



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría en Diseño Industrial

Posgrado en Diseño Industrial

Tecnología

Fotocelda de uso doméstico para el cultivo de microalgas de alta proteína

Tesis que para optar por el grado de
Maestro en Diseño Industrial

presenta:

Jonathan Rubén Uvera Suárez

Comité Tutor:

Dr. Mauricio Enrique Reyes Castillo

Centro de Investigaciones en Diseño Industrial, UNAM

MDI. Julián Covarrubias Valdivia

Facultad de Arquitectura, UNAM

Dra. Alberta Lourdes Castillo Granada

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM

Ciudad Universitaria, Cd. México, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mí por terminar lo que empecé.

A Shishi por ser apoyo incondicional en todo.

A mis padres Pili y Manuel por sus enseñanzas y su amor.

A Toño y Mateo por ser mi familia.

Al Fer y al Abel por ser hombro de apoyo siempre.

A Graciela Sierra y Florentino Valderrama por su ayuda y confianza en mí.

A mis tutores Dr. Mauricio Enrique Reyes Castillo, Maestro Julián Covarrubias Valdivia y Dra. Alberta Lourdes Castillo Granada que dieron su tiempo, compartieron su conocimiento y con paciencia me guiaron para lograrlo.

A la UNAM por darme la oportunidad de estudiar, caminar sus pasillos, habitar sus bibliotecas y disfrutar como estudiante de tan magnífica casa de estudios.

A Dios por la vida y mi libertad.

¡Gracias!

Resumen	5
Capítulo I:	6
Introducción	6
1.1 Problemática	7
1.2 Pregunta de Investigación	9
1.3 Hipótesis	9
1.4 Objetivo General	9
1.5 Objetivos Específicos	10
1.6 Justificación de la Investigación	10
Capítulo II	11
Marco Teórico	11
2.1 Diseño Sistémico (SD)	16
2.2 Diseño basado en el Ciclo de Vida del Producto (LCD)	19
2.3 Diseño para el Desensamble (DfD)	22
2.4 Diseño Centrado en el Usuario (DCU)	23
2.5 Sistema Producto-Servicio (SPS)	25
Marco Teórico	27
Biotecnológico	27
2.6 Microalgas	27
2.7 Usos y Aplicaciones de la Biotecnología de Microalgas	28
2.8 Especies Microalgales	29
Capítulo III	35
Estado del Arte	35
3.1 Fotobiorreactores	35
3.2 Criterios de Diseño	39
3.3 Biofijación de CO ₂	44
3.4 Simulación Matemática	46
3.5 Sistemas Microalgales en el Espacio Urbano	49
3.6 Fotobiorreactores e hidroponía	56
3.7 Manufactura de Fotobiorreactores	58
Capítulo IV	69
Desarrollo	69
4.1. Definición de Usuario	69
4.2. Funcionamiento General de Sistema	81
4.3. Descripción Técnica	87
4.4. Filtración	93
4.5. Control de Temperatura	99
4.6. Medición de Parámetros y Control	113
4.7. Medio de Cultivo	115
4.8. Alcances y Resultados	117

Discusión	127
Conclusiones	130
Referencias	132
Anexos	138

Glosario de términos

Fotobiorreactor: Los fotobiorreactores (FBRs) son dispositivos cerrados destinados al cultivo masivo de microalgas.

Biomasa: Cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, susceptibles de ser transformados en combustible útil para el hombre y expresada en unidades de superficie y de volumen ⁽¹³⁶⁾.

Ciclo biológico: Un ciclo biológico es un conjunto de fenómenos o cambios que experimenta un organismo (o sucesión lineal de organismos) hasta el punto de partida donde comenzaría una nueva serie de cambios ⁽¹³⁷⁾.

Cepa: Cepa es, en microbiología, una variante de una especie usualmente utilizada a nivel laboratorio con el objetivo de conservación.

Biorremediación: La biorremediación se fundamenta en la capacidad natural que poseen determinados microorganismos para incorporar contaminantes en sus procesos metabólicos y usarlos como fuente de energía o carbono ⁽¹³⁸⁾.

Biomasa: Mezcla de proteínas, carbohidratos, minerales y otras moléculas de origen biológico.

Microalgas: Microorganismos fotosintéticos acuáticos generadores de biomasa.

Alga Spirulina: Microalga verdeazulada acuática aprobada por la FDA para su alimentación en humanos.

Fotocelda: Dispositivo tecnológico que mantiene las condiciones adecuadas para el cultivo de microalgas y que permite el paso libre de luz a su interior.

