consumo energético del edificio, para ver su rentabilidad energética. Los datos necesarios para desarrollar esta parte han sido proporcionados por ARUP Alemania, y corresponden al periodo de monitorización de la fachada que abarca de Mayo 2013 a Mayo 2015. El propósito de la monitorización de la fachada era comprobar el rendimiento de los biorreactores y los resultados de la producción de calor y biomasa. También se ha querido medir la aceptación del sistema por parte de los usuarios. Los parámetros que se han medido durante el proceso de monitorización han sido: temperatura y pH del medio de cultivo, presión del aire comprimido inyectado, radiación global y PAR, concentración de CO<sub>2</sub>, producción de calor, producción y consumo de electricidad, parámetros de confort visual, acústico y olfativo.

El informe analiza el balance energético del edificio durante el periodo de Enero 2014 a Diciembre 2014. Durante los meses de marzo, noviembre y diciembre los resultados tienen un valor limitado ya que los fotobiorreactores estuvieron bajo labores de mantenimiento.

### *Análisis radiación solar*

El informe analiza la radiación solar que reciben las fachadas sureste y suroeste del edificio, conforme a mediciones realizadas in situ (figura 1.31). Se comprueba que la fachada sureste recibe un 25% más de radiación solar a lo largo del año que la suroeste. Este valor es llamativo ya que teóricamente y según la trayectoria solar, las dos fachadas deberían recibir la misma cantidad de radiación. Una posible causa de esta diferencia puede ser que las primeras horas del día haya más nubosidad que por la tarde, y esto limita la entrada de radiación directa por las mañanas. En total, las fachadas fotobiorreactoras reciben 1051 kWh/m<sup>2</sup> de radiación global anuales que, multiplicando por los 185 m<sup>2</sup> de paneles, dan lugar a un total de 102.909 kWh/anuales en el conjunto de la fachada fotobiorreactora. La radiación PAR, que es la utilizada por las microalgas para desarrollar la fotosíntesis, corresponde aproximadamente al 45%<sup>4</sup> de la radiación incidente, es decir unos 46.309 kWh/anuales.

Según el informe los meses de mayor captación solar son Febrero y Noviembre (entorno al 80-90%), y los menos eficientes Mayo y Junio (entorno al 40-50%). Esto se debe a que los datos que se manejan corresponden a la radiación global, tanto directa como difusa, sumado a que la orientación de los paneles en vertical favorece la entrada de radiación en invierno.

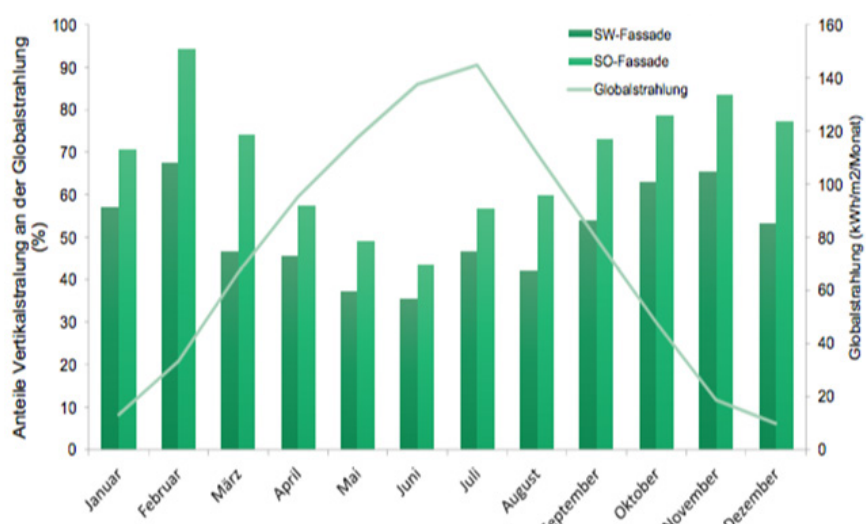
4. Todos los datos sobre la BIQ House que se analizan en los siguientes epígrafes han sido proporcionados por ARUP Berlín.

5. Véase RICHMOND, Amos; HU, Qiang. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. Chichester: Wiley, 2013; página 23.

Como se ha estudiado que niveles muy altos o muy bajos de radiación solar pueden resultar perjudiciales para el sistema, se analiza sobre los datos obtenidos en el informe los meses de Febrero y Mayo. El mes de Febrero cuenta con una radiación global incidente sobre la fachada sureste de aproximadamente 150 kWh/m<sup>2</sup>, los cuales corresponden a 5,35 kWh/m<sup>2</sup> de radiación global diarios. Transformando este dato a unidades de irradiancia obtenemos 208,33 W/m<sup>2</sup> de los cuales 93,74 W/m<sup>2</sup> representan la radiación PAR, es decir unos 431,24  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ . En los laboratorios, se trabaja con intensidades de inhibición de entre 200 y 400  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ , por lo que en términos de radiación en el mes de febrero se conseguiría un crecimiento óptimo de las microalgas.

En el mes de Mayo incide una radiación total de aproximadamente 70 kWh/m<sup>2</sup>, lo que son 2,25 kWh/m<sup>2</sup> diarios. Esto equivale a 93,75 W/m<sup>2</sup> de los cuales 42,18 W/m<sup>2</sup> corresponden a la radiación PAR, es decir 194,06  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ . Según estos datos en el mes de Mayo el crecimiento del cultivo sería inferior al óptimo. En sucesivos apartados se va a pasar a analizar el informe de la producción de estas dos variables y ver si guardan relación alguna con las conclusiones obtenidas del estudio de la radiación solar.

1.31 Gráfico de captación de radiación solar de la fachada fotobiorreactora.



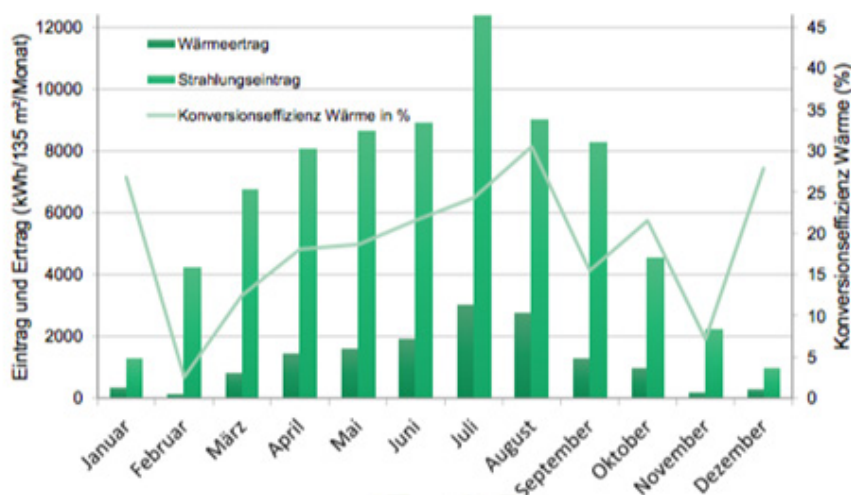
### Análisis de la producción de calor

El informe de ARUP también incluye datos sobre la producción de calor para agua caliente sanitaria que se van a analizar a continuación (figura 1.32). En total la fachada fotobiorreactora captó un total de 15.121 kWh/anuales de los cuales el 25% se pudo convertir en calor. Esta eficiencia de conversión es inferior a teórica de proyecto que apuntaba una eficiencia del 38%. Esta cifra es muy inferior a la obtenida por un sistema de captadores solares que puede alcanzar un 60%. Sin embargo, la rentabilidad que ofrece la fachada fotobiorreactora es la posibilidad de obtener agua caliente, biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> con un mismo sistema.

Analizando el informe se puede comprobar que los meses con mayor entrada de radiación y mayor rendimiento son aquellos con temperaturas más



elevadas. En el anterior gráfico se observaba lo contrario, por lo que se concluye que captación de radiación para la producción de calor para agua caliente es directamente proporcional a la temperatura exterior. Aun así, se observa como con valores muy bajos de radiación solar, en los meses de Diciembre y Enero, se obtienen una eficiencia de conversión del torno al 27%. Esto se debe a que en esos meses es cuando la fachada ha recibido la cantidad de luz visible (radiación PAR) necesaria para un crecimiento óptimo (en torno a  $90 \text{ W/m}^2$  o  $400 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$ ).



1.32 Gráfico de la producción de calor en la BIQ House. Las barras indican la captación de la radiación solar y la línea indica la eficiencia de conversión de cada mes.

#### Análisis de la producción de biomasa

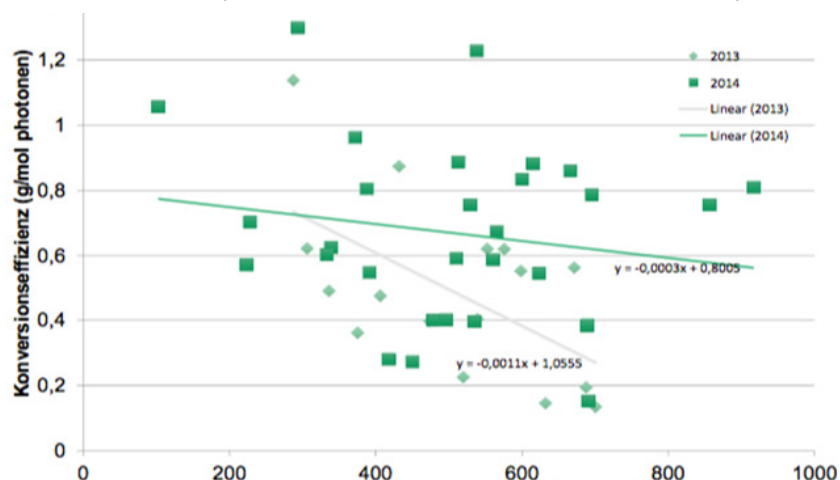
Sobre la producción de biomasa a partir del cultivo de microalgas, el informe establece que en la BQ House se ha conseguido una conversión en biomasa media de  $0,67 \text{ g/mol}$ , lo que corresponde a un 43% en relación a la conversión máxima teórica de la luz en biomasa, que se establece en  $1,57 \text{ g/mol}$ <sup>6</sup>. En total se consigue una producción de biomasa anual de 605 kg que corresponden a un contenido energético de 4.539 kWh. Este contenido de energía corresponde a una eficiencia de conversión de energía en biomasa de un 4,4% de la energía solar incidente.

En los gráficos (figura 1.33) se puede comprobar como las mayores eficiencias de conversión se sitúan con radiaciones PAR de entre  $300$  y  $600 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$ , lo equivalente a  $65$  y  $130,5 \text{ W/m}^2$ . Estos son los valores de irradiancia para los cuales el crecimiento del cultivo es óptimo, los cuales corresponden con intensidades lumínicas de entre 16.000 y 34.000 luxes. Teniendo en cuenta que bajo un cielo completamente nublado se miden intensidades de 10.000 luxes y que un cielo completamente descubierto corresponde a 100.000 luxes, se puede afirmar que las mayores eficiencias de conversión de la BIQ House ocurren en los momentos que el cielo está parcialmente cubierto, emitiendo parte de su radiación de forma directa, y otro tanto de forma difusa a través de las nubes.

A valores inferiores o superiores de irradiancia la conversión es menor, es decir, el crecimiento y la actividad fotosintética decrecen. Esto ocurre a partir de los  $600 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$  cuando la conversión empieza a ser menor. Esto

6. El informe de ARUP establece una conversión de la luz en biomasa máxima de  $1,57 \text{ g/mol}$ , esta cantidad varía según el género de alga y las condiciones a las que se somete el cultivo, como la cantidad de  $\text{CO}_2$

significa la irradiancia que reciben las microalgas supera el límite de saturación de estas (momento en el cual se alcanza una radiación máxima y comienza la fotoinhibición). Se puede establecer que el valor de radiación en el punto de saturación para el cultivo de la BIQ House es de 600  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ .



1.33 Gráfico de producción de biomasa que relaciona la eficiencia de conversión con la radiación PAR incidente.

#### Conclusiones del análisis de la BIQ House

El edificio BIQ House presenta una interesante alternativa a los sistemas de producción de agua caliente sanitaria y calefacción convencionales. Todavía presenta eficiencias de conversión de energía en calor bajas por lo que su instalación no resulta rentable en comparación a otros sistemas que duplican la tasa de eficiencia de conversión. Mejorando el prototipo de la fachada biorreactora se podrían mejorar estas eficiencias, siendo este el reto al que se enfrentan ahora los arquitectos e ingenieros participantes en el proyecto.

BALANCE ENERGÉTICO BIQ HOUSE	
Radiación Global Incidente: 102.909 kWh/a en 185 m <sup>2</sup>	
Producción de Calor	Producción de Biomasa
21.626 kWh/a Conversión de energía en calor 25%	4.539 kWh/a - 605 kg/a Conversión de energía en biomasa 4.4%

1.34 Tabla que muestra el balance energético de conversión de energía de la BIQ House.





## 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 PREPARACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Ya que el empleo de microalgas en la arquitectura es un campo de estudio en pleno desarrollo, se ha optado por realizar una parte experimental para entender mejor el comportamiento de estos microorganismos y sus posibles aplicaciones en la arquitectura. Esta parte experimental consiste en realizar una serie de modelos en los que se vierte medio de cultivo con microalgas, y posteriormente se realizan una serie de mediciones de temperatura, opacidad y concentración de  $\text{CO}_2$ .

#### Obtención de las muestras de microalgas

El primer paso antes de proceder a realizar los experimentos consistió en conseguir las muestras necesarias para su realización. Para ello se contactó con AlgaEnergy una empresa con base en Madrid especializada en el cultivo y comercialización de microalgas. Esta compañía investiga varias líneas de desarrollo ligadas a la agricultura, nutrición, cosmética y biocombustibles: los campos en auge de la investigación con microalgas. Todas estas aplicaciones tienen como punto de partida la generación de biomasa en fotobiorreactores, mismo sistema que se utiliza en la BIQ House y por lo tanto el adecuado para la realización de esta fase experimental.



2.1, 2.2 y 2.3 Fotografías de la planta PTEM de AlgaEnergy en Bajaras.

AlgaEnergy divide su producción de microalgas entre sus plantas de producción en Madrid y en Arcos de la Frontera (Cádiz). Para este trabajo se han visitado las instalaciones en Madrid, donde se encuentra su “Plataforma Tecnológica de Experimentación con Microalgas” (PTeM), situada en el Aeropuerto Adolfo-Suarez Madrid-Barajas. Esta planta tiene capacidad para cultivar 40.000 litros de diferentes especies de microalgas, donde el  $\text{CO}_2$  necesario se obtiene de las instalaciones industriales de IBERIA.

Lo más llamativo de las instalaciones del PTEM es que el conjunto de los biorreactores están cubiertos por una capa traslúcida que impide que la radiación incida directamente sobre las instalaciones. Esto se debe a que las altas temperaturas y radiación de Madrid pueden desencadenar procesos de fotoinhibición en las microalgas, por ello se sigue un control riguroso de estos parámetros.

Tras la visita a la planta de cultivo se obtienen dos inóculos de *Chlorella* y *Spirulina*, dos tipos de microalgas, y dos botellas correspondientes a cada especie con el medio de cultivo necesario para su cultivo (figura 2.4). Estas dos especies son las más comercializadas y sencillas de cultivar, además son

las empleadas en los diversos ejemplos de arquitectura que se han encontrado. Para realizar los experimentos finalmente se utilizan las muestras de *Chlorella* dado que por sus características y necesidades de cultivo resultan más idóneas. Además es el género de microalga utilizado en el proyecto BIQ House, que sirve de referencia.

*Chlorella* (figura 2.5) es un género de microalgas verdes unicelulares del filo *Chlorophyta*. Se caracterizan por tener una forma esférica midiendo de 5 a 10  $\mu\text{m}$ . Normalmente son organismos unicelulares aunque pueden agruparse formando filamentos y agrupaciones. Este tipo de microalgas están formadas por células procariotas que están compuestas por una región central rica en ADN y una región perimetral que contiene las membranas fotosintéticas. Este género de alga se utiliza para la producción de suplementos nutritivos y especialmente, para la producción de biodiesel ya que es uno de los microorganismos más adecuados para ello.

El rango de producción de biomasa de este género puede alcanzar los 1,06 g/litro día y la tasa de fijación de  $\text{CO}_2$  de 1,99 g/litro día, suponiendo un cultivo aireado con una mezcla con un 1% de  $\text{CO}_2$ <sup>7</sup>. Además esta microalga puede asimilar compuestos tóxicos como los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) o los óxidos de sulfuro ( $\text{SO}_x$ ), componentes encontrados en los gases industriales.

### Descripción de los parámetros a medir

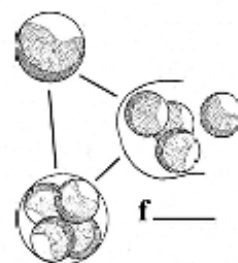
Una vez seleccionada y obtenida la muestra, el siguiente paso es definir los parámetros que se van a medir. Se estudia que parámetros pueden ser beneficiosos respecto a la aplicación arquitectónica de las microalgas y como se puede obtener información sobre ellos. Dado que los recursos y conocimientos sobre la materia son limitados se propone analizar tres parámetros directamente relacionados con el diseño arquitectónico: temperatura, opacidad y concentración de  $\text{CO}_2$ .

#### Temperatura

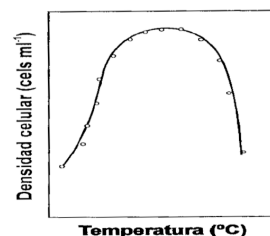
La temperatura es uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta en los cultivos de microalgas. La temperatura del cultivo está estrechamente relacionada con la producción de biomasa, ya que la producción de esta es dependiente de la temperatura del cultivo. En una primera fase del cultivo, el aumento de temperatura implica un aumento de la tasa de crecimiento hasta que llega a una temperatura óptima, a partir de la cual si sigue en aumento el crecimiento comienza a ser negativo (figura 2.6). Esta temperatura óptima a su vez depende de la iluminación, si disminuye la iluminación esta también disminuye, y viceversa. Por estos y otros motivos es difícil establecer un valor para la temperatura óptima de cultivo de las microalgas por lo que se establece un rango de temperatura. En la mayor parte de los tipos de microalgas, incluida *Chlorella*, esta temperatura se sitúa entre los 18 y 25°C.



2.4 Fotografía de las muestras obtenidas. En la izquierda se sitúan las muestras de *Chlorella* y sus nutrientes y en la derecha las de *Spirulina* y sus nutrientes.



2.5 Ilustración de una célula de la microalga *Chlorella*.



2.6 Curva crecimiento microalgas en función de la temperatura.

7. Véase TEBANNI, Sihem; FILARI, Rayen; LOPES, Filipa; DUMUR, Didier; PAREAU, Dominique. *CO<sub>2</sub> Bio-fixation by Microalgae: Automation Process*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014; página 30.



2.7 Fotografía del termómetro Testo 435-2 utilizado en la medición. Izquierda: sonda aire ambiente, derecha: sonda sumergible.

Se decide medir este parámetro durante la fase de experimentación, no solo por los motivos propiamente biológicos para la medición de la temperatura, sino que se tiene en cuenta que una de las posibles aplicaciones de las microalgas en la arquitectura, que explora la BIQ House, es la obtención de Agua Caliente Sanitaria a través de los paneles biorreactores. Por ello se pretende tomar mediciones de temperatura no solo para comprobar que se encuentra dentro de los límites –teniendo en cuenta que los experimentos se realizan en el mes de Mayo cuando las temperaturas exteriores pueden alcanzar los 30°C- sino también para comprobar su viabilidad como instalación de producción de ACS.

Para medir la temperatura se utiliza un medidor multifunción testo 435-2 (figura 2.7). Se utilizan dos tipos de sonda: una para medir la temperatura del aire exterior y otra de inmersión para poder medir la temperatura del medio de cultivo con las microalgas.

### Luz

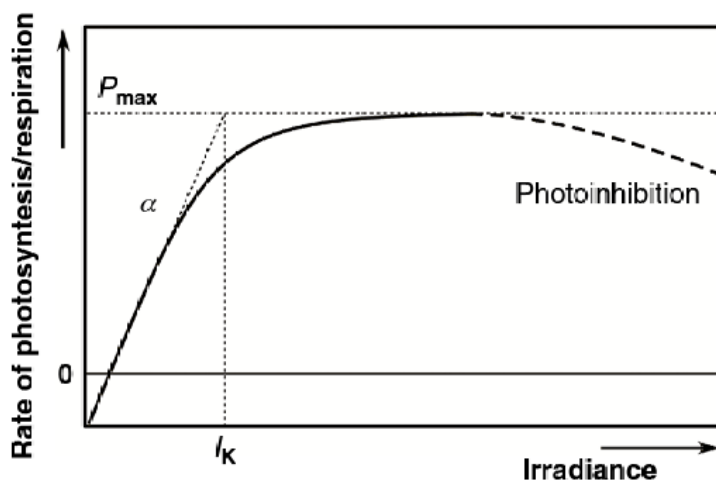
La luz es otro de los parámetros fundamentales para el cultivo de estos microorganismos, ya que el crecimiento de estos depende de la disponibilidad y uso eficiente de este componente. Como ya se ha visto con la temperatura, un aumento significativo de esta puede suponer el decrecimiento del cultivo. Esto mismo ocurre en relación a la intensidad lumínica. A valores superiores de intensidad lumínica las microalgas reciben más energía de la necesaria para la fotosíntesis, por lo que comienzan a disipar esta en forma de calor, y baja la producción de biomasa y por tanto la opacidad. Por lo tanto el aporte de intensidad lumínica que reciben los paneles es un factor variable que se puede utilizar en función de la aplicación que se quiera conseguir, ya sea ACS o biomasa. Si se busca la producción de agua caliente se puede aumentar la intensidad lumínica que recibe el cultivo, aunque esto haga disminuir la producción de biomasa.

Dependiendo del grado de iluminación, las microalgas pueden estar en fase de respiración (en caso de ausencia de luz), limitación (insuficiente entrada de luz), saturación (alcanzando el punto máximo de crecimiento fotosintético) o de inhibición (pérdida de capacidad fotosíntesis causada por una excesiva intensidad lumínica)<sup>8</sup>. Por ello es necesario saber el valor de la intensidad lumínica que se alcanza en el punto de máximo crecimiento fotosintético.

Esto se determina a través de la curva P/I (figura 2.8) que relaciona la evolución de la tasa fotosintética en función de la intensidad, donde  $P_{max}$  hace referencia a la mayor tasa fotosintética e  $I_k$  se corresponde al valor de intensidad a partir del cual se alcanza la saturación. Estos valores varían en función del género de microalgas y de las condiciones ambientales, temperatura, exterior o laboratorio, nutrientes, etc. Conociendo el valor de intensidad  $I_k$  a partir del cual empieza el proceso de fotoinhibición, se puede controlar

8. Véase TEBANNI, Sihem; FILARI, Rayen; LOPES, Filipa; DUMUR, Didier; PAREAU, Dominique. *CO<sub>2</sub> Bio-fixation by Microalgae: Automation Process*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014; página 16.

la intensidad lumínica para que no sobrepase este valor y el crecimiento sea máximo para una mayor producción de biomasa.



2.8 Curva P/I, representación esquemática de la relación de dependencia entre la actividad fotosintética y la irradiancia. La intersección entre la curva  $\alpha$  y el punto  $P_{max}$  es la irradiancia de saturación  $I_k$ .

La intensidad lumínica o irradiancia es el flujo luminoso recibido o emitido por unidad de superficie. Esta se mide normalmente en  $W/m^2$ , pero dado que las reacciones fotoquímicas que tienen lugar en el proceso de fotosíntesis dependen del número de fotones que inciden en una superficie, la irradiancia se puede medir como el número de fotones que alcanzan una unidad de superficie en una unidad de tiempo, es decir en  $\mu mol/m^2s$ . La relación entre las dos magnitudes es aproximadamente  $1 W/m^2$  equivale a  $4,6 \mu mol/m^2s$ <sup>9</sup>. Estas magnitudes se utilizan para medir la radiación PAR, situada entre longitudes de onda de 400 a 700 nm del espectro electromagnético, y que es la que utilizan los organismos para realizar la fotosíntesis.

Respecto a la curva P/I, en ensayos de laboratorio se ha estimado que las microalgas alcanzan niveles de fotoinhibición entre 200 y 400  $\mu mol/m^2s$ . Estas intensidades se pueden controlar en espacios interiores donde la iluminación es artificial, pero tratándose de espacios exteriores con irradiancia solar de 2.000  $\mu mol/m^2s$  en las horas centrales del día es preferible evitar la llegada de radiación directa mediante sistemas de protección.

Para medir la irradiancia se utiliza un luxómetro que caracteriza la intensidad luminosa (figura 2.9). Este valor se mide en luxes y posteriormente se transforma a  $W/m^2$  o  $\mu mol/m^2s$ , teniendo en cuenta que un lux equivale a 0,019  $\mu mol/m^2s$ . El luxómetro empleado para medir la intensidad lumínica es de la casa Koban el modelo KL 6610.



2.9 Luxómetro KL 6610 de la casa Koban.

### Concentración de $CO_2$

El carbono es el nutriente más importante de las microalgas y supone el 50% de la biomasa que estas producen. Concentraciones altas de  $CO_2$  favorecen cuantitativamente el crecimiento del cultivo, por lo que normalmente estos se enriquecen entre el 1,5-5%, ya que el aire atmosférico contiene solo un 0,039% de  $CO_2$ . El sistema de enriquecimiento presenta una gran oportuni-

9. Véase RICHMOND, Amos; HU, Qiang. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. Chichester: Wiley, 2013; página 22.



2.10 Fotografía del  
medidor de  $\text{CO}_2$  utilizado,  
el model Testo 535.

dad para la fijación de  $\text{CO}_2$  proveniente de combustibles fósiles encontrados en las grandes áreas urbanas.

Sin embargo, un alto porcentaje de  $\text{CO}_2$  puede derivar en un aumento del pH y la consecuente acidificación del medio, algo que puede ser letal para el crecimiento de las microalgas. Se debe inyectar el dióxido de carbono de manera que el pH se mantenga neutro, entre valores de 7 y 8.

Para medir la concentración de  $\text{CO}_2$  del ambiente se ha utilizado el medidor Testo 535 (figura 2.10), para caracterizar el aire ambiente del espacio donde se han colocado los modelos con microalgas.

## 2.2 PRIMEROS ENSAYOS

### Instrucciones

Una vez obtenidas las muestras el objetivo es aprender a controlar el medio de cultivo y crecimiento de las microalgas, realizando unos primeros ensayos en una botella de plástico. Con estos ensayos se pretende conseguir que el medio de cultivo crezca lo suficiente para posteriormente realizar ensayos que midan la temperatura, opacidad y concentración de  $\text{CO}_2$ . Para realizar estos primeros experimentos se dispone de:

Un inóculo de microalgas de 50 mililitros del genero *Chlorella* (figura 2.11) y su correspondiente botella con nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo). Una botella de plástico de 50 centilitros vacía que sirve como recipiente para la realización de los ensayos (figura 2.12). Finalmente para poder inyectar  $\text{CO}_2$  a la mezcla se utiliza una bomba de aire de pecera que suministra aire ambiente del local, de la marca SERA modelo 110 plus (figura 2.13).

El ensayo (figura 2.14) comienza vertiendo 25 ml del inóculo de microalgas en la botella vacía y posteriormente, vertiendo la misma cantidad de nutrientes. A continuación, se inyecta el aire a presión con la bomba de pecera. Hay que asegurarse de que el aire llega hasta el fondo del recipiente para que haya un movimiento continuo de las partículas y no se depositen en el fondo, impidiendo así el crecimiento de estas. El aire suministrado a través de la bomba de aire es aire ambiente, por lo que el contenido de  $\text{CO}_2$  no es suficiente para un crecimiento óptimo. Posteriormente se harán ensayos inyectando un enriquecido de  $\text{CO}_2$ .

Finalmente el último paso es situar el recipiente en un lugar que reciba radiación solar. Teniendo en cuenta que los primeros ensayos se realizan en los meses de Marzo y Abril en Madrid, no se debería exponer al sol completamente la muestra ya que los niveles de radiación durante las horas centrales del día son bastante elevados con un promedio de  $5,9 \text{ kWh/m}^2$ . La radiación PAR aproximada correspondiente a estos niveles es de  $245 \text{ W/m}^2$  o  $1130 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$ , una intensidad muy elevada que probablemente desencadenaría la fotoinhibición.

Para comprobar si efectivamente la radiación exterior es perjudicial para el cultivo se prueba a someterlo tanto una radiación interior emitida por iluminación artificial LED como a la radiación exterior, para así comprobar lo estudiado en la fase de investigación.



2.11, 2.12 y 2.13 Elementos para la realización de los experimentos. De arriba a abajo: inóculo de *Chlorella*, botella de agua y bomba de aire de pecera.

2.14 Ilustración del experimento paso a paso.





## Primeros ensayos y resultados

### Ensayo 1

El primer ensayo comienza el día 20 de Marzo y finaliza el día 29 de Marzo tras comprobar que el crecimiento del cultivo ha sido negativo. El recipiente se situó orientado al sur detrás de una pared que lo sombrea, con el objeto de comprobar si la situación de sur y protegido es la idónea. Durante el ensayo se midieron los parámetros de temperatura y la intensidad luminosa en el punto donde se realizaba el ensayo. El día 20 de Marzo a las 15:00 se midió una temperatura exterior de 27,3°C, una temperatura del medio de cultivo de 24,3°C y una intensidad lumínica de 3.100 luxes.

Se han analizado todos los factores para ver las posibles causas de que el experimento haya sido fallido. La temperatura no es una causa ya que la mezcla ha estado dentro de los límites óptimos de crecimiento. La intensidad lumínica podría ser un problema ya que 3.100 luxes de intensidad lumínica transformados en irradiancia corresponden a 12,8 W/m<sup>2</sup> o 59 µmol/m<sup>2</sup>s de radiación PAR. Una irradiancia tan baja puede haber sido la causa de la muerte de las microalgas.

Otro factor posible es la falta de nutrientes, ya que solo se incorporaron el primer día del ensayo y durante nueve días no se incorporó más nutriente a la mezcla. En prototipos como la BIQ House la entrada de nutrientes en los paneles es continua, pero en estos experimentos no se puede tener una entrada continua así que se comprueba que hay que incorporar nuevo medio de cultivo cada 2-3 días. Pero sin duda el factor más determinante fue el exceso de burbujeo y entrada de aire en la mezcla. La bomba de aire utilizada tiene una presión mínima 100mbar, y en el caso de estudio de la BIQ House se utilizaba una presión de 2 bar para un volumen por panel 15 veces mayor. Se descubre que la presión puede ser excesiva y para futuros ensayos se controla mediante pinzas en el tubo que dificultan el paso de la presión a potencia alta.



2.15 y 2.16 Fotografías del ensayo los días 20 y 29 de Marzo, respectivamente. Se observa como en la fotografía inferior el color verde característico de la clorofila es casi inexistente, por lo que apenas quedan microalgas.

### Ensayo 2

El segundo ensayo comienza el día 3 de Abril y finaliza 24 horas después. Este ensayo se realiza al aire libre sin ningún tipo de protección frente al sombreamiento para el medio de cultivo. Se utiliza una botella similar como recipiente y se vuelven a añadir 25 ml de microalgas y 25 ml de medio de cultivo y nutrientes. Se toman mediciones en el momento del comienzo del ensayo a las 17:00 horas midiendo una temperatura exterior de 23°C, una temperatura del agua de 21,5°C y una intensidad lumínica de 60.000 luxes.

El cultivo resistido al exterior las últimas horas de la tarde y la noche, así como las primeras horas de la mañana del día siguiente. La problemática surgió cuando en torno a las 15:00 del día siguiente se comprobó que el cultivo se había diluido completamente y las algas habían perecido. Se había pro-

ducido fotoinhibición en la muestra debido a las altas intensidades de radiación solar. En aquel momento se midió una temperatura exterior de 25,7°C y sin embargo la temperatura del cultivo ascendía hasta los 32,6°C. En ese instante la intensidad lumínica se situaba en 92.000 luxes, que corresponde a una irradiancia de 380 W/m<sup>2</sup> o 1748 μmol/m<sup>2</sup>s. Esta radiación triplica los valores de irradiancia máxima que se estimaron durante el análisis de la BIQ House, 600 μmol/m<sup>2</sup>s, por lo que se produjo la fotoinhibición del cultivo.

Con este ensayo se descubre que en un clima templado-cálido como el de la ciudad de Madrid, no se puede mantener un cultivo al sol sin sombreadamiento, sino que hay que protegerlo con un elemento translúcido, al igual que se hace en la planta de cultivo de AlgaEnergy en Barajas (figuras 2.1 y 2.2).

### Ensayo 3

Este último ensayo se realizó entre los días 12 y 15 de Abril en un espacio interior orientado a norte e iluminando el recipiente con una bombilla LED blanca. Se vertió en una botella de plástico de las mismas características la misma proporción de microalgas y medio de cultivo que en los anteriores ensayos. Se midieron una temperatura exterior de 26,2°C, una temperatura del medio de cultivo de 24,5°C y una intensidad lumínica de 15.000 luxes, que transformados a radiación PAR son 62 W/m<sup>2</sup> o 285 μmol/m<sup>2</sup>s. Todos los parámetros medidos se encontraban dentro de los límites establecidos pero aun así el ensayo resultó fallido y a los tres días las microalgas estaban muertas.

Para encontrar el problema del ensayo esta vez se contactó con AlgaEnergy, la empresa que proporcionó las muestras y que ha estado ayudando a controlar los experimentos a lo largo del proceso. Ya que estaba claro que los motivos de que fallara el ensayo no habían sido ni la temperatura ni el exceso de radiación, se propusieron dos teorías. Una primera que apuntaba al plástico de la botella que podría contener toxinas para las microalgas. Otra posible causa sería la piedra de acuario utilizada para difuminar el burbujeo. El cometido de esta pieza es romper las burbujas de aire provenientes de la bomba de pecera en pequeñas partículas. Al entrar en contacto estas pequeñas partículas con las microalgas, produjeron la ruptura de sus células y por tanto un daño irreversible.

En función de este último ensayo, para futuros ensayos se decidió por mantener el recipiente de vidrio hasta que las microalgas estuvieran en una fase avanzada de crecimiento y prescindir de la piedra de pecera haciendo que las burbujas de aire salieran directamente del tubo.

### Conclusiones parciales

A partir de estos primeros ensayos se han obtenido una serie de conclusiones que se aplicarán a los ensayos comparativos y al diseño del prototipo.



2.17 y 2.18 Fotografías del ensayo 2 de los días 3 y 4 de Abril respectivamente. En la fotografía de abajo se observa que la fotoinhibición ha convertido el cultivo en casi transparente.



2.19 Fotografía del 12 de Abril en la que se observa la piedra de acuario de color azul que resultó perjudicial para las microalgas.



Controlar la temperatura e irradiancia es fundamental para poder conseguir un crecimiento óptimo del cultivo, por ello hay que asegurar que la temperatura está siempre en torno a los 25°C y mantener el cultivo en un lugar que no reciba radiación directa del sol sino difusa, o mediante iluminación artificial LED. También es fundamental controlar la presión de forma que las microalgas estén en constante movimiento pero sin que esto llegue a dañar sus células. Finalmente es necesario un flujo de nutrientes de manera constante, aunque esto en la fase de experimentación sea complicado de conseguir, será un factor fundamental a la hora del diseño.