Abreviaturas

CO₂, Bióxido de carbono

O₂, oxígeno

FBR, Fotobiorreactor

AR, Agua Residual

Resumen

Esta tesis combina la biotecnología de microalgas, la ingeniería y metodologías de diseño para obtener un sistema fotobiorreactor para la producción de alga *Espirulina* de uso doméstico. El sistema tecnológico, controlado por el usuario a través de una aplicación para dispositivos móviles, genera biomasa microalgal de calidad con alto valor nutricional para su uso como alimento humano, captura CO₂ de la atmósfera y genera oxígeno limpio. Se describe el proceso de diseño, sus alcances y limitaciones. Se analiza el papel que toma el diseño como disciplina integradora de conocimientos. Se describen los aspectos biotecnológicos, de ingeniería y tecnocientíficos involucrados en el funcionamiento de dicho sistema. Se construye un prototipo funcional evaluando su rendimiento y posibilidades futuras.

Capítulo I: Introducción

Casi todos reconocemos los problemas a los que como humanidad nos enfrentamos en la actualidad. La escasez de agua, la crisis alimentaria, la erosión de la tierra y el inminente cambio climático, son un subproducto de la forma en la que obtenemos nuestros alimentos, fabricamos nuestros productos y desechamos sus residuos. Las decisiones tomadas en el camino del desarrollo nos han llevado a una época de cúspide tecnológica, pero, también nos han conducido a la edificación de un sistema de artefactos, modos de hacer y obtener productos inconsistentes con la finitud de los recursos y la limitada capacidad de nuestro planeta para soportar la acumulación masiva de sustancias y materiales resultantes de la actividad humana.

El incremento poblacional acelerado genera una demanda de alimentos, que, bajo el esquema actual, es insostenible para el planeta. Los efectos ambientalmente nocivos y ampliamente conocidos derivados de actividades productivas como la ganadería y monocultivos se reflejan en desajustes climáticos que se verán agravados en los próximos años. Esto traerá consigo un aumento en el costo monetario y energético de los alimentos ⁽¹⁾. Se vislumbra la necesidad de cambio en nuestros hábitos de consumo, y con esto, nuevas fuentes de proteínas, un componente elemental en la alimentación humana, cuya obtención deberá ser ambiental, social y económicamente sustentable.

En este cambio de paradigma el diseño toma un papel principal al ser esta disciplina la que se encarga, en gran medida, de la generación masiva de nuevos productos y servicios. La importancia del diseño para la adopción de nuevas formas de consumo no puede ni debe pasar desapercibida, la visión holística del diseño y su capacidad integradora de conocimientos diversos puede ser bastión en la creación de soluciones que planteen nuevas formas de ser y hacer ⁽²⁾ que susciten cambios de comportamiento en nuestra sociedad. Pues en una época de nuevas tecnologías ya no es posible el consumo de un producto por el producto mismo, sino se debe buscar la reflexión del usuario en un orden donde los productos posean implícitamente un carácter de innovación social y ambiental.

1.1 Problemática

Las proteínas son las principales moléculas constituyentes del cuerpo humano, éstas se componen mayormente de carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y oxígeno (O). Las proteínas además de ser los componentes estructurales principales de tejidos, músculos, huesos, órganos, uñas, sangre y cabello son moléculas funcionales llamadas enzimas, que se encargan de catalizar reacciones metabólicas fundamentales para el funcionamiento correcto del cuerpo humano ⁽³⁾. Existen alrededor de 20 aminoácidos comunes -constituyentes principales de las proteínas- nueve de ellos son considerados esenciales debido a que el cuerpo humano no es capaz de sintetizarlos naturalmente, por lo que el cuerpo obtiene estas moléculas en la alimentación donde son absorbidos a través de la digestión ⁽³⁾.

Las principales fuentes de alimentos proteicos son de origen animal. Alimentos como la carne, huevo y leche contribuyen entre el 15% y el 31% del suministro per cápita de calorías y proteínas a nivel mundial ⁽⁶⁾. El pescado se compone entre un 16% a 21% de su peso en proteínas ⁽⁷⁾ lo que lo convierte en otra de las fuentes principales de proteínas a nivel mundial. Existen otras fuentes de proteínas de origen vegetal como las provenientes de legumbres, cereales o frutos secos, sin embargo, éstas se clasifican como de bajo valor biológico debido a su baja disponibilidad en estos alimentos.