2.20 Tabla de conclusiones parciales de los primeros ensayos realizados.

CONCLUSIONES PRIMEROS ENSAYOS					
Ensayo	Condiciones		Problemas	Soluciones	Repercusión Arquitectónica
1	T°ext	27,3°C	Insuficiente radiación solar. Modelo completamente en sombra.	Situat el modelo al exterior o iluminado.	Situat los paneles en un lugar que no esté permanentemente en sombra.
	T°algas	24,3°C			
	Inten. luminica	3.100 lux	Falta de nutrientes.	Suministrar nutrientes cada 2-3 días.	Suministro continuo de nutrientes en el sistema de la fachada.
	Radiación PAR	12.8 W/m <sup>2</sup> 59 µmol/m <sup>2</sup> s	Exceso de presión del aire inyectado en el cultivo.	Modificar la presión para que sea menor y no dañe las células de las microalgas.	Presión del aire comprimido en torno a 2 bar (como en la BIQ House).
2	T°ext	25,7°C	Excesiva radiación. Se produce la fotoinhibición y muerte de las algas.	Situat el modelo en el interior iluminado con una bombilla LED.	Sistema constructivo de paneles que bloqueen parcialmente la entrada de radiación solar en los momentos que resulte más elevada.
	T°algas	32,6°C			
	Inten. luminica	92.000 lux			
	Radiación PAR	380 W/m <sup>2</sup> 1748 µmol/m <sup>2</sup> s			
3	T°ext	26,5°C	Las burbujas de aire que entran en el cultivo dañan las células.	Eliminar la piedra de pecera y utilizar un tubo de mayor diámetro.	Conductos de salida del aire comprimido en los paneles fotobiorreactores > ø2cm.
	T°algas	24,5°C			
	Inten. luminica	15.000 lux			
	Radiación PAR	62 W/m <sup>2</sup> 285 µmol/m <sup>2</sup> s			

## 2.3 ENSAYOS COMPARATIVOS

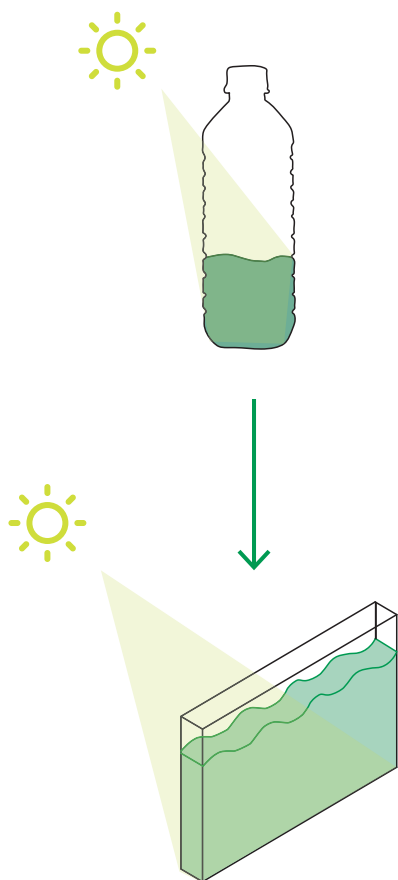
### Clases de ensayos

Durante esta segunda fase de experimentación se van a realizar unos ensayos comparativos para medir las variables de temperatura, opacidad y concentración de  $\text{CO}_2$  en unos recipientes que se asemejen en su geometría y forma a una muestra de lo que podría ser una envolvente de un edificio. Para poder realizar estos ensayos con mayor facilidad que los anteriores, se han vuelto a obtener muestras de microalgas de la empresa AlgaEnergy. Esta vez la muestra estaba cultivada y crecida de antemano como para que variables como la temperatura, irradiancia o material del recipiente no sean un problema a priori.

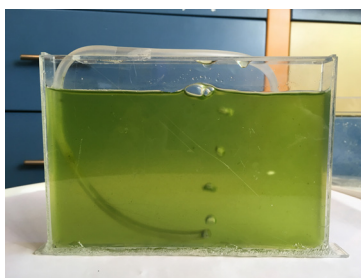
Para la fabricación de los modelos se ha optado por modelar unos paneles de 16 cm de ancho, 12 de alto y 1,7 cm de espesor (figura 2.24), la misma cavidad que presentan los paneles de la BIQ House. Los paneles se fabrican a partir de metacrilato de 2 mm de espesor y se sellan mediante cloroformo y pegamentos hasta que se consigue su estanqueidad. Estos modelos están sellados en todas sus aristas menos en una esquina en la parte superior por donde se insertan los tubos que inyectan el aire a presión y  $\text{CO}_2$ .



2.21 Fotografía de la muestra de microalgas obtenida para realizar los ensayos comparativos.



2.22 Izquierda. Ilustración del cambio de recipiente para los ensayos comparativos.



2.23 Derecha arriba. Fotografía del recipiente primeros ensayos.

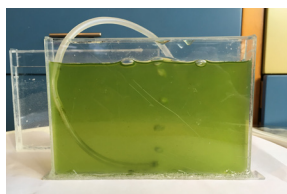
2.24 Derecha abajo. Fotografía del recipiente de los ensayos comparativos.

## Ensayos

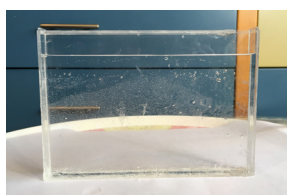
### *Ensayo de temperatura*

Este ensayo tiene como función comprobar la viabilidad del empleo de microalgas para la obtención de agua caliente sanitaria. Se realiza un ensayo dado que este hecho solo ha sido probado por la BIQ House y no se ha escrito nunca fundamentación teórica sobre ello, por lo que se considera fundamental para este trabajo confirmar si las microalgas funcionan como fluido caloportador. Durante el proceso de fotosíntesis las microalgas pueden disipar hasta un 60% de energía en forma de calor, lo que evidencia la capacidad para calentar el fluido en el que se encuentran sumergidas. La incógnita es cuál es el incremento de temperatura, que es lo que se va a comprobar durante este ensayo.

Para el ensayo, realizado el día 23 de Mayo, se han dispuesto los dos paneles modelo en el interior de una local con orientación norte e iluminados con una bombilla LED. Uno de los paneles se ha rellenado con microalgas (figura 2.25) y medio de cultivo a partes iguales, y el otro se ha llenado simplemente con agua (figura 2.26). Se someten los dos paneles a la misma intensidad lumínica durante un día y se procede a tomar mediciones al día siguiente. Este margen de un día se realiza para que las temperaturas de los dos fluidos se estabilizen ya que el medio de cultivo proviene de la nevera y está a una temperatura inferior que el agua del otro panel.

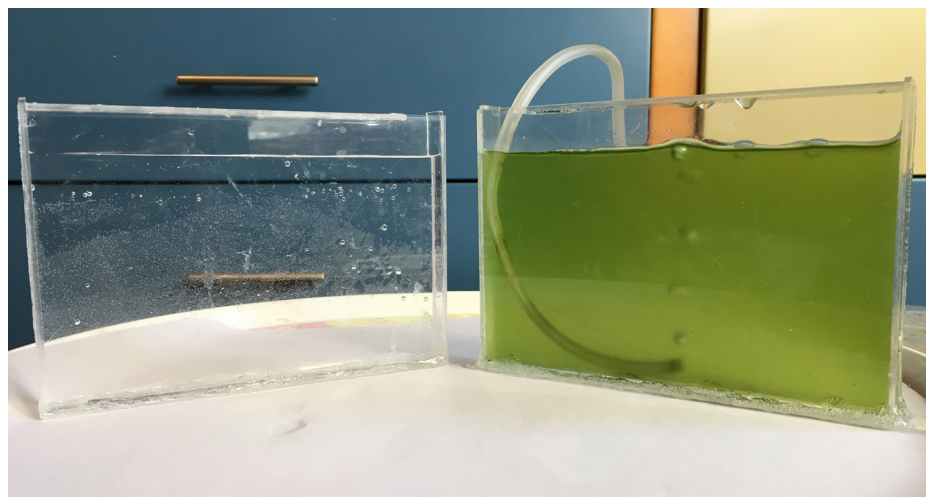


2.25 Izquierda arriba.  
Fotografía del modelo  
con microalgas



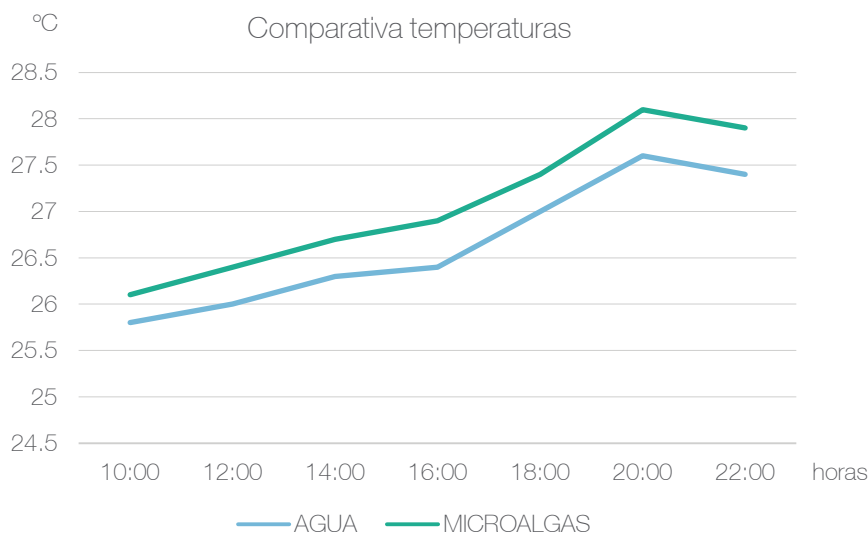
2.26 Izquierda abajo.  
Fotografía del modelo  
con agua.

2.27 Fotografía del  
experimento de temperatura  
con los dos modelos.



Durante el día 24 de Mayo se produce la toma de mediciones durante todo el día en intervalos de dos horas. Se mantiene una intensidad lumínica de en torno a 15.000 luxes durante toda la jornada. En el gráfico (figura 2.28) se puede observar cómo durante toda la jornada la temperatura de las microalgas es aproximadamente medio grado superior que la del agua. Esta variación mínima de temperatura no demuestra una eficiencia competitiva de conversión de energía solar en calor por parte de estos microorganismos, aunque puede deberse también a varios factores que impiden un mejor rendimiento. El ensayo se realiza a finales del mes de Mayo con unas

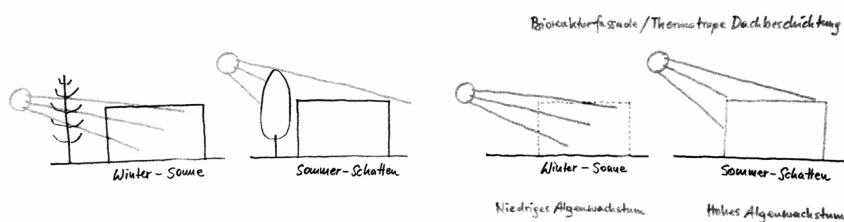
temperaturas medias diarias que casi alcanzan los 30°C, y con estas temperaturas, es imposible mantener el fluido por debajo de los 25°C recomendados para un crecimiento óptimo. Hay que recordar que la literatura escrita sobre el cultivo de microalgas establece que la capacidad fotosintética de estos organismos aumenta proporcionalmente con la temperatura hasta llegar a un valor límite a partir del cual el crecimiento es negativo. Las temperaturas alcanzadas el día del experimento superan ese valor mínimo con lo que cabe suponer que si la temperatura se hubiera mantenido por debajo de los 25°C las diferencias de temperatura entre los dos fluidos hubieran sido más amplias.



2.28 Gráfico del ensayo comparativo de temperaturas a lo largo del día.

### Ensayo de opacidad

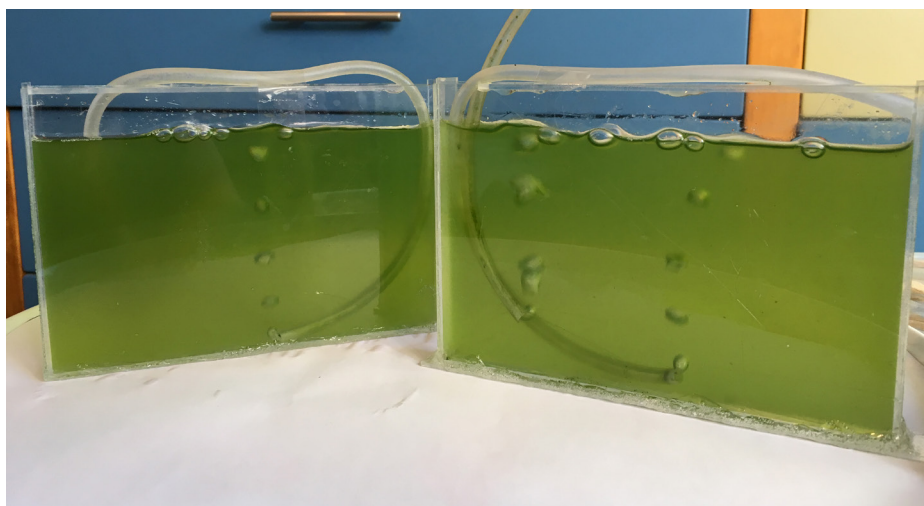
El ensayo de opacidad sirve como base para analizar la viabilidad de los paneles de microalgas como elemento de protección solar. Este factor se quiere comprobar ya que hay diferencias de opinión entre los datos obtenidos a través de libros especializados en el cultivo de microalgas, y los principios de la BIQ House. Según los arquitectos de esta última, la fachada con paneles fotobiorreactores cambiaría de opacidad según la estación, permitiendo el paso de la radiación solar en invierno y bloqueándolo en verano (figura 2.26).



2.29 Ilustración del funcionamiento del sombreamiento de la fachada fotobiorreactora de la BIQ House, comparación con una protección de vegetación caduca.

Sin embargo, la teoría explica que en condiciones de luz limitadas, las microalgas aumentan su pigmentación, y con ello aumenta el número de unidades fotosintéticas. Por el contrario, cuando la irradiancia es superior a la óptima, se reduce la pigmentación. Si efectivamente ocurre esto, los paneles fotobiorreactores no cumplen una función de protección solar dinámica que varía según las condiciones climáticas; sino que la protección es estática produciendo un sombreadamiento que no se adapta a las condiciones climáticas del lugar.

Para la realización de este experimento se ha vertido medio de cultivo y microalgas en los dos moldes fabricados (figura 2.30). Lo ideal para realizar el experimento sería someter a los dos modelos a condiciones climáticas dispares pero eso no se ha podido conseguir debido a las altas temperaturas de Mayo, y a que los dos moldes tienen que estar situados relativamente cerca el uno del otro ya que solo se dispone de una bomba de aire que es necesaria para que realicen la fotosíntesis. Por lo tanto se han situado los dos modelos de manera que solo uno de ellos estuviese iluminado con una bombilla LED, teniendo una intensidad lumínica de aproximadamente 15.000 luxes.



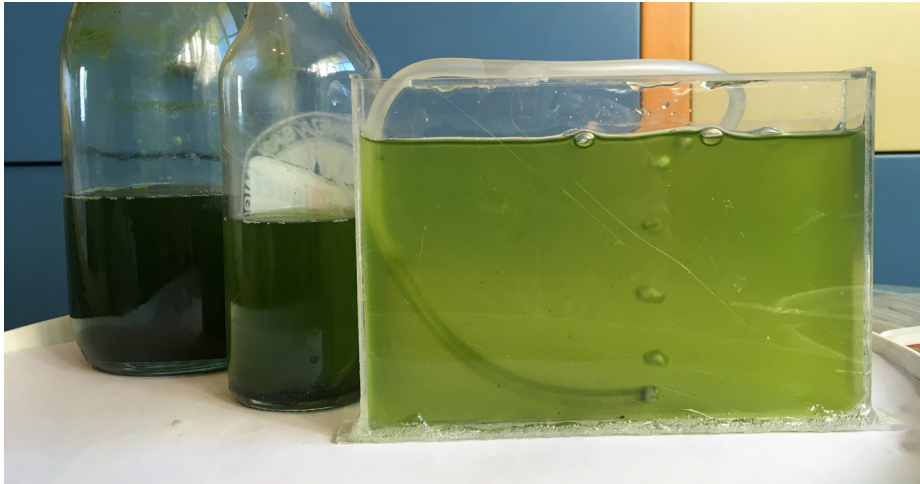
2.30 Fotografía del ensayo comparativo de opacidad.

El experimento se realiza durante el periodo del 25 al 27 de Mayo durante los cuales las temperaturas diurnas alcanzan los 30°C y la temperatura del agua del cultivo se mantiene entre 26 y 28°C. Durante este tiempo no se ven cambios considerables en la opacidad entre las diferentes muestras, suponiendo que las condiciones no son las óptimas para realizar el experimento. Teniendo en cuenta que las temperaturas del cultivo superan los 25°C se puede suponer que están en fase de crecimiento negativo, razón por la cual sus células no van en aumento en ninguna de las dos situaciones.

Mediante la experimentación no se ha podido constatar si la hipótesis sobre sombreadamiento que plantea la BIQ House es adecuada, pero se puede poner en duda debido a las investigaciones hechas sobre la materia y a que durante el ensayo inicial 2 se constató que una temperatura e irradiancia

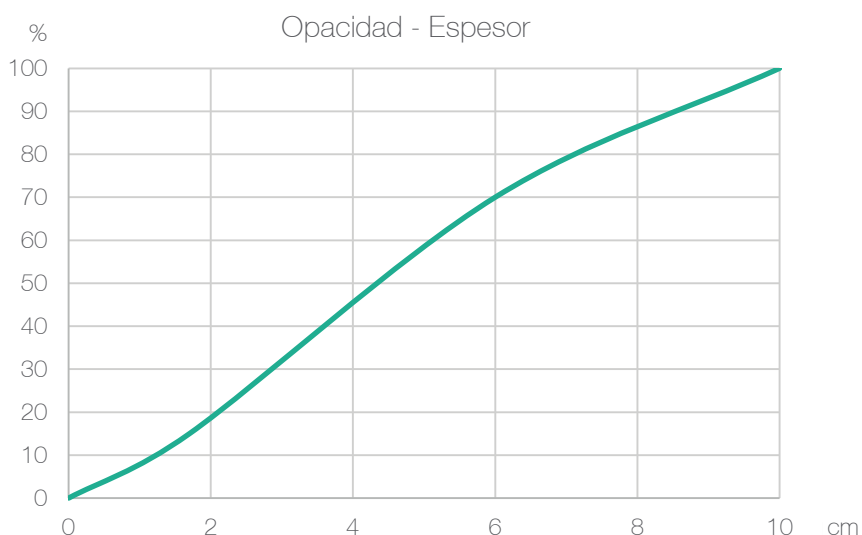
elevadas transformaban el medio de cultivo de verde brillante a casi transparente (figuras 2.17 y 2.18).

Posteriormente se pasa a hacer un segundo ensayo relacionando la opacidad del cultivo con el espesor del modelo, para ver si se puede establecer una relación entre ellos. Este estudio se considera importante ya que a la hora de diseñar la envolvente de un edificio es importante analizar la funcionalidad de sus paramentos. Un panel fotobiorreactor más opaco podría ser interesante como cerramiento de locales con usos que requieran más privacidad y uno traslúcido para poder permitir la visión del exterior.



2.31 Fotografía del ensayo comparativo de espesor-opacidad. De izquierda a derecha espesores de 10, 6 y 1,7 cm respectivamente.

Para comparar opacidades se utilizan tres diferentes recipientes completamente transparentes con distintos espesores (figura 2.31). El primero es una botella de cristal de 10 cm de diámetro, el segundo otra botella de cristal más pequeña de 6 cm de diámetro y finalmente el modelo de panel fabricado que tiene 1,7 de espesor. En ellos se vierte el mismo medio de cultivo en las mismas condiciones y se observa que el espesor es un factor muy determinante en la opacidad. Se ha establecido una curva que relaciona espesor-opacidad para la aplicación de estos cultivos en el diseño arquitectónico. En el gráfico (figura 2.32) se observa que el aumento de opacidad es prácticamente lineal al aumento del espesor.



2.32 Gráfico que relaciona la opacidad del panel en % con el espesor de este en cm.

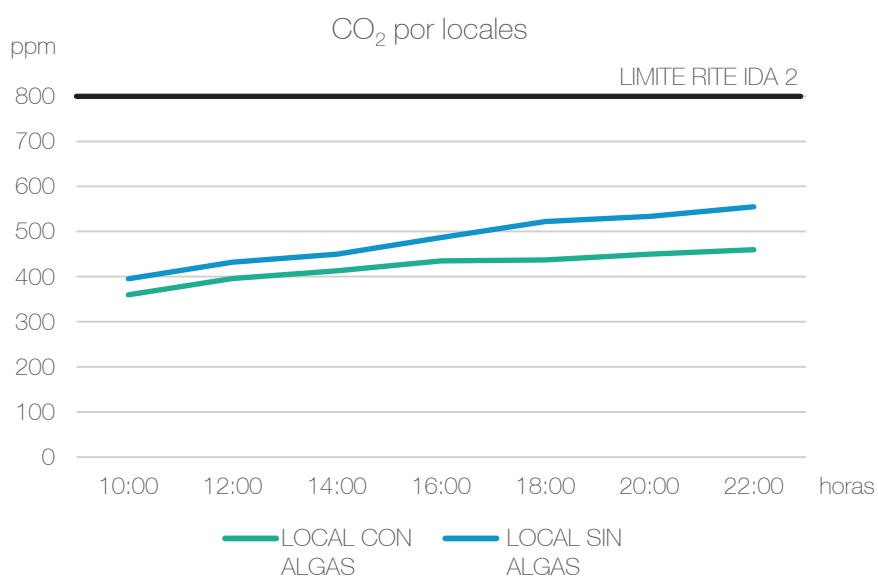


### Ensayo concentración de $\text{CO}_2$

Uno de los campos de estudio más en auge de la biotecnología microalgal es la capacidad de estos organismos para fijar grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  a la vez que realizan la fotosíntesis para la obtención de biomasa. Una vez comprobado que el rendimiento del uso de microalgas, para la obtención de ACS, no es competitivo al lado de un colector solar tradicional, y que la funcionalidad de los paneles fotobiorreactores como protección solar dinámica está en duda, la capacidad de estos organismos para combatir las emisiones de gases nocivos se convierte en el mayor atractivo presentado por estos sistemas.

Para medir la concentración de  $\text{CO}_2$ , primero se procede a medir la concentración de partículas por millón en dos locales con un tamaño y orientación similar. En uno de ellos es donde están situados los modelos con microalgas que absorben continuamente el aire del ambiente a través de la bomba de aire y expulsan oxígeno a través de la fotosíntesis. Como base, el RITE establece que para un local IDA 2 (aire de buena calidad), como pueden ser unas viviendas u oficinas, la concentración de  $\text{CO}_2$  debe ser como máximo 500 ppm por encima de la concentración del aire exterior. Según los estándares de la *Passive House*, la concentración de  $\text{CO}_2$  en ambientes interiores no debe superar nunca las 1.000 ppm.

Conociendo estos factores se empiezan a tomar mediciones a lo largo del día 28 de Mayo simultáneamente en los dos locales, en intervalos de dos horas. De las mediciones y las gráficas (figura 2.33) se puede ver que la concentración de  $\text{CO}_2$  se reduce como máximo 150 ppm en el local con microalgas. Cabe destacar que hay muchos factores externos al propio experimento que pueden alterar la concentración de  $\text{CO}_2$  independientemente de las microalgas. Aun así se destacan los valores positivos aun teniendo en cuenta que el  $\text{CO}_2$  es mínimamente extraído por una bomba de aire, aplicando otros sistemas de extracción de aire en locales interiores se podría reducir más esta cantidad a la vez que se fabrica biomasa.



2.33 Gráfico de la cantidad de ppm registradas durante todo un día en los dos locales (uno con microalgas y otro sin microalgas).

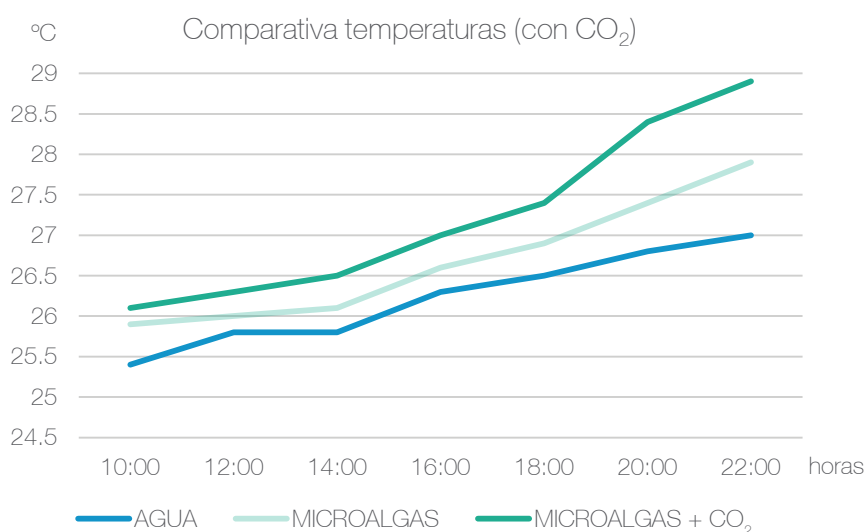
Posteriormente, se realiza otro segundo experimento relacionado con el dióxido de carbono esta vez para comprobar si una mayor proporción de  $\text{CO}_2$  en el medio de cultivo supone una mayor tasa fotosintética y por lo tanto un mayor crecimiento. Primeramente, hay que recordar que el aire atmosférico contiene solo un 0,039% de  $\text{CO}_2$  por lo que en los cultivos industriales de microalgas se suele incrementar entre un 1-5%.

El experimento se realiza el día 29 de Mayo vertiendo el mismo medio de cultivo en los dos modelos de paneles fabricados, e inyectando en uno de ellos un enriquecido de  $\text{CO}_2$ . La iluminación sigue siendo constante con una intensidad de 15.000 luxes producida por una bombilla LED blanca. Para poder realizar este experimento y aumentar la inyección de  $\text{CO}_2$  se dispone de un spray de  $\text{CO}_2$  para plantas de acuario de la marca ISTA. No se disponen datos concretos de la composición del gas y al ser un spray el suministro no es continuo, sino puntual. Teniendo en cuenta esto y que una excesiva concentración de  $\text{CO}_2$  en el cultivo puede aumentar el pH y dañar las células, se ha optado por suministrar el  $\text{CO}_2$  en intervalos de una hora, y se realizan mediciones cada dos horas. El objetivo del ensayo es ver si hay cambios notables en la temperatura de la mezcla.

Tras tomar mediciones durante un día se puede comprobar en el gráfico (figura 2.35) que la diferencia de temperatura es de en torno a un grado más elevada en la mezcla con enriquecido de  $\text{CO}_2$ . Extrapolando este resultado al primer ensayo comparativo de temperatura se aprecia que la diferencia entre las microalgas con  $\text{CO}_2$  y el agua alcanza casi los dos grados. Se puede concluir afirmando que una mayor concentración de  $\text{CO}_2$  beneficia la producción de biomasa y facilita la conversión de energía en ACS, además que purifica el ambiente del que se extrae el  $\text{CO}_2$ .



2.34 Fotografía del spray de  $\text{CO}_2$  utilizado para enriquecer el cultivo.



2.35 Gráfico comparativo de temperaturas tras la inyección en uno de los modelos de un enriquecido de  $\text{CO}_2$ .



*Conclusiones parciales*

Los ensayos comparativos han destacado factores fundamentales a considerar durante el proceso de diseño de un prototipo de instalación. El primero y más fundamental es que el  $\text{CO}_2$  cobra un papel esencial en el cultivo de microalgas y su adecuada concentración puede incrementar la eficiencia de las posibles aplicaciones. La temperatura es otro factor esencial ya que para obtener la mayor productividad hay que mantenerla por debajo de los  $25^\circ\text{C}$ . Finalmente cabe destacar que el espesor del panel fotobiorreactor tiene una gran influencia en el resultado visual final, por lo que esta sería otra variable a estudiar durante la fase de diseño.

CONCLUSIONES ENSAYOS COMPARATIVOS					
Condiciones		Ensayo	Objetivos	Resultados	Repercusión Arquitectónica
T°ext	26,5°C	TEMPERATURA	Comprobar la viabilidad del sistema para la producción de ACS comparando un modelo que contiene agua y otro que contiene microalgas.	Mezcla de microalgas: Aumento de 0,5°C  Mezcla con microalgas y enriquecido de CO <sub>2</sub> : Aumento de 1,5°C	El sistema sirve para producción de agua caliente hasta 30°C, o como precalentamiento de ACS a alta temperatura.
T°algas	24,5°C				
Inten. luminica	15.000 lux	OPACIDAD	Comprobar si el espesor del panel es un elemento determinante a la hora del paso de intensidad luminica a	Con espesores de en torno a 10 cm el panel se vuelve opaco mientras que con espesores menores de 2 cm deja pasar el	En climas de alta radiación solar se puede incorporar espesores mayores que sombreen más mientras que en climas de baja radiación es más interesante espesores con una mayor transparencia.
		CO <sub>2</sub>	Comprobar la diferencia de concentración de CO en dos locales de similares características. En uno de ellos se sitúan los modelos de microalgas que captan el CO <sub>2</sub> del ambiente a través de la bomba de aire.	La concentración de CO <sub>2</sub> en el local con microalgas es de alrededor de 150 ppm inferior durante	
Radiación PAR	62 W/m <sup>2</sup> 285 μmol/m <sup>2</sup> s				Parte de CO <sub>2</sub> que se inyecta en los paneles puede provenir de rejillas de extracción de locales interiores, mejorando así la calidad del aire de estos. Por ejemplo, utilizando las rejillas de extracción del garaje.

2.36 Tabla de conclusiones parciales de los ensayos comparativos realizados.

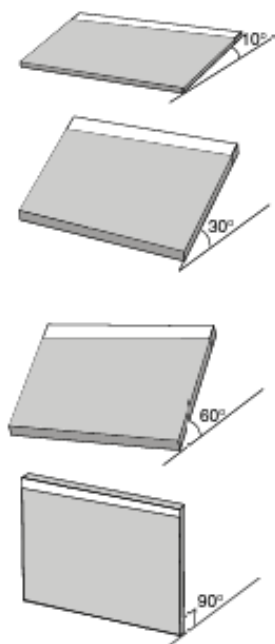


### 3 DISEÑO DE UN SISTEMA ARQUITECTÓNICO

#### 3.1 RECOPIACIÓN DE DATOS

La tercera parte de este trabajo se centra en el desarrollo de un sistema arquitectónico integrando los paneles fotobiorreactores en el edificio, a partir de las conclusiones obtenidas en la fase de investigación y en la fase de experimentación. Dado que la efectividad del sistema es completamente dependiente de las condiciones climáticas, temperatura e irradiancia, se ha optado por diseñar dos sistemas uno para climas fríos basado en el estudio de caso BIQ House y otro para climas cálidos basado en el clima mediterráneo de la Península Ibérica.

Antes de comenzar la descripción del sistema arquitectónico, se enumeran las principales conclusiones que se han desarrollado durante la fase de experimentación que son determinantes a la hora de diseñar un prototipo de fachada.



3.1 Óptima inclinación de los fotobiorreactores. Arriba: verano, abajo: invierno.

#### Factores debidos a la investigación

##### Fotosíntesis

Las posibles aplicaciones arquitectónicas de las microalgas tienen su base en el proceso de fotosíntesis. A través de este proceso se obtiene la biomasa y se genera el calor necesario para la producción de ACS. Más de un 60% de la radiación absorbida por el cultivo puede ser disipada en forma de calor<sup>10</sup>. La eficacia de esta conversión reside en el control de los valores climáticos de temperatura e irradiancia, ya que a valores excesivos de estos se produce la fotoinhibición y muerte celular de las microalgas. A la hora del diseño es fundamental tener en cuenta que no hay un sistema único para todos los climas si no que las envolventes se adaptan buscando las mejores condiciones para un óptimo desarrollo del sistema.

Diferentes estudios<sup>11</sup> muestran que la mayor tasa fotosintética se alcanza en invierno con inclinaciones de los fotobiorreactores de 60° y en verano con inclinaciones de entre 10 y 30° (figura 3.1). Esto es fundamental en climas fríos donde se necesita la entrada de radiación directa, mientras que en climas cálidos lo ideal es mantener los paneles en vertical y sombreados para que la entrada de radiación solar sea solamente difusa, y no directa.

10. Véase RICHMOND, Amos; Hu, Qiang. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. Chichester: Wiley, 2013; página 33.

11. Véase SHING, Bharat P. *Biofuel Crops: Production, Physiology and Genetics*. Wallingford: CABI, 2013; página 95.

### *Sombreamiento*

Al contrario de lo que se creía al comienzo de esta investigación, un mayor impacto de la radiación solar sobre el panel no significa un aumento de la densidad celular, y por tanto de la opacidad y la capacidad de sombreadamiento. En cuanto a la variable de la opacidad, se ha investigado que la baja intensidad lumínica aumenta la clorofila mientras que la alta intensidad lumínica disminuye la clorofila. Al contrario de lo que se creía en un primer momento tras el estudio de la BIQ House donde afirman la capacidad de los paneles fotobiorreactores como elementos para crear sombra. Cuanta mayor radiación mayor es la actividad fotosintética, pero cuando la irradiancia supera la óptima la pigmentación se reduce.

Se concluye que un panel fotobiorreactor de microalgas no va a disminuir la entrada de radiación solar cuando esta sea elevada, sino que ocurre al contrario. De todas formas, el panel nunca va a ser un elemento completamente transparente -mientras que no se produzca fotoinhibición- por lo que siempre va a tener una cierta capacidad de sombreadamiento (figura 3.2).

### *Crecimiento de las microalgas*

El  $\text{CO}_2$  es el nutriente primario de estos organismos. Al contrario que en el resto de plantas, el  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera es insuficiente para el óptimo crecimiento de los organismos, por lo que se tiene que enriquecer. La atmósfera contiene solo 0,039% de  $\text{CO}_2$  por lo que normalmente para un crecimiento rápido se enriquece al 1-5%. Un valor añadido en el diseño con microalgas es que el  $\text{CO}_2$  provenga de áreas industriales o zonas urbanas densamente pobladas donde haya una excesiva contaminación, para así mejorar la calidad del aire a la vez que se genera biomasa. Dentro de un mismo edificio el dióxido de carbono necesario se puede obtener de la combustión de la caldera, como ocurre en la BIQ House, o de la combustión producida por los vehículos en el garaje.

El siguiente componente más importante es el nitrógeno que se suministra en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) que se suministra junto al fósforo. Se ha estudiado como estos nutrientes pueden provenir de las aguas residuales para poder crear un ciclo cerrado y sostenible.

### *Materiales*

Otro factor esencial a considerar son los materiales empleados para el diseño de los paneles fotobiorreactores. En cuanto a los paneles, se contempla su fabricación de vidrio o algún tipo de plástico. Los vidrios inteligentes que regulan la radiación incidente favorecerían el correcto funcionamiento del sistema en climas cálidos. Una alternativa sostenible al vidrio sería el EFTE, material empleado por los arquitectos EcoLogicStudio en sus pabellones con microalgas (figura 3.3).

En cuanto a los materiales complementarios que sellan los paneles y están en contacto directo con las microalgas, se debe tener en cuenta la posi-



3.2 Fotografía de los paneles fotobiorreactores de la BIQ House. Se aprecia la sombra que generan.



3.3 Urban Algae Folly, proyecto de EcoLogicStudio para EXPOMILAN 2015. Los paneles están fabricados con EFTE.

ble corrosión de estos al interactuar en procesos químicos con las microalgas y sus nutrientes. En el proyecto BIQ House las carpinterías de aluminio tuvieron que ser remplazadas por otras de PVC debido a la corrosión que se producía en determinadas áreas con pH elevado.