La obtención de estos alimentos a niveles industriales tiene efectos ambientalmente nocivos como la erosión y degradación de los suelos, grandes volúmenes de agua utilizados y la gran cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera. Algunos autores estiman que, bajo el sistema actual, se necesitan dieciséis calorías de energía para producir una caloría de carne ⁽¹⁾; para producir un 1kg de carne de vaca, se necesitan más de 15,000 litros de agua, para la de cerdo unos 8,000 litros y la de pollo más de 4,000 litros ⁽⁸⁾. A esto habría que agregarle que la mayor parte de los alimentos envasados conllevan gastos energéticos por la fabricación de envases de acero, aluminio o plástico -normalmente de disposición desechable- lo que representa entre el setenta y el ochenta por ciento de las emisiones globales generadas por la industria alimentaria ⁽¹⁾. Dentro de lo que se deben incluir los gastos por transporte, enfriamiento y congelamiento; pues más de la mitad de los alimentos en los países desarrollados se venden bajo condiciones de refrigeración ⁽¹⁾.

Con el incremento poblacional acelerado la demanda de alimentos aumenta año con año, lo que nos ha llevado a una situación paradójica en la que se vislumbra necesario la generación de más alimentos utilizando menos recursos.

México se encuentra entre los 10 países que más CO₂ emiten a la atmósfera, nuestro país emitió 683 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e) de gases efecto invernadero (GEI) sólo en 2015. Según el último “Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI)”

que presenta el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en apego al Artículo 74 de la Ley General de Cambio Climático ⁽⁴⁾. El 71% de las emisiones de nuestro país son de CO₂ seguidas de metano con 21%. Del total, el 10% corresponde a los sistemas de producción pecuaria ⁽⁴⁾, con esto la producción de alimentos cárnicos es una de las industrias con las que nuestro país contribuye al calentamiento global.

Se estima que la cadena de suministro de alimentos para el ganado se vea enormemente afectada debido al mismo cambio climático afectando la producción de carne vacuna y otros productos relacionados, entre los factores que más le afectan se encuentran el aumento en la concentración de CO₂ atmosférico y ozono troposférico, lo que ocasiona variaciones de temperatura y en la precipitación, así como aumento en la frecuencia de eventos climáticos extremos ⁽⁶⁾. Esto afectaría enormemente el suministro de las principales fuentes de proteínas en las grandes ciudades y muchas regiones del mundo.

Debido a lo anterior, es de vital importancia encontrar soluciones alimentarias que ofrezcan nuevas fuentes de proteínas. Actualmente, existen tecnologías basadas en procesos biológicos que integran los ciclos naturales del carbono (C), oxígeno (O) y agua (H₂O) para generar productos y servicios ambientalmente menos dañinos.

Las microalgas son un claro ejemplo de este potencial pues en su reproducción se captura CO₂ y a través de la fotosíntesis se libera oxígeno a la atmósfera. El carbono (C) toma un papel principal como núcleo molecular de proteínas, carbohidratos, lípidos y otras sustancias de alta actividad biológica. Este conjunto de materia orgánica se denomina normalmente “biomasa”. Esta biomasa producida puede transformarse en diversos productos alimenticios, además de fertilizantes, bicomcombustibles, medicamentos, entre otros. Una de las especies microalgales más destacables en el ámbito alimentario es *Arthrospira máxima*, más comúnmente denominada Espirulina.

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)⁽⁵⁾ el alga Espirulina contiene un alto contenido proteico; produce 20 veces más proteína por acre que la soja, 40 veces más proteína por acre que el maíz y 200 veces más proteína por acre que la carne de res ⁽⁵⁾. Su alto contenido en proteínas, vitaminas, minerales y micronutrientes la convierte en un complemento alimenticio ideal para personas desnutridas y conscientes de su salud que desean fortalecer su sistema inmunológico ⁽⁵⁾.

La producción local de estos alimentos puede representar una reducción en las distancias en transporte, refrigeración y embalajes. Lo que implementado de manera correcta podría disminuir la cantidad de CO₂ y materiales emitidos, involucrando al usuario de manera directa en la producción de este alimento.

Sin embargo, la falta de desarrollo de tecnologías que regeneren el ambiente y que, además, ofrezcan soluciones alimentarias, genera una brecha tecnológica que limita su apropiación por parte de la sociedad e impide la generación de nuevos productos y servicios. La alta complejidad técnica de la tecnología y los diversos factores relacionados a la problemática ambiental y social se transponen sugiriendo nuevas estrategias de integración a la sociedad, cuestión que deben acuñarse desde la multidisciplina. Esto ha abierto una nueva línea de investigación en la que se plantea una valorización del CO₂ contaminante en la atmósfera como recurso para su conversión biológica a biomasa y el aprovechamiento diverso de ésta.