Otro problema de corrosión es el generado por los nitratos que sirven como sustrato de nutrientes para las microalgas. El contacto de estos compuestos con estructuras de hormigón puede producir daños y su paulatina destrucción. Por ello se considera necesario evitar que los paneles entren en contacto con el forjado o estructura del edificio, ya que en caso de que haya fugas el medio de cultivo de las microalgas puede causar daños en los elementos metálicos y de hormigón.

### Factores debidos a la experimentación

#### *Orientación de los paneles fotobiorreactores*

Durante la fase de experimentación se constató que la orientación sur resultó ser desfavorable para las microalgas, ya que la excesiva radiación da lugar al proceso de fotoinhibición, en el que las células pierden su pigmentación y paulatinamente mueren. Por ello, se ha destacado que en climas cálidos hay que controlar estas variables, ya sea poniendo los fotobiorreactores en fachadas más favorables como la norte donde la radiación incidente es siempre difusa, o usando vidrios inteligentes que eliminan parte de la radiación solar. En ningún caso el cultivo debe estar sometido a más de  $326 \text{ W/m}^2$  o  $1.500 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$  de radiación PAR lo que provocaría el proceso de fotoinhibición.

En zonas como Madrid fácilmente se alcanzan  $1.500 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$  durante las horas centrales del día en épocas de altas temperaturas. En estos casos el panel debe estar protegido con algún elemento que absorba parte de la radiación directa incidente.

#### *Forma de los fotobiorreactores*

A la hora de proponer un diseño de envolvente, la forma de los paneles fotobiorreactores es determinante para conseguir una productividad mayor. Como se ha visto en el capítulo dedicado al cultivo de microalgas, hay dos tipos de fotobiorreactores: planos o tubulares. Los planos han sido utilizados en la BIQ House y se corresponden mejor al concepto de envolvente. En el estudio de opacidades se ha experimentado como un panel plano de 1,7 cm de espesor actúa como un elemento translúcido mientras que un fotobiorreactor tubular (como una botella) actúa como un elemento opaco.

Por ello para fabricar una envolvente es preferible el uso de fotobiorreactores planos, aunque los tubulares se podrían aplicar a diseños de tipo celosía.



3.4 Fotografía de detalle de un fotobiorreactor del edi

### *Producción de agua caliente sanitaria*

El uso de los paneles fotobiorreactores como colectores solares fotosintéticos es limitado ya que su temperatura óptima ronda los 25°C, y como se ha visto durante los experimentos, no debe sobrepasar los 30°C nunca o se produce daño en las células por fotoinhibición. Aun así, se comprueba su viabilidad como instalación para precalentar agua que pueda servir para sistemas de calefacción a baja temperatura, como los suelos radiantes, por los que el agua circula entre 30 y 45°C.

En los climas fríos de baja radiación solar o durante los momentos del año cuando la radiación es más limitada, unos niveles altos de CO<sub>2</sub> pueden ayudar a que la transformación de radiación solar en calor se produzca en mayor cantidad. En la fase de experimentación se comprobó que la temperatura de un panel con medio de cultivo de microalgas era 0,5°C superior a la de un panel con solamente agua. No obstante, si las microalgas se enriquecen con CO<sub>2</sub> esta diferencia se eleva a 1,5°C.

### *Los nutrientes y su circulación*

La falta de nutrientes también tiene consecuencias letales para los microorganismos. Por ello es importante mantener un flujo constante de nutrientes, tanto de CO<sub>2</sub> como de nitrógeno y fósforo. La obtención de estos nutrientes de manera económica sin grandes aportes de energía es fundamental para que el conjunto del sistema funcione de manera sostenible. Además, la entrada de estos elementos en el medio de cultivo, se debe hacer a una presión constante que mantenga las partículas en circulación dentro del fotobiorreactor, pero cuyo burbujeo no sea excesivo y las desestabilice produciendo daños en sus células.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A continuación, se procede a describir y enumerar los elementos que formarían parte de una instalación con paneles fotobiorreactores. Se van a explicar una serie de elementos de forma genérica, teniendo en cuenta que algunas de sus características deben variar en función del clima, adaptándose a este.

#### Elementos de la instalación

##### *Paneles fotobiorreactores*

Se decide optar por paneles biorreactores planos verticales como los que utiliza la BIQ House para su fachada. En cuanto al diseño del panel, hay que prestar especial atención al espesor y la inclinación. El espesor determina la relación área/volumen y la longitud de la trayectoria de la luz. Cuanto más estrecho sea el fotobiorreactor se conseguirá con más éxito el crecimiento óptimo de las microalgas<sup>12</sup>. Pero se deben tener en cuenta las problemáticas debidas al poco espesor como son la predisposición a la fotoinhibición y a los cambios de temperatura.

A la hora de integrar los paneles fotobiorreactores en el diseño arquitectónico se propone partir de un espesor base óptimo de 1,7 cm, que es el utilizado en edificio BIQ House. A partir de ahí este espesor puede aumentar según el clima o las necesidades funcionales. En un clima cálido un aumento de espesor puede conseguir un mayor sombreado en las áreas interiores mientras que en un clima frío un espesor mínimo permite una máxima entrada de luz. En función de los usos, un panel semitransparente puede funcionar como un vidrio tintado mientras que un panel opaco puede funcionar como un paramento de fachada.

El ángulo de inclinación se relaciona con la luz incidente en el panel. Se ha demostrado que la máxima productividad –en cuanto a producción de biomasa y por ello capacidad fotosintética– se logra con inclinaciones de 10-30° en verano y 60° en invierno. Esto es viable en climas fríos donde la radiación solar es escasa y se debe aprovechar su captación directa al máximo. En un clima cálido, como el mediterráneo, resulta más conveniente la utilización de paneles verticales con elemento horizontal de protección donde la entrada de radiación es mayoritariamente difusa y reflejada.

En cuanto a su materialidad, el panel está formado por dos láminas entre las cuales discurre el medio de cultivo con las microalgas. En el proyecto BIQ House los arquitectos optan por un vidrio de seguridad laminado, un sistema que funciona en climas fríos como el alemán, aunque para climas cálidos se podría optar por un vidrio que sólo absorba la radiación visible es decir, las longitudes de onda entre 400 nm y 700 nm. La radiación visible es aproximadamente el 40% de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, siendo el 58% radiación infrarroja y el 2% restante radiación ultravioleta y gamma. Además la luz visible se corresponde con las longitu-



3.5 Fotografía de los paneles de la BIQ House antes de ser colocados en el edificio.

12. Véase CONTRERAS FLORES, Coral; PEÑA CASTRO, Julián Mario; FLORES COTERA, Luis Bernardo; CAÑIZARES VILLANUEVA, Rosa Olivia. 'Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas'. *Interciencia* (Caracas), volúmen 28, número 8, Agosto 2003, páginas 450-456.



des de onda de la radiación PAR, que es la que usan las plantas para realizar la fotosíntesis. Las longitudes de onda de la radiación visible sólo aportan luz y no calor, por lo que evitando la entrada de la luz infrarroja y ultravioleta se evita un sobrecalentamiento del medio de cultivo situado entre los dos paneles de vidrio.

Actualmente en el mercado no se encuentran vidrios que bloqueen el paso del calor, aunque el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, en Estados Unidos, está desarrollando un vidrio que puede modular la luz solar y los infrarrojos en respuesta a un determinado voltaje<sup>13</sup>. Esto se debe a que el vidrio está compuesto por nanocristales de óxido de indio-estaño y la matriz vítrea (figura 3.6). Los nanocristales absorben la radiación solar infrarroja y la matriz vítrea atrae la radiación solar visible. Se calcula que este vidrio podría absorber hasta el 50% del calor que penetra a través de él.



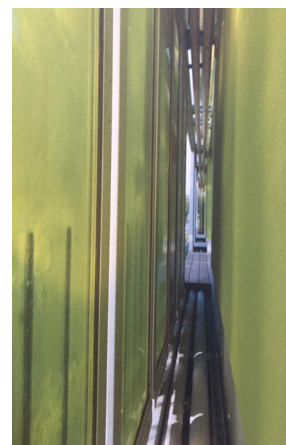
3.6 Fotografía del cristal diseñado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley en 2013.

#### *Sistema de conducción de CO<sub>2</sub> y nutrientes*

La entrada de aire en el biorreactor es fundamental para conseguir una buena agitación del medio de cultivo y una óptima eficiencia. Una agitación insuficiente puede conllevar a que no todas las células tengan acceso a los nutrientes y la luz, creando zonas donde el cultivo es desfavorable. Por el otro lado, una velocidad excesiva puede dañar las células de las microalgas. Para la introducción del mezclado y el aire comprimido se debe utilizar un sistema que no cause daño mecánico a las células, por ello se utiliza un sistema de columnas burbujeantes o airlift. El rango normal de velocidad en el medio de cultivo suele estar entre 0,25 y 0,35 m/s. La velocidad del medio de cultivo tiene que ser suficiente para evitar un flujo turbulento que evite el crecimiento en la pared tubo y que asegure un régimen de iluminación favorable para la realización de la fotosíntesis.

Al igual que se produce en la BIQ House, se distinguen los tubos que llegan a los paneles biorreactores entre aquellos que portan el medio de cultivo y aquellos que suministran el aire comprimido (figura 3.7). Para el primero, hay que tener en cuenta que hay una entrada y una salida de medio –el cual se utilizará para la producción de ACS y biomasa.

Los nutrientes principales de las microalgas son el CO<sub>2</sub> y el nitrógeno y fosforo. Para asegurar un diseño óptimo, cerrado y sostenible se ha optado por obtener el medio de cultivo de las aguas residuales, que son ricas en nitrógeno y fósforo, y el CO<sub>2</sub> de la combustión de combustibles fósiles.



3.7 Fotografía de las tuberías que suministran nutrientes a la fachada BIQ. Se sitúan en una cámara de aire entre los paneles y el cerramiento convencional.

#### *Intercambiador de calor y producción de ACS*

A través de los ensayos experimentales se ha determinado que la temperatura óptima de crecimiento de las microalgas no puede superar los 30°C. Para la producción de ACS y calefacción, los paneles biorreactores funcionan igual que si se tratasen de colectores solares. En este caso el fluido caloportador se trata del medio de cultivo a 25°C y se transforma en agua caliente a través de un intercambiador de calor. El medio de cultivo enfriado

12. Véase <http://www.lavanguardia.com/ciencia/20130918/54385691174/vidrio-inteligente-laboratorio-berkeley.html>. Consultado el 26 de Mayo de 2017.



posteriormente vuelve a través de los montantes y conductos a los paneles biorreactores, como ocurre en la BIQ House.

Gracias a este proceso se consigue agua caliente alrededor de 250°C la cual podría servir como precalentamiento de ACS en verano y de calefacción con suelo radiante en invierno, ya que la temperatura del suelo debe oscilar entre 23-29°C a lo largo del invierno, y la temperatura del agua que circula en este entre 30 y 45°C.

El sistema de producción de ACS funcionaría de la misma manera que en la BIQ House, progresivamente se retira medio de cultivo de los paneles fotobiorreactores que pasan a través de un intercambiador de calor, calentando el fluido frío hasta los 25°C del medio de cultivo. Una vez enfriado, el medio de cultivo vuelve a los paneles fotobiorreactores a una temperatura inferior manteniendo así la temperatura global de la mezcla de la fachada fotobiorreactora por debajo de los 25°C.

#### *Acumulación de calor*

El principal problema de estos sistemas, tanto de los colectores solares como los paneles biorreactores, es que generalmente cuanto mayor es la necesidad de calefacción, menor es el aporte solar. Por ello se debe almacenar el calor generado para una futura utilización. En el proyecto BIQ House el calor es almacenado en unas sondas geotérmicas que forman parte de una central energética sostenible que da servicio al barrio en el que se sitúa<sup>13</sup>.

Para una instalación que no disponga de un espacio de almacenamiento externo se pueden seguir los mismos procesos de acumulación de calor que se utilizan en una instalación de colectores solares. Se contará con un depósito acumulador de los paneles biorreactores desde el cual el agua precalentada pasará a otro depósito que se calentará desde la temperatura alcanzada por los paneles a la temperatura necesaria para el consumo.

#### *Producción de biomasa*

Los paneles fotobiorreactores se pueden emplear tanto como para la producción de agua caliente sanitaria como para la producción de biomasa. La biomasa producida por las microalgas se puede utilizar para la obtención de biocombustibles empleados en la caldera del edificio. Según la Comisión Europea para las energías renovables<sup>14</sup>, sustituir los combustibles fósiles por biocombustibles puede reducir las emisiones de gases invernaderos en un 60%.

Se propone utilizar calderas de biocombustibles de tercera generación (provenientes de las algas) para la generación de agua caliente sanitaria a alta temperatura. Ya que se ha comprobado que la capacidad de las microalgas de producir agua caliente es limitada por su temperatura, la biomasa es una opción factible para alcanzar las altas temperaturas que requieren los consumos diarios. El principal inconveniente de este sistema es que la conversión de biomasa en biogás debe realizarse fuera del edificio, con lo cual

13. Se trata de una central energética que forma parte del IBA Hamburg, que conecta varios sistemas de producción de energía de diferentes edificios, formando una central térmica «virtual». Véase <http://www.iba-hamburg.de/en/projects/energieverbund-wilhelmsburg-mitte/projekt/integrated-energy-network-wilhelmsburg-central.html>. Consultado el 09 de Junio de 2017.

14. Véase <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive>. Consultado el 09 de Junio de 2017.

se debería estudiar si el impacto ambiental de la huella energética y de transporte para la fabricación del biocombustible hace sostenible el método.

#### *Obtención de CO<sub>2</sub>*

El dióxido de carbono es el nutriente esencial de las microalgas para poder realizar la fotosíntesis y así el proceso de transformación de energía en calor. Como ocurre en la BIQ House, el método más cómodo e inmediato para obtener este nutriente es a través de los gases generados y expulsados por la caldera, evitando así las emisiones al medio ambiente. Otra fuente de CO<sub>2</sub> viable es a través de los conductos de extracción de los garajes, donde se puede aprovechar el aire proveniente de los combustibles fósiles.

En ambos casos el mismo biodiesel que se obtiene a partir de la biomasa microalgal es el propio combustible fósil, por lo que se cierra el circuito. Hay que tener en cuenta que si el CO<sub>2</sub> se obtiene de estas fuentes, normalmente están a altas temperaturas por lo que sería necesario un sistema de enfriamiento de los gases calientes antes de inyectarlos en el sistema.

#### *Obtención del nutrientes*

Los otros nutrientes principales son el fósforo y nitrógeno, que se pueden encontrar en altas cantidades en las aguas residuales. El nitrógeno conforma el 7% de la biomasa de estos microorganismos, y se puede encontrar en primera fase como amonio y posteriormente en forma de nitritos y nitratos. El fosfato corresponde al 1% de la materia de la biomasa, y se encuentra en forma de ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. Los dos elementos son nocivos para la salud y medio ambiente, por lo que se produce el mismo proceso que con el CO<sub>2</sub>, las microalgas eliminan las toxinas y posteriormente esa agua estaría disponible para su utilización.

Al igual que ocurre con la obtención de CO<sub>2</sub> de combustibles fósiles industriales o urbanos, la obtención de nutrientes a partir de las aguas residuales ayuda a mejorar la sostenibilidad del ecosistema. De hecho, la utilización de microalgas para tratamiento de aguas residuales es una de las principales aplicaciones que se están investigando en la actualidad. Se podría incorporar el uso de tratamiento de aguas residuales a los fotobiorreactores funcionando así como una pretratamiento de las aguas generadas en el edificio.

#### **Esquema de principio**

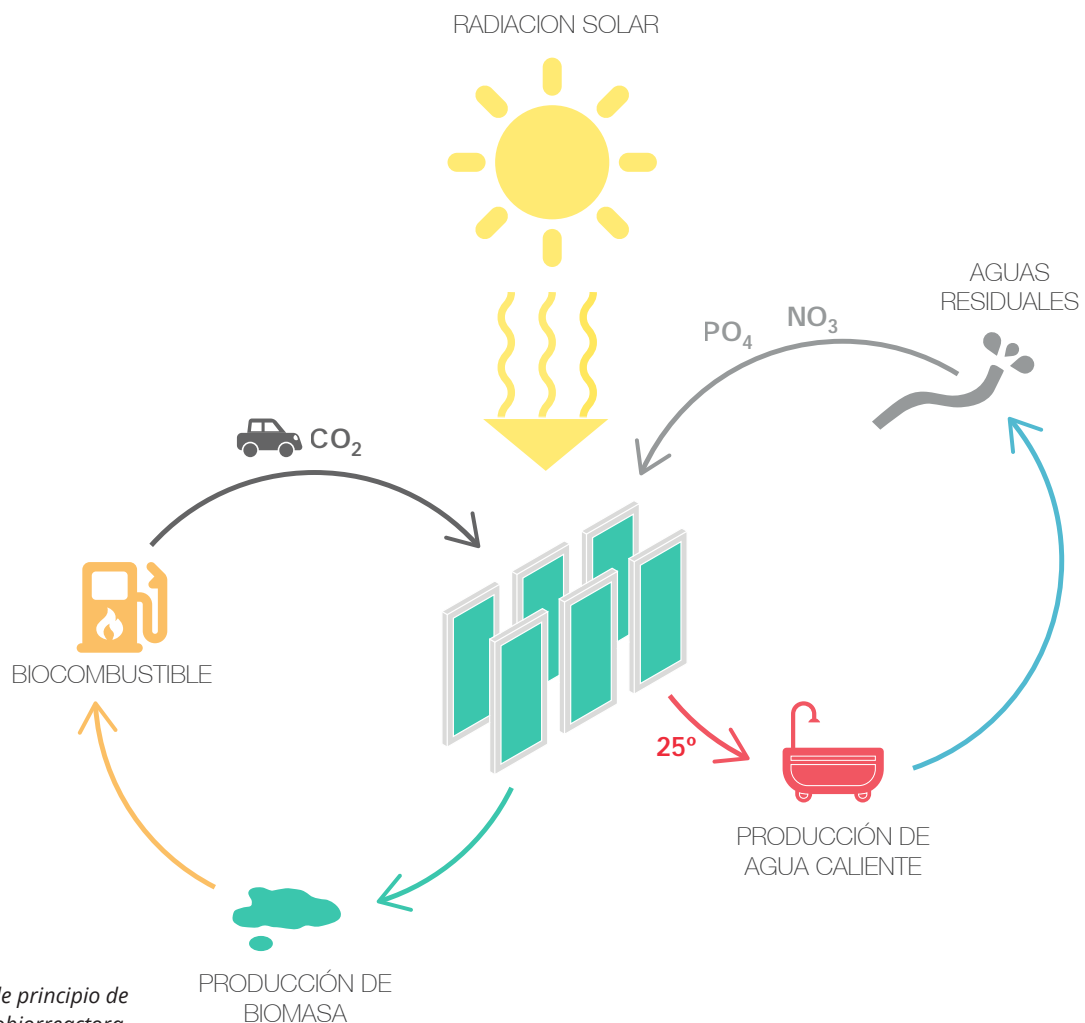
Una vez descritos los principales elementos de la instalación, se pasa al diseño del esquema de principio de funcionamiento de la fachada. Se ha intentado diseñar un sistema cerrado, sostenible y autosuficiente, en el que la fachada genera la energía que posteriormente consume el edificio (figura 3.8).

El punto de partida del sistema es el sol, que proporciona a la fachada la energía necesaria para posteriormente transformarla en calor o biomasa. Esto se consigue gracias a las microalgas que se cultivan en los paneles fo-

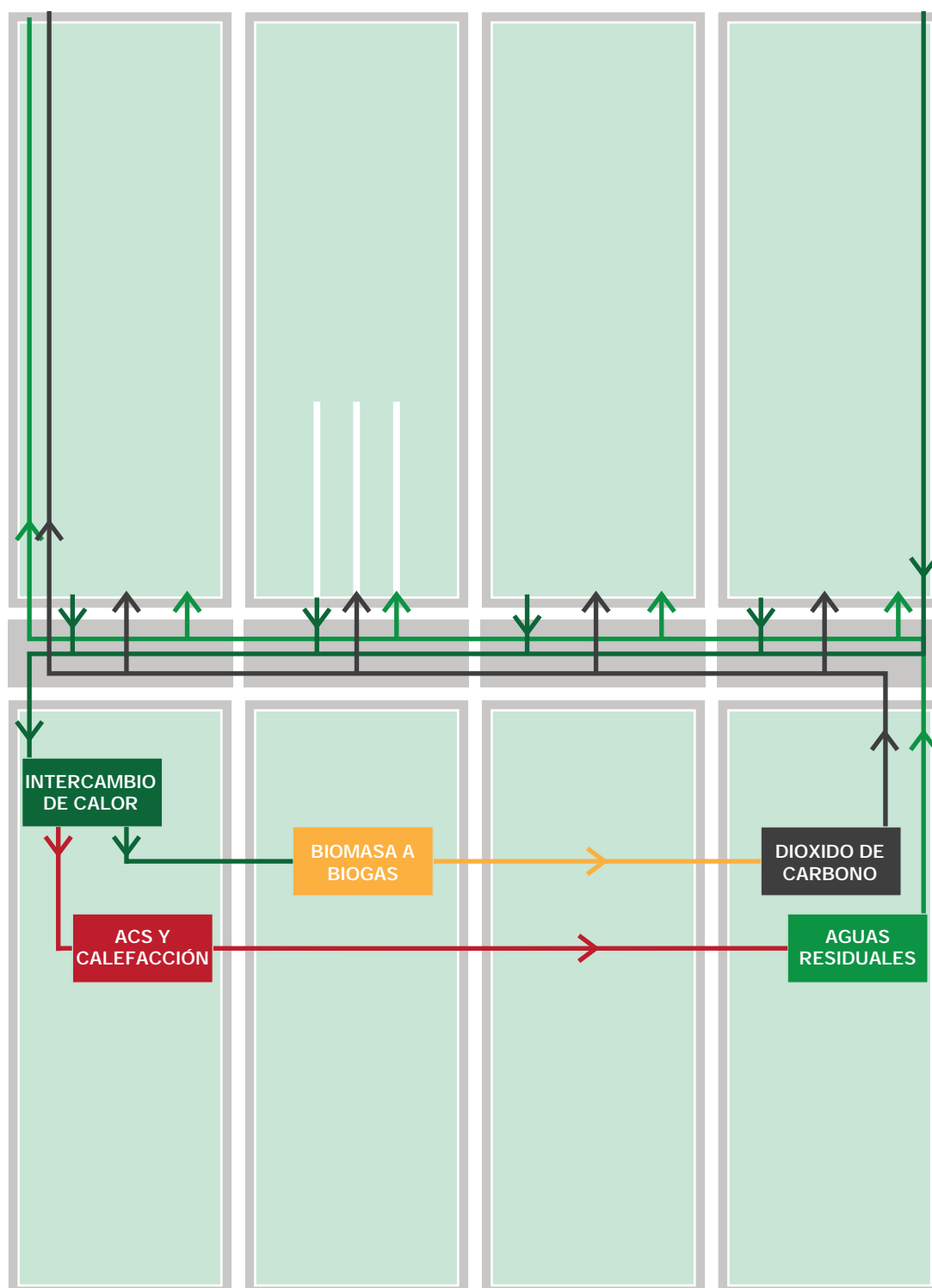
tobiorreactores de la fachada. De esta fachada surgen dos ciclos de producción de energía cuyo único punto en común son las microalgas.

El primero de estos ciclos es el de agua caliente sanitaria. La fachada biorreactora capta la radiación solar y la disipa en forma de calor, calentando así el fluido del medio de cultivo. Posteriormente se produce un intercambio de calor entre el medio de cultivo y el agua que se utilizará como agua caliente sanitaria a baja temperatura, o como pre-calentamiento de agua caliente sanitaria a alta temperatura. Una vez que este agua ya ha recorrido el edificio y ha sido usada, vuelve a los paneles fotobiorreactores a modo de aguas residuales, proporcionando los nutrientes de fósforo y nitrógeno que necesita el cultivo.

El otro ciclo de la fachada es el de producción de biomasa. A través del proceso de fotosíntesis las microalgas transforman absorben  $\text{CO}_2$  y radiación solar para transformarlos en biomasa. Por su alto contenido en lípidos esta biomasa resulta ideal para la fabricación de biocombustibles, que se pueden utilizar para la caldera del edificio o para combustible de los vehículos de los usuarios del edificio -siempre que no quepa la posibilidad de que estos sean eléctricos y ecológicos. A través de la combustión del biogas de la caldera se obtiene el  $\text{CO}_2$  necesario para alimentar la fachada y así cerrar una vez más el ciclo.



3.8 Esquema de principio de la fachada fotobiorreactora.



3.9 Esquema de la entrada y salida de nutrientes de la fachada fotobiorreactora.

### 3.3 DISEÑO DEL SISTEMA

#### **Climas fríos de baja radiación**

En este primer apartado se analizan posibles mejoras para la implantación de fachadas fotobiorreactoras en climas fríos tomando como base el caso de estudio de la BIQ House. Aunque durante sus dos primeros años de vida el proyecto ha sido rentable energéticamente –produciendo más energía de la que consumía el mantenimiento del sistema–, el proyecto ahora se plantea retos para mejorar su rendimiento desde el punto de vista de producción de agua caliente sanitaria y biomasa. En esta parte del trabajo se pretenden dar unas pequeñas pinceladas sobre posibles mejoras a partir de lo aprendido durante las fases de investigación y experimentación.

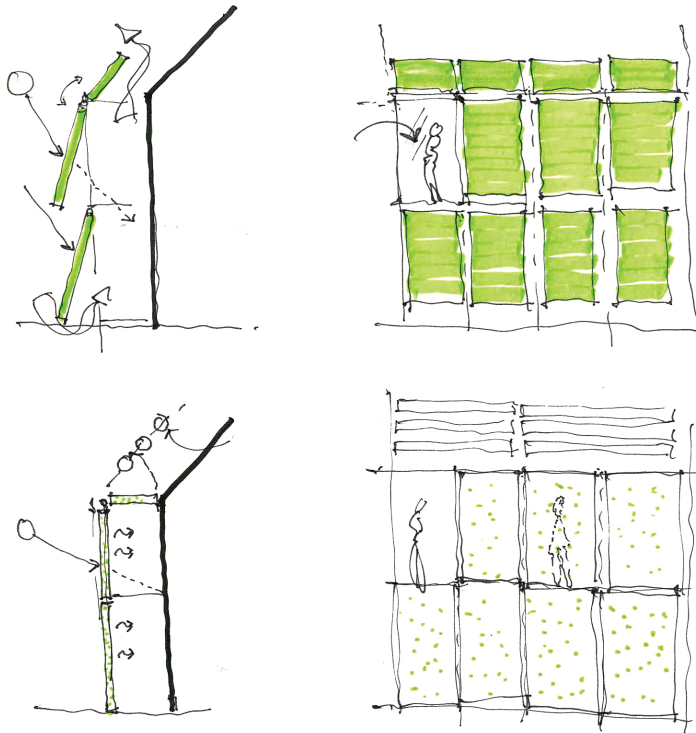
La principal desventaja de los climas fríos para el cultivo de microalgas es la poca disponibilidad de radiación solar durante una gran parte del año. En los climas centro europeos, el cielo está completamente cubierto durante el 50% del año, siendo el porcentaje del cielo completamente claro un escaso 10%. Esto hace que la mayor parte del tiempo la radiación incidente sea difusa, a través de las nubes, y no directa, por lo que resulta menos efectivo el cultivo. Esto no significa que el sistema no se pueda poner en funcionamiento en este tipo de climas, ya que en Hamburgo se ha implementado exitosamente consiguiendo una tasa de conversión de energía en calor del 25% y de energía en biomasa del 4,4% –siendo 10% la tasa máxima en la actualidad.

Una ventaja que presentan estos climas es que la baja irradiancia, intermitente captación solar y baja temperatura favorece que no aparezca el proceso de fotoinhibición. Esto ayuda a mantener el sistema de forma estable y poder generar biomasa y calor durante todo el año, sin que las altas temperaturas desestabilicen el cultivo.

#### *Diseño aplicado al clima*

Se cree que una de las posibles maneras para mejorar la eficiencia de los paneles fotobiorreactores de la BIQ House sería mediante la inclinación de estos. Una orientación de 60° de los paneles sería idónea para conseguir la máxima captación de radiación directa durante el invierno, la época más crítica de oferta y con más demanda de agua caliente en estos climas. Así se conseguiría aproximadamente la misma cantidad de energía transformada en calor y biomasa durante todo el año.

El estudio de arquitectura SPLITTERWERK ya realizó diseños de una fachada fotobiorreactora durante las primeras fases de diseño del proyecto, que más tarde se descartaron (figura 3.10). Volver a este planteamiento inicial podría maximizar la producción de biomasa y agua caliente.

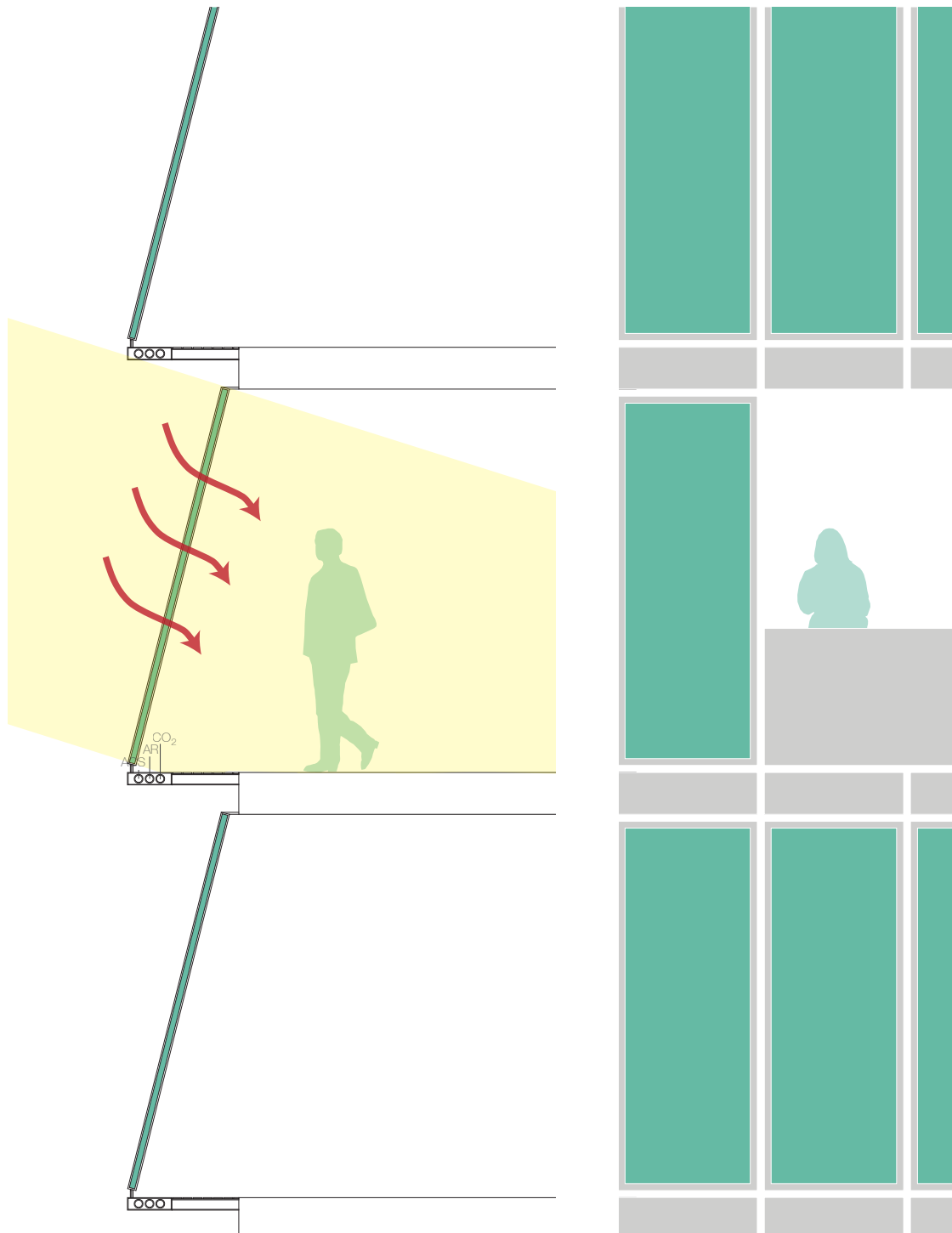


3.10 Estudio de la inclinación de los paneles fotobiorreactores de la BIQ House. Realizado por el estudio de arquitectura SPLITTERWERK durante la fase de proyecto.

El diseño propuesto en ese trabajo para este tipo de climas fríos de baja radiación, contempla la inclinación de los paneles en 60° pero a diferencia de la propuesta de SPLITTERWERK, los paneles no son la segunda piel del edificio sino la única envolvente. El objetivo de esto es conseguir que la radiación solar penetre directamente en el edificio, causando un efecto invernadero en su interior. Se utiliza un vidrio de baja emisividad para reducir las pérdidas de calor en el interior del local, incrementando el aislamiento con la cavidad rellena de microalgas. Se propone que el paramento de paneles fotobiorreactores sea continuo en toda la fachada, dejando algunos huecos donde se abren terrazas al exterior, al igual que ocurre en la BIQ House. Las mejores orientaciones para situar los paneles fotobiorreactores son las sureste y suroeste, ya que al estar el sol más bajo durante las primeras y últimas horas del día se puede conseguir una mayor captación en la fachada inclinada.

Otra diferencia respecto a la BIQ House es que se propone que los tubos que transportan los nutrientes no estén al aire libre sino protegidos y recubiertos con un paramento aislante para que durante las épocas de heladas no se produzca el congelamiento de las tuberías.





3.11 Sección (izq.) y alzado (der.) de la fachada fotobiorreactora para climas fríos de baja radiación. Escala 1:100.

### **Climas cálidos de alta radiación**

En este apartado se analiza detalladamente la aplicación del sistema a un clima templado-cálido como puede ser el mediterráneo que encontramos en la Península Ibérica. Este clima está caracterizado por una diferencia muy marcada entre las estaciones de invierno y verano, debido a la que la altura solar varía mucho a lo largo del año. Este clima se caracteriza por temperaturas medias anuales de entorno a los 18°C, aunque en verano pueden superar los 35°C. Por ello el tener disponibilidad de protección solar se convierte en una necesidad absoluta en los meses de primavera verano.