1.2 Pregunta de Investigación

¿El diseño industrial, a través de sus metodologías, métodos y herramientas, puede contribuir de forma significativa al desarrollo y mejoramiento de los sistemas microalgales fotobiorreactores para la generación de nuevos productos y servicios?

Preguntas particulares

- ¿Cómo puede la apropiación de la biotecnología de microalgas por parte de los diseñadores y la sociedad en general contribuir a la sustentabilidad del planeta?
- ¿Qué herramientas de diseño son las adecuadas para el mejoramiento y socialización de los sistemas microalgales?

1.3 Hipótesis

Las metodologías del diseño industrial contribuyen al mejoramiento de la tecnología de microalgas para la generación de nuevos productos y servicios como posible solución alimentaria.

1.4 Objetivo General

Establecer las características de un fotobiorreactor microalgal para su implementación en espacios sociales domésticos a través del prototipado de producto y metodologías de diseño.

1.5 Objetivos Específicos

- Analizar la convergencia entre diseño de producto y la biotecnología para el mejoramiento de los sistemas microalgales,
- Describir los aspectos científicos y tecnológicos involucrados en el diseño de sistemas cerrados de cultivo de microalgas (fotobiorreactores),
- Manufacturar un prototipo de un fotobiorreactor microalgal a través de herramientas y metodologías de diseño,
- Validar el sistema microalgal a través de los datos cuantificables obtenidos, tales como: biomasa obtenida, variación del potencial de hidrógeno (pH), temperatura y estimación de volumen de agua utilizado,
- Describir el proceso de desarrollo general considerando el equipo, recursos y entorno de implementación,
- Reconocer las cualidades del biofiltro microalgal para uso comercial fuera del nicho de alta especialización (experimental e industrial).

1.6 Justificación de la Investigación

En la actualidad, existe una falta de soluciones tecnológicas entorno a la crisis alimentaria, cuya erradicación ha sido propuesta por la Organización Mundial de la Salud en 2015 figurando entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular se destaca que cerca de 690 millones de personas en el mundo (8.9% de la población mundial)⁽¹³³⁾ padecen de hambruna, cifra que podría aumentar debido a la crisis del COVID-19. A esto se suma la crisis del cambio climático, lo que podría aseverar aún más la hambruna mundial debido a la escasez de alimentos. En este contexto, la tecnología de microalgas y más aún, debido a sus características particulares, su integración en la sociedad es un tema cada vez más relevante en México y en el contexto internacional.

Para que dicha socialización se dé de manera exitosa, se muestra evidente la necesidad de una integración a nivel de conocimientos entre las disciplinas convergentes, que desemboque en la generación de estrategias, metodologías y/o desarrollos tecnológicos que faciliten y mejoren la integración de estos sistemas tecnológicos a la sociedad. Se propone la visión holística del diseño industrial como elemento integrador para dar forma a los conocimientos científicos con un propósito de regeneración ambiental y social.

Capítulo II

Marco Teórico

A través de la práctica de fabricar y utilizar utensilios el hombre se ha abierto paso en el tiempo para crear un orden que se adecue a los retos presentados por la naturaleza. Si la fabricación de utensilios representó un paso importante para la humanidad, el progreso se volvió ilimitado al surgir la herramienta-utensilio para hacer utensilios-⁽⁹⁾. Si la herramienta es una representación de las soluciones a las necesidades de la época, entonces podemos decir que “la máquina”, objeto hecho a través del uso de herramientas, es en principio un objeto de cultura⁽¹⁰⁾, es decir, todo surgimiento tecnológico (máquinas) es un reflejo de las formas de pensamiento de una determinada población o grupo de individuos en una época específica.

Sin embargo, en palabras de Lewis Mumford, “la máquina de nuestra época aún no ha sido asimilada. La asimilación sería una comprensión de las formas de vida producidas con la máquina y no solamente la producción de artefactos para su uso industrial”⁽¹⁰⁾. Para lograr la asimilación completa dice Mumford, se debe comprender el sentido humano de la tecnología pues ésta posee las costumbres generadas por ella y su potencial real al servicio del hombre. Para esto es necesario “descapitalizar la máquina”, en otras palabras, dotar a la máquina de características propias de un objeto que trasciende lo comercial y se ocupa de lo humano.