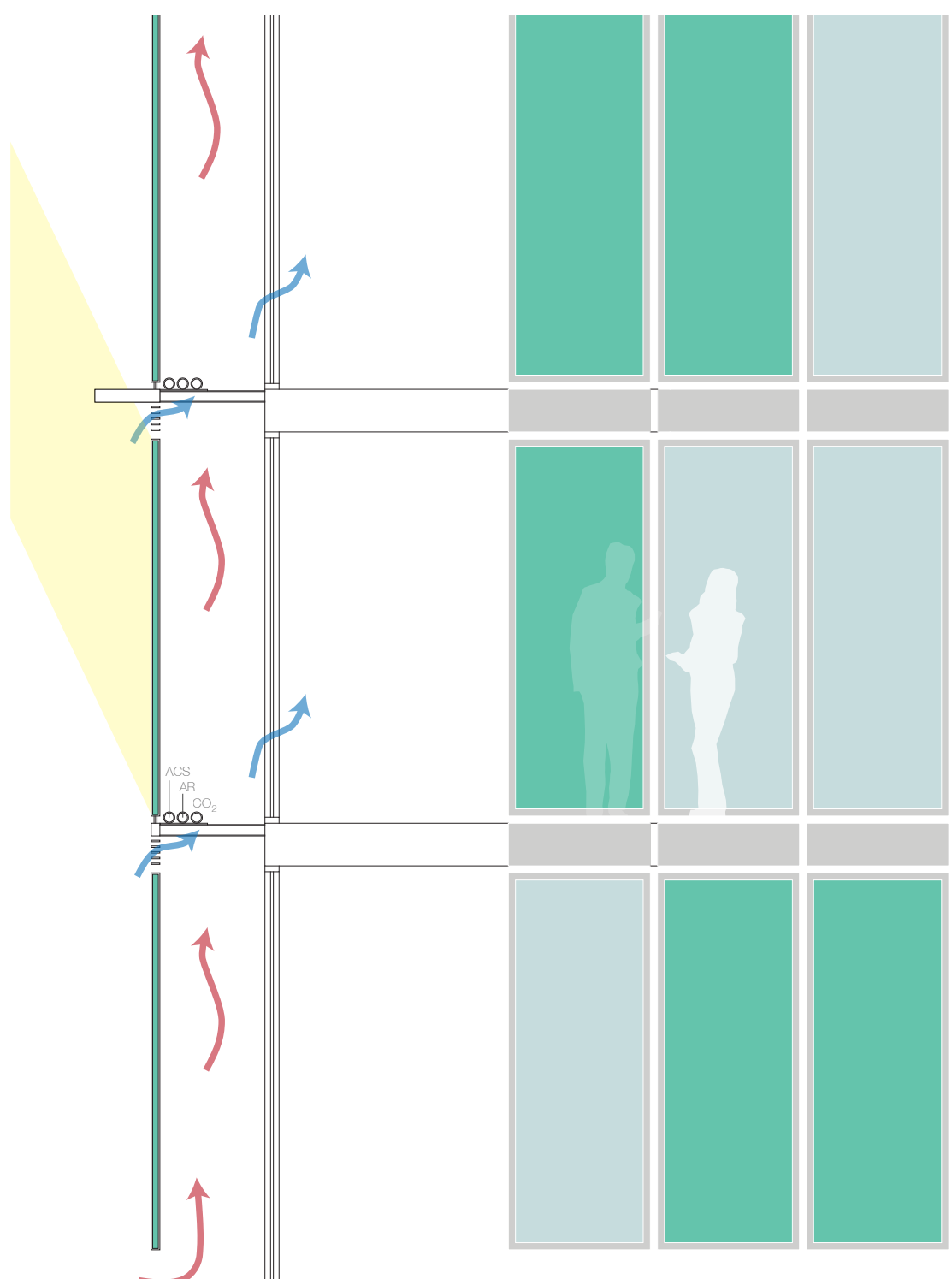
En cuanto a la irradiancia, en la mayor parte de la península ibérica se cuenta con una irradiancia directa media anual de 3,75 kWh/m<sup>2</sup>día. La radiación PAR es intensa y en las horas centrales del día en épocas de verano puede alcanzar los 2.000 μmol/m<sup>2</sup>s o 435 W/m<sup>2</sup>.

#### *Diseño aplicado al clima*

La excesiva temperatura e irradiancia que puede resultar perjudicial para las microalgas se plantea resolver mediante vidrios que permitan únicamente el paso de la luz visible bloqueando la radiación infrarroja. Esto no tendría consecuencias negativas para la producción de biomasa ya que la radiación PAR, que es la única que se utiliza en el proceso de fotosíntesis, está dentro de las longitudes de onda del espectro visible. En cuanto a la producción de agua caliente no se puede afirmar con certeza su viabilidad utilizando un vidrio que bloquee la luz infrarroja. Se tienen indicios de que esto podría ser posible, ya que durante la realización de los experimentos de medición de temperatura, la temperatura del fluido con microalgas resultó más alta que la del agua siendo iluminadas por una bombilla LED blanca (que no emite calor).

Otro de los condicionantes es la inclinación del panel fotobiorreactor que debe ser vertical para evitar al máximo (sobre todo en la época de verano), la radiación solar directa sobre las algas. Se pueden añadir unos elementos de sombreado del panel en fachadas a sur para minimizar así también la entrada de radiación directa. La otra fachada idónea para situar los paneles fotobiorreactores en este clima sería la norte, ya que solo recibe radiación difusa. Además para mantener la temperatura del medio de cultivo por debajo de los 25°C se debe incorporar medio de cultivo fresco continuamente a una temperatura inferior.

La fachada fotobiorreactora en estos climas se plantea como una doble piel ventilada continua, donde puntualmente se cambian los paneles fotobiorreactores por vidrios que dejen mirar al exterior. Se introducen voladizos que atenúan la radiación difusa en las fachadas sur a favor de la difusa.



3.12 Sección (izq.) y alzado (der.) de la fachada fotobiorreactora para climas cálidos de alta radiación. Escala 1:100.

A continuación se muestran cuadros resumen con las principales diferencias de diseño de fachadas fotobiorreactoras según el clima (figura 3.13), y comparando la eficiencia energética del sistema en los diferentes climas con los sistemas tradicionales.

	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DEL DISEÑO DE LA FACHADA	
	CLIMA FRÍO BAJA RADIACIÓN Radiación global anual: 559 kWh/m <sup>2</sup>	CLIMA CÁLIDO ALTA RADIACIÓN Radiación global anual <sup>15</sup> : 1368 kWh/m <sup>2</sup>
PANELES	Orientación paneles sureste y suroeste. Inclinación paneles hasta 60° para conseguir una mayor captación directa.	Orientación paneles norte y sur. Paneles verticales y un elemento de sombreamiento para evitar la radiación directa.
MATERIALES	Material del panel: vidrio bajo emisivo para minimizar las pérdidas de calor.	Material del panel: vidrio inteligente que bloquee parte de la radiación entrante cuando sea excesiva y también la infrarroja. Una alternativa al vidrio es el EFTE, con capacidades de absorción y reflexión de radiación similares.
ENVOLVENTE	Los paneles funcionan como piel del edificio, con un espesor mínimo de la cavidad interior < 2 cm para permitir el máximo paso de la radiación solar.	Los paneles funcionan como una segunda piel ventilada del edificio.
APLICACIONES	Sistema utilizado principalmente para la obtención de ACS (eficiencia de conversión de un 25%). Almacenamiento del calor producido durante el verano para su utilización en invierno. Se puede complementar con el cultivo de biomasa, fijación de CO <sub>2</sub> y tratamiento de aguas residuales.	Sistema utilizado principalmente para la producción de biomasa (eficiencia de conversión de un 4,4%). Producción de biogás para la caldera del edificio. Se descarta la producción de ACS debido a que no se conoce si los materiales van a impedir que se caliente el fluido. También se permiten la fijación de CO <sub>2</sub> y tratamiento de aguas residuales.

3.13 Tabla resumen del diseño de la fachada aplicado a los diferentes climas estudiados.

La siguiente tabla (figura 3.14) muestra una comparativa estimada del consumo de ACS del sistema fotobiorreactor en comparación con un colector solar, para un clima frío de baja radiación. Las cifras se estiman en base al informe de ARUP sobre el rendimiento de la BIQ House. Se comprueba que un colector solar de baja eficiencia (40%) es un tercio más eficiente que la fachada biorreactora. Esto tiene lógica ya que los colectores solares son un sistema de producción de ACS mientras que el uso principal de los fotobiorreactores hasta ahora ha sido la producción de biomasa.

PRODUCCIÓN DE ACS	Energía Calorífica en 100m <sup>2</sup> de fachada		Nº viviendas/consumo Passive House: 15 kWh/m <sup>2</sup> a	
	MICROALGAS (25% eficiencia)	COLECTOR SOLAR (40% eficiencia)	MICROALGAS (25% eficiencia)	COLECTOR SOLAR (40% eficiencia)
CLIMA FRÍO BAJA RADIACIÓN	11.689 kWh/a	18.702 kWh/a	800 m <sup>2</sup> equivale a 8 viviendas	1256 m <sup>2</sup> equivale a 12 viviendas
CLIMA CÁLIDO ALTA RADIACIÓN	–	–	–	–

3.14 Tabla resumen comparativa de la producción de ACS de una fachada fotobiorreactora frente a un colector solar.

<sup>15</sup>. Este dato se corresponde a la radiación global anual de Madrid. Dato proporcionado por AE-MET.

Posteriormente se ha realizado un estudio de la producción de biomasa, tanto en clima frío como en clima cálido. Los datos de producción de biomasa (basados en la eficiencia de la BIQ House), se comparan con la producción de biomasa de un cultivo vegetal de maíz. Estas plantaciones energéticas generan un gran impacto ambiental y alimenticio en el lugar donde se sitúan, normalmente arrasando con toda plantación agrícola necesaria para la supervivencia de los habitantes del lugar.

En la siguiente tabla (figura 3.15) se comprueba la excelencia de la biomasa microalgal como alternativa a las otras biomásas vegetales. El rendimiento en un clima cálido de la fachada biorreactora es casi diez veces mayor que el cultivo de maíz, por lo que resulta una excelente alternativa.

3.15 Tabla resumen de la producción de biomasa.

PRODUCCIÓN DE BIOMASA	MICROALGAS (4,4% eficiencia)		Superficie necesaria para obtener los mismos kg/a en un cultivo de maíz <sup>16</sup>
	kg/a en 100m <sup>2</sup> de fachada	Contenido energético	
CLIMA FRÍO BAJA RADIACIÓN	327 kg/a	2453 kWh/a	326 m <sup>2</sup> 3 veces superficie cultivo microalgal
CLIMA CÁLIDO ALTA RADIACIÓN	802 kg/a	6019 kWh/a	893 m <sup>2</sup> 9 veces superficie cultivo microalgal

En la última tabla resumen se compara la fijación de CO<sub>2</sub> de las microalgas con los árboles (figura 3.16). Debido a su gran capacidad fotosintética las algas tienen la capacidad de fijar entorno a un 150-200% más de dióxido de carbono que los árboles, como se aprecia en la siguiente tabla. Se concluye que por cada 100 m<sup>2</sup> de fachada fotobiorreactora en una ciudad como Madrid, se podrían fijar las emisiones totales anuales de un coche.

3.16 Tabla resumen de la fijación de CO<sub>2</sub>.

FIJACIÓN DE CO <sub>2</sub>	MICROALGAS 1kg de biomasa = 1,88 kg CO <sub>2</sub> reciclados	Árboles necesarios para fijar la misma cantidad de CO <sub>2</sub>	% Emisiones de CO <sub>2</sub> anuales de un coche medio <sup>17</sup>
CLIMA FRÍO BAJA RADIACIÓN	614 kg/a	10 árboles	20% de las emisiones
CLIMA CÁLIDO ALTA RADIACIÓN	1.507 kg/a	23 árboles	100% de las emisiones

16. Datos de producción del maíz obtenidos de un informe de la Universidad de Barcelona. Véase [http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/Publicaciones-PDF/Cap%C3%ADtulo%204\\_Bioetanol.pdf](http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/Publicaciones-PDF/Cap%C3%ADtulo%204_Bioetanol.pdf)

17. Datos de emisiones de CO<sub>2</sub> obtenidos de un informe de Ecologistas en Acción. Véase [http://www.ecologistasenaccion.org/IMG/pdf\\_grafico\\_2.pdf](http://www.ecologistasenaccion.org/IMG/pdf_grafico_2.pdf)





## CONCLUSIONES

Resulta evidente que la investigación y desarrollo de la integración de la tecnología microalgal en la arquitectura contemporánea está en una fase inicial, a falta de mayor conocimiento sobre la materia, o credibilidad sobre la misma que pueda desencadenar un aumento de la financiación para proyectos de estas características. Aun así, la expectativa de futuro es buena y se prevé un desarrollo exponencial, aunque lento, sobre la materia. Entre los factores que pueden impulsar este crecimiento, en el campo de estudio de la arquitectura, se encuentra la influencia del resto de ingenierías que están investigando a años luz de nuestra profesión. Curiosamente, sus investigaciones se centran en la obtención, a partir de las microalgas, de biocombustibles para utilizar en las calderas de los edificios, en los sistemas de saneamiento o tratamiento de aguas residuales y herramientas para reducir la contaminación ambiental dentro de las grandes urbes y zonas industriales.

La arquitectura contemporánea debería ser capaz de dar respuesta a estas cuestiones desde el punto de vista de la sostenibilidad, habitabilidad e integración arquitectónica. Las microalgas ofrecen la posibilidad de incorporar el dinamismo a los proyectos de una manera sencilla, obteniendo unas envolventes naturales que se adaptan a las necesidades del clima y del usuario, sirviéndose de los procesos bioquímicos de la naturaleza.

El objetivo esencial de este trabajo ha sido dar a conocer y poner en valor este tipo de arquitecturas, utilizando la BIQ House como punto de partida y objeto de reflexión. Un recorrido a lo largo de cuatro meses, donde se ha querido poner en duda toda afirmación sobre la materia, para poder experimentar y entender cómo funciona esa maquinaria biológica que son las microalgas. A través de la investigación y experimentación se ha podido determinar con firmeza y autoridad las ventajas y desventajas de este tipo de soluciones arquitectónicas.

Cabe destacar que cualquier proyecto de estas características debe estar completamente adaptado al entorno y clima en el que se ubica. La arquitectura microalgal no puede ser internacional y globalizada, debe arraigarse al lugar y a sus necesidades. Debe aprender de la arquitectura popular, del urbanismo y del trazado de la ciudad y aplicar las estrategias de diseño y construcción que más convenga a cada entorno. Así se conseguirá una arquitectura enriquecida, innovadora y que se sirve tanto de lo vernáculo como de lo tecnológico. Se ha visto como las microalgas tienen multitud de aplicaciones y condicionantes, por lo que cada situación tendrá unos recursos que ofrecer y que obtener de estos pequeños organismos. Solo así se

podrá optimizar al máximo este recurso natural ilimitado, traduciendo sus propiedades al diseño y construcción de una arquitectura sostenible que se apoya en el pasado para mirar al futuro.

Por encima de todo, destaca la capacidad de estos microorganismos para enfrentarse a la polución del aire de nuestras ciudades, consumiendo las toxinas que nos perjudican y convirtiéndolas en energía. Lo mismo ocurre con las aguas residuales, y sus contaminantes que tantos problemas vierten en nuestros ríos y océanos. Son problemas que a día de hoy y en el corto plazo están vigentes, pero aunque no se pueda acabar con ellos sí que se pueden remediar. No hace falta más que una envolvente biodinámica con microalgas, a través de la cual se pueda controlar el saneamiento del edificio y la calidad ambiental de sus espacios interiores y exteriores.

A esto se debe añadir el poder convertir a nuestros edificios en objetos vivos generadores de energía renovable. La mayor ventaja, de la biomasa microalgal, es la infinita posibilidad de cultivo en diferentes ambientes y situaciones. No se necesitan grandes superficies agrícolas para generar biomasa, ya que las fachadas y cubiertas que dibujan la ciudad pueden llegar a ser espacios idóneos para su cultivo. A través de esto no solo se ayuda al medio ambiente, sino también a las zonas del planeta con escasez alimentaria donde los cultivos agrícolas se han ido reduciendo en favor de los cultivos energéticos.

Más utópica resulta la idea presentada en la BIQ House para convertir, a través de las microalgas, la radiación solar en calor. Debido a las limitaciones de temperatura que presentan estos microorganismos, esta función no va a ser nunca su principal atractivo. Con un rendimiento mínimo como el obtenido en la BIQ House, o con los resultados obtenidos de la experimentación de este trabajo, la idea del captador solar biológica queda como algo anecdótico o un extra aplicado a los usos que se han mencionado anteriormente. Sin embargo, no se debe abandonar esta idea de cara a futuros desarrollos que permitan una mejora en su implementación. Como ya se ha dicho previamente, hay todo un campo de estudio por explorar por lo que los resultados endebles y dudosos de ahora se pueden convertir en excepcionales en un futuro.

Otros usos que han sido descartados durante este trabajo, pero que quedan en interrogante para un posible desarrollo en un futuro, son la capacidad de las microalgas como elementos de sombreado y de aislamiento térmico o acústico. Respecto al primer término, queda descartado que pueda funcionar en cualquier clima especialmente en uno cálido y soleado como el mediterráneo. Sería una solución más fácil de conseguir en climas fríos donde su utilidad resultaría escasa. En cuanto a la capacidad de las microalgas como aislantes térmicos y acústicos, no se han encontrado propiedades o experimentación que respalden la idea planteada por la BIQ House, por lo que se deja la pregunta abierta para el futuro.

---

En definitiva, el empleo de microalgas en la arquitectura sostenible es un nuevo campo de estudio con infinitas posibilidades además que varias dificultades y retos. Es labor ahora de los arquitectos estudiar los mecanismos para mejorar una tecnología que, a través de la naturaleza, plantea conseguir unas ciudades más respetuosas con el medio ambiente y adaptadas al lugar, al igual que ocurre en la naturaleza.



# BIBLIOGRAFÍA

## Libros

- HEMMRICH, Edith; BLASCHITZ, Mark; WURM, Jan. *The algae house: the first building with a biorreactor facade*. Salengstein: Niggli, 2015; 98 páginas.
- PETERS, Brady; PETERS, Terry. *Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design*. Chichester: Wiley, 2013; 271 páginas.
- RICHMOND, Amos; HU, Qiang. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Physiology and Biotechnology*. Chichester: Wiley, 2013; 737 páginas.
- SHING, Bharat P. *Biofuel Crops: Production, Physiology and Genetics*. Wallingford: CABI, 2013; 548 páginas.
- TEBANNI, Sihem; FILARI, Rayem; LOPES, Filipa; DUMUR, Didien. *CO<sub>2</sub> biofixation of microalgae: Automation Process*. Chichester: Wiley, 2014; 191 páginas.