Con base en lo anterior, la integración social de la tecnología de microalgas al espacio urbano exige que ésta ya no actúe como una de carácter exclusivamente productivo sino, como una cuyo además de su objetivo principal de generar un alimento de alto valor proteico, conlleva la regeneración del ambiente y ocuparse de lo humano, es decir, ésta evocará una emoción como expresión en el ambiente de vida y tendrá un efecto en las formas de ser y hacer de sus usuarios⁽¹¹⁾.

Si vemos al diseño bajo la lupa de Richard Buchanan ⁽¹¹⁾ entonces nos referimos a éste como “un arte de pensamiento dirigido a la acción práctica mediante la persuasión de los objetos, y, por lo tanto, el diseño involucra la expresión vívida de ideas que compiten en la vida social” ^(sic11). Tenemos entonces que el diseño es una disciplina que además de otorgar características formales, cualitativas y cuantitativas a los objetos, sirve como medio de comunicación entre los diseñadores, tecnólogos, científicos, los usuarios y la sociedad en general.

Cada diseño adquiere, en su momento de creación, premisas propias y evidentes para el usuario que interacciona con el objeto. Bajo esta integración social, la tecnología de microalgas, sus características y propósitos han de ser pensados para fusionarse armoniosamente en forma y función como parte del sistema de artefactos que le rodea. Por último, la integración de los sistemas microalgales al espacio social urbano se debe de entender como una donde se entrecruzan factores en los niveles social, ambiental y económico pues estos tres factores son la base del sistema de artefactos del ser humano.

Biotecnología y Diseño

Como mencioné antes, son precisamente las herramientas las que están dispuestas en relación directa a los “cómo”, y son en esencia, una proyección de los diferentes componentes de un sistema a resolver. Es claro que cada disciplina posee un herramental teórico-metodológico para abordar y resolver de manera preferencial los problemas que son de su competencia ⁽¹²⁾. Sin embargo, la complejidad de los problemas que vivimos actualmente nos obliga a plantear soluciones transdisciplinarias que se caractericen por la descomposición de éstos en subproblemas unidisciplinarios, valorando los fenómenos interconectados, y donde se agreguen subsoluciones a una solución integral ⁽¹⁴⁾.

Esto requiere de un orden de análisis a nivel sistémico, lo que implica la generación de redes de conocimiento que nos permitan adoptar prácticas y actitudes con base en distintos lenguajes y estilos de pensamiento combinatorios ⁽¹³⁾. Pues resulta complejo y casi imposible generar cambios profundos en la sociedad con base en y desde solo una disciplina.