## Artículos de investigación

- AMARO, Helena; MACEDO, Angela; MALCATA, Xavier. "An alternative as sustainable source of biofuels?". *Energy*, volumen 44, número 1, Agosto 2012, páginas 158-166.
- CONTRERAS FLORES, Coral; PEÑA CASTRO, Julián Mario; FLORES COTERA, Luis Bernardo; CAÑIZARES VILLANUEVA, Rosa Olivia. "Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas". *Interciencia (Caracas)*, volumen 28, número 8, Agosto 2003, páginas 450-456.
- GORDON, Jeffrey; POLLE, Juergen. "Ultrahigh productivity from algae". *Applied Microbiology and Biotechnology (Heilderberg)*, volumen 76, número 5, Octubre 2007, páginas 696-675.
- SPOLAORE, Pauline; JOANNIS-CASSAN, Claire; DURAN, Elie; ISAMBERT, Arsène. "Commercial Applications of Microalgae". *Journal of Bioscience and Bioingenieering*, volumen 101, número 2, Febrero 2006, páginas 87-96.

## Informes BIQ House

- ARUP Berlín. "Monitoring Fassadenkonstruktion aus Photobioreaktoren am Pilotprojekt BIQ auf der IBA 2013 in Hamburg". Facilitado por ARUP.
- IBA Hamburg. "Smart Material House BIQ Whitepaper". <http://www.iba-hamburg.de/en/themes-projects/the-building-exhibition-within-the-building-exhibition/smart-material-houses/biq/projekt/biq.html>

## Otras fuentes

- GOMEZ ALONSO, Pablo. *Desarrollo y validación de tecnologías de intensificación lumínica para fotobiorreactores (PBR) para el aprovechamiento de la radiación en el cultivo de microalgas*. Tesis doctoral, 2012. 346 páginas.

**Recursos digitales**

[www.algaenergy.es](http://www.algaenergy.es)

[www.ecologicstudio.com](http://www.ecologicstudio.com)

[www.cesaregriffa.com](http://www.cesaregriffa.com)

<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>



## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

- 1.1. Ejemplo de ilustración de diversos géneros de microalgas. Tomado de Amos Richmond, *Handbook of Microalgal Culture* (Chichester: Wiley, 2013), figura 1.1, página 4.
- 1.2. Fotografía de Martinus Willem Beijerinck. Tomado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Martinus\\_Willem\\_Beijerinck](https://es.wikipedia.org/wiki/Martinus_Willem_Beijerinck); consultado el 09.06.2017.
- 1.3. Espectro electromagnético de la radiación solar. Tomado de Amos Richmond, *Handbook of Microalgal Culture* (Chichester: Wiley, 2013), figura 2.3, página 23.
- 1.4. Fotografía de biomasa algal una vez ha sido tratada. Tomado de [http://ibp.org.by/en/?page\\_id=277](http://ibp.org.by/en/?page_id=277); consultado el 09.06.2017.
- 1.5. Mapa de curvas planetarias de productividad de biomasa microalgal. Tomado de Pablo Gómez Alonso, *Desarrollo y validación de las tecnologías de intensificación lumínica para fotobiorreactores (PBR) para el aprovechamiento de la radiación en el cultivo de microalgas*. (Tesis doctoral, 2012), figura 2, página 6.
- 1.6. Ejemplo de planta de cultivo de microalgas abierta tipo raceway. Tomado de <http://www.newswise.com/images/uploads/2011/04/13/algaepond2.jpg>; consultado el 09.06.2017.
- 1.7. Ejemplo de planta de cultivo de microalgas abierta tipo raceway. Tomado de <http://www.aban.com/ABANBIOTECH/about-us.html>; consultado el 10.06.2017.
- 1.8. Fotografía de fotobiorreactores cerrados tubulares. Tomado de <http://www.algaenergy.es/galeria/?term=86&orderby=date&order=ASC>; consultado el 09.06.2017.
- 1.9. Ejemplo de fotobiorreactores cerrados planos. Tomado de <http://www.algaenergy.es/galeria/?term=86&orderby=date&order=ASC>; consultado el 09.06.2017.
- 1.10. Fotografía del proyecto BIQ House. Tomado de <http://www.ongreening.com/en/News/biq-world-s-first-algae-bioreactor-fa-ade-58>; consultado el 09.06.2017.
- 1.11. Fotografía de Claudia Pasquero y Marco Poletto. Tomado de <http://www.ecologicstudio.com/v2/projects.php?idsubcat=59>; consultado el 09.06.2017.
- 1.12. Fotografía de la instalación H.O.R.T.U.S. realizada por EcoLogicStudio en la AA de Londres en 2012. Tomado de <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=3&idsubcat=59&idproj=115>; consultado el 09.06.2017.
- 1.13. Fotografía de la instalación H.O.R.T.U.S. realizada por EcoLogicStudio en la AA de Londres en 2012. Tomado de <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=3&idsubcat=59&idproj=115>; consultado el 09.06.2017.
- 1.14. Fotografía de la instalación H.O.R.T.U.S. realizada por EcoLogicStudio en la AA de Londres en 2012. Tomado de <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=3&idsubcat=59&idproj=115>; consultado el 09.06.2017.
- 1.15. Fotografía del proyecto Urban Algae Canopy realizado por EcoLogicStudio en Milan 2014. Tomado de <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=7&idsubcat=59&idproj=129>; consultado el 09.06.2017.

- 1.16. Fotografía del proyecto Urban Algae Canopy realizado por EcoLogicStudio en Milan 2014. Tomado de <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=7&idsubcat=59&idproj=129>; consultado el 09.06.2017.
- 1.17. Fotografía del proyecto Urban Algae Canopy realizado por EcoLogicStudio en Milan 2014. Tomado de <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=7&idsubcat=59&idproj=129>; consultado el 09.06.2017.
- 1.18. Fotografía de los integrantes del estudio Cesare Griffa. Tomado de <https://cesaregriffa.com/>; consultado el 09.06.2017.
- 1.19. Fotografía del proyecto Waterlilly Gramp, realizado por el estudio Cesare Griffa en Venecia 2012. Tomado de [https://cesaregriffa.com/waterlilly/waterlilly\\_gramp\\_2012/](https://cesaregriffa.com/waterlilly/waterlilly_gramp_2012/); consultado el 09.06.2017.
- 1.20. Fotografía del proyecto Waterlilly Gramp, realizado por el estudio Cesare Griffa en Venecia 2012. Tomado de [https://cesaregriffa.com/waterlilly/waterlilly\\_gramp\\_2012/](https://cesaregriffa.com/waterlilly/waterlilly_gramp_2012/); consultado el 09.06.2017.
- 1.21. Fotografía del proyecto Waterlilly Gramp, realizado por el estudio Cesare Griffa en Venecia 2012. Tomado de [https://cesaregriffa.com/waterlilly/waterlilly\\_gramp\\_2012/](https://cesaregriffa.com/waterlilly/waterlilly_gramp_2012/); consultado el 09.06.2017.
- 1.22. Fotografía del proyecto Waterlilly 2.0 diseñado por Cesare Griffa en 2014. Tomado de <https://cesaregriffa.com/waterlilly/waterlilly-2-0/>; consultado el 09.06.2017.
- 1.23. Fotografía del proyecto Waterlilly 2.0 diseñado por Cesare Griffa en 2014. Tomado de <https://cesaregriffa.com/waterlilly/waterlilly-2-0/>; consultado el 09.06.2017.
- 1.24. Fotografía frontal de la BIQ House. Tomado de <http://inhabitat.com/the-worlds-first-algae-powered-building-opens-in-hamburg/>; consultado el 09.06.2017.
- 1.25. Fotografía detalle microalgas BIQ House. Tomado de <http://www.labioguia.com/notas/biq-house-un-edificio-vivo>; consultado el 09.06.2017.
- 1.26. Fotografía frontal de la BIQ House, realizada por Johannes Arlt. Tomado de <http://moin-moin-norden.de/das-leben-zieht-ein/>; consultado el 09.06.2017.
- 1.27. Dibujo de uno de los paneles fotobiorreactores de la BIQ House. Tomado de <http://www.ecochunk.com/3358/2012/10/24/biq-house-a-sustainable-building-powered-by-algae/>; consultado el 09.06.2017.
- 1.28. Diagrama de funcionamiento de los paneles fotobiorreactores de la BIQ House. Tomado del informe «Smart Material House BIQ», emitido por IBA Hamburg en Junio 2013; figura 15, página 15.
- 1.29. Esquema de principio de la BIQ House. Tomado del informe «Smart Material House BIQ», emitido por IBA Hamburg en Junio 2013; figura 16, página 16.
- 1.30. Esquema de principio del funcionamiento del intercambiador de calor de la BIQ House. Tomado del informe «Smart Material House BIQ», emitido por IBA Hamburg en Junio 2013; figura 12, página 12.
- 1.31. Gráfico de la entrada de radiación global en la fachada fotobiorreactora de la BIQ House. Facilitado por ARUP Berlín.
- 1.32. Gráfico de producción de calor en la fotobiorreactora de la BIQ House. Facilitado por ARUP Berlín.
- 1.33. Gráfico de producción de biomasa de la BIQ House. Facilitado por ARUP Berlín.
- 1.34. Tabla que muestra el balance energético de la BIQ House. Elaboración del autor a partir de los datos obtenidos en el informe facilitado por ARUP Berlín.
- 2.1. Fotografía de la planta de cultivo PTEM de AlgaEnergy en Barajas, Madrid. Tomado de <http://www.algaenergy.es/galeria/?term=86&orderby=date&order=ASC>; consultado el 09.06.2017.

- 2.2. Fotografía de la planta de cultivo PTEM de AlgaEnergy en Barajas, Madrid. Tomado de <http://www.algaenergy.es/galeria/?term=86&orderby=date&order=ASC>; consultado el 09.06.2017.
- 2.3. Fotografía de la planta de cultivo PTEM de AlgaEnergy en Barajas, Madrid. Tomado de <http://www.algaenergy.es/galeria/?term=86&orderby=date&order=ASC>; consultado el 09.06.2017.
- 2.4. Fotografía de las muestras de microalgas de Chlorella y Spirulina. Elaboración del autor.
- 2.5. Ilustración de una célula de la microalga Chlorella. Tomado de Amos Richmond, *Handbook of Microalgal Culture* (Chichester: Wiley, 2013), figura 1.2 página 5.
- 2.6. Curva de relación densidad celular-temperatura. Tomado de Juan Plasencia Alvarez, *Cultivo de microalgas con iluminación mediante LEDs*. (Trabajo Fin de Carrera, 2012), figura 6, página 11.
- 2.7. Fotografía del termómetro utilizado en la medición. Elaboración del autor.
- 2.8. Representación gráfica de la relación entre fotosíntesis e irradiancia. Tomado de Amos Richmond, *Handbook of Microalgal Culture* (Chichester: Wiley, 2013), figura 2.2 página 22.
- 2.9. Fotografía del luxómetro utilizado en la medición. Tomado de <http://www.grupotemper.com/catalogo/images/adjuntos2/MI-KL-6610-SP-EN.pdf>; consultado el 09.06.2017.
- 2.10. Fotografía del medidor de CO<sub>2</sub> Testo 535. Elaboración del autor.
- 2.11. Fotografía de inóculo de microalgas del género Chlorella. Elaboración del autor.
- 2.12. Fotografía de la botella de plástico donde se realizan los ensayos. Elaboración del autor.
- 2.13. Fotografía de la bomba de aire de pecera utilizada. Elaboración del autor.
- 2.14. Ilustración del ensayo paso a paso. Elaboración del autor.
- 2.15. Fotografía del Ensayo 1 el día 20 de Marzo. Elaboración del autor.
- 2.16. Fotografía del Ensayo 1 el día 29 de Marzo. Elaboración del autor.
- 2.17. Fotografía del Ensayo 2 el día 3 de Abril. Elaboración del autor.
- 2.18. Fotografía del Ensayo 2 el día 4 de Abril. Elaboración del autor.
- 2.19. Fotografía del Ensayo 3 el día 12 de Abril. Elaboración del autor.
- 2.20. Tabla de conclusiones parciales de los primeros ensayos. Elaboración del autor.
- 2.21. Fotografía de la muestra de microalgas obtenida para realizar los ensayos comparativos. Elaboración del autor.
- 2.22. Ilustración de los modelos utilizados en la fase de experimentación. Elaboración del autor.
- 2.23. Fotografía del modelo de los primeros ensayos. Elaboración del autor.
- 2.24. Fotografía del modelo de los ensayos comparativos. Elaboración del autor.
- 2.25. Fotografía del modelo con microalgas. Elaboración del autor.
- 2.26. Fotografía del modelo con agua. Elaboración del autor.
- 2.27. Fotografía del ensayo comparativo de temperaturas. Elaboración del autor.
- 2.28. Gráfico del ensayo comparativo de temperaturas. Elaboración del autor.
- 2.29. Ilustración del esquema de sombreado de la fachada de la BIQ House. Tomado de Edith Hemmrich, Mark Blaschitz, Jan Wurm, *The algae house: the first building with a bioreactor facade* (Salenstein: Niggli, 2015); página 18.
- 2.30. Fotografía del ensayo comparativo de opacidad. Elaboración del autor.

- 2.31. Fotografía del ensayo comparativo de espesor-opacidad. Elaboración del autor.
- 2.32. Gráfico que relaciona la opacidad con el espesor del panel. Elaboración del autor.
- 2.33. Gráfico de la concentración de CO<sub>2</sub> según locales, con o sin microalgas. Elaboración del autor.
- 2.34. Fotografía del spray de CO<sub>2</sub> utilizado para enriquecer el cultivo. Elaboración del autor.
- 2.35. Gráfico comparativo de temperaturas. Elaboración del autor.
- 2.36. Tabla de conclusiones de los ensayos comparativos. Elaboración del autor.
- 3.1. Ilustración de las distintas inclinaciones de un fotobiorreactor planp. Tomado de Amos Richmond, *Handbook of Microalgal Culture* (Chichester: Wiley, 2013), figura 11.20 página 194.
- 3.2. Fotografía de los fotobiorreactores de la BIQ House. Tomado de [http://www.floornature.it/media/photos/1/10024/06\\_solarleaf\\_arup\\_popup.jpg](http://www.floornature.it/media/photos/1/10024/06_solarleaf_arup_popup.jpg); consultado el 09.06.2017.
- 3.3. Fotografía del proyecto Urban Algae Folly, del estudio EcoLogicStudio realizado para EXPOMILANO 2015. Tomado de <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=3&idsubcat=71&idproj=147>; consultado el 09.06.2017.
- 3.4. Fotografía de detalle de un panel fotobiorreactor de la BIQ House. Tomado de Edith Hemmrich, Mark Blaschitz, Jan Wurm, *The algae house: the first building with a bioreactor facade* (Salenstein: Niggli, 2015); página 1.
- 3.5. Fotografía de los paneles de la BIQ House antes de ser colocados en el edificio. Tomado de <https://nergiza.com/wp-content/uploads/bioreactor.jpg>; consultado el 09.06.2017.
- 3.6. Fotografía de un vidrio diseñado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley. Tomado de <http://www.lavanguardia.com/ciencia/20130918/54385691174/vidrio-inteligente-laboratorio-berkeley.html>; consultado el 09.06.2017.
- 3.7. Fotografía de las tuberías que suministran nutrientes a la fachada BIQ. Tomado de Edith Hemmrich, Mark Blaschitz, Jan Wurm, *The algae house: the first building with a bioreactor facade* (Salenstein: Niggli, 2015); página 62.
- 3.8. Esquema de principio de la fachada fotobiorreactora. Elaboración del autor.
- 3.9. Esquema de la entrada y salida de nutrientes de la fachada fotobiorreactora. Elaboración del autor.
- 3.10. Estudio de la inclinación de la fachada de la BIQ House. Tomado de [http://arupconnect.biggroup.co.uk/wp-content/uploads/2014/08/BIQHouseFacadeSketch\\_VERT\\_Arup.jpg](http://arupconnect.biggroup.co.uk/wp-content/uploads/2014/08/BIQHouseFacadeSketch_VERT_Arup.jpg); consultado el 09.06.2017.
- 3.11. Sección y alzado de la propuesta de fachada fotobiorreactora para climas fríos de baja radiación. Elaboración del autor.
- 3.12. Sección y alzado de la propuesta de fachada fotobiorreactora para climas cálidos de alta radiación. Elaboración del autor.
- 3.13. Tabla resumen del diseño de la fachada en función del clima. Elaboración del autor.
- 3.14. Tabla resumen comparativa de la producción de ACS de una fachada fotobiorreactora frente a un colector solar. Elaboración del autor.

## ANEXO I TERMINOLOGÍA

**Biomasa\_** Aquella materia de origen animal o vegetal, susceptible de ser aprovechada energéticamente. A partir de ella se crean los biocombustibles, como por ejemplo el biodiesel.

**Fijación de CO<sub>2</sub>\_** Se refiere a la conversión de carbono inorgánico en forma de dióxido de carbono, en compuestos orgánicos como la biomasa.

**Fotobiorreactor\_** Denominados PBRs. Son dispositivos destinados al cultivo masivo de microalgas. Pueden tener forma tubular o plana.

**Fotoinhibición\_** Inhibición de la fotosíntesis causada por exceso de radiación, es la respuesta biológica de los vegetales al exceso de luz. Puede causar daños celulares e incluso la muerte de las microalgas.

**Intensidad luminosa\_** Es el flujo luminoso emitido o recibido por unidad de superficie. Se mide en lm/m o también en luxes.

**Irradiancia\_** Es la densidad de potencia de radiación solar incidente en una superficie. En unidades del sistema internacional se mide en W/m<sup>2</sup>.

**Microalgas\_** Son organismos unicelulares fotosintéticos que tienen grandes capacidades de fijación de CO<sub>2</sub> y producción de biomasa.

**Radiación PAR\_** Radiación Fotosintéticamente Activa. Se corresponde con las longitudes de onda de 400 a 700 nm que son las capaces de producir actividad fotosintética en las microalgas. Corresponde a la longitud de onda de la luz visible.

**μmol/m<sup>2</sup>s\_** Número de fotones de una cierta longitud de onda incidente por unidad de área y por unidad de tiempo. Es la unidad de medida de la radiación PAR. 1 W/m<sup>2</sup> equivale a 4,6 μmol/m<sup>2</sup>s.