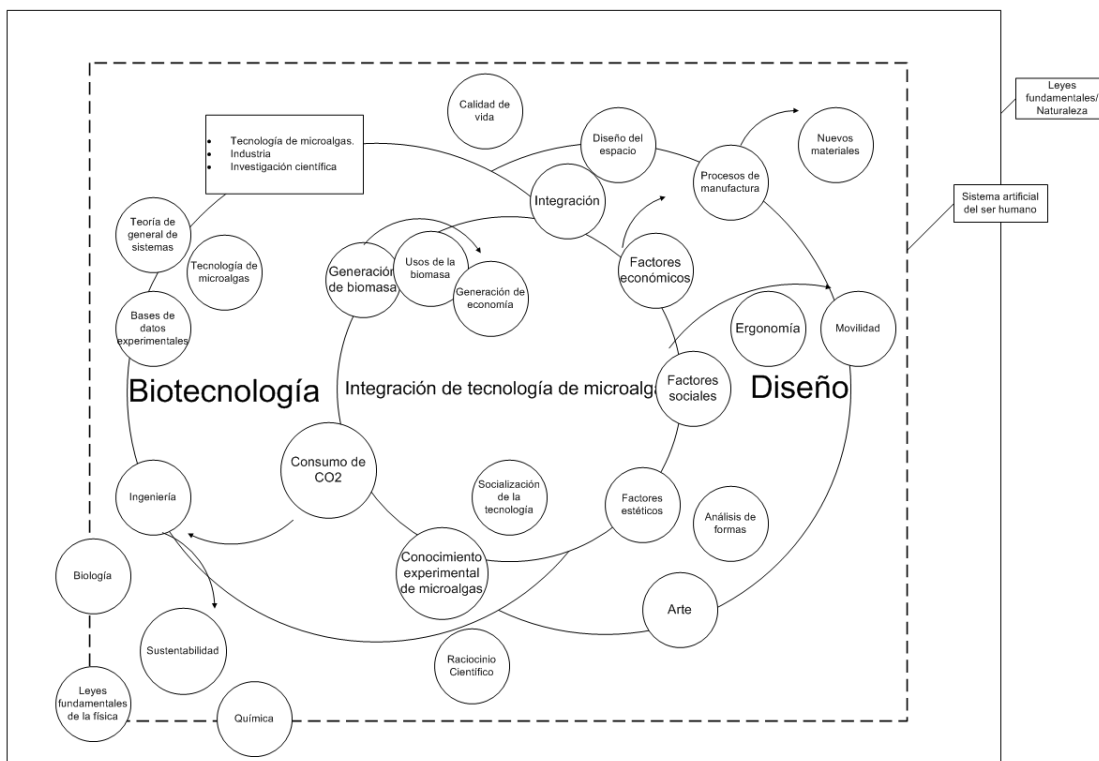


Figura 1. Modelo gráfico de las bases teóricas puestas en relación. Fuente: elaboración propia.

Es debido a esto que, las herramientas actuales que se utilizan para el diseño y desarrollo de estos sistemas tecnológicos se ven limitadas, pues al trasladarlos a un espacio nuevo, donde se requiere de la misma funcionalidad técnica pero puesta en relación con un espacio diferente, resulta evidente una integración a nivel de conocimientos, herramientas y experiencias entre las disciplinas del diseño, la biotecnología y la ingeniería (figura 1) para crear un nuevo sistema socio-técnico que acuñe las necesidades de sus usuarios fuera del campo industrial tradicional de la tecnología de microalgas.

Se trata de una nueva contextualización, ya que la tecnología de microalgas es generada por la biotecnología y la ingeniería pero al traspasar o insertar la tecnología al espacio social urbano ésta debe reunir, además de sus funciones técnicas, otro orden de características especiales enfocadas y acomodadas al nuevo espacio, tales como: la forma, tamaño y materiales adecuados, además de tomar en cuenta a los usuarios: sus características, habilidades, conocimientos, cultura; el lugar donde se va a utilizar el objeto, la actividad o conjunto de actividades que se van a realizar con el objeto; el conjunto de interacciones que el objeto tendrá con otros usuarios no directos, como por ejemplo, quién lo va a reparar y dar mantenimiento.

Aunado a esto, esta nueva contextualización exige que se resuelvan aspectos como: técnicas de manufactura, rendimientos del sistema, uso eficiente de la energía, las interacciones a nivel ambiental, social y económico, qué acciones se tomarán al final de su vida útil, cómo se separarán sus componentes

para reciclaje y disposición final, cómo prolongar su vida útil, qué consumibles utiliza: de dónde se obtienen, cómo se desechan, qué residuos se producen durante su uso, entre otros.

Todos estos aspectos anteriormente señalados exigen respuesta desde la inter y transdisciplina. El diseñador especifica tanto materiales como acabados y características formales ⁽¹²⁾, la interacción del objeto con su entorno, la experiencia de uso, ensamble y desensamble, determina parte de los procesos de producción ⁽¹⁸⁾, etc; la biotecnología se ocupa de los aspectos técnico-biológicos como técnicas y medios de cultivo, parámetros biológicos de crecimiento, impacto a nivel salud; y la ingeniería de aspectos tecnocientíficos como la aplicación de modelos matemáticos para la descripción de los fenómenos fisicoquímicos, optimización de procesos bioquímicos e ingeniería de procesos de manufactura, eficiencia energética, entre otros.

Esta unión de conocimientos puede ser la siguiente etapa para la generación de sistemas tecnológicos acoplados a los ciclos biológicos naturales del planeta. Con una visión no sólo de no contaminación sino regenerativa del ambiente. Sin embargo, el problema de la contaminación se debe entender como uno de orden sistémico, es decir, es causa del modelo económico lineal que moldea la forma en que fabricamos, consumimos y desechamos los objetos y productos ⁽¹⁵⁾; lo que no puede cambiarse solo con tecnología. Para cambiar esto es necesario realizar cambios profundos en las actividades no tan aparentes en las relaciones de intercambio mercantil, relaciones humanas, comprender la tecnología como objeto generador de cultura, poner especial atención a la interacción tripartita -ambiental, económico y social- para generar nuevos sistemas sociotécnicos acoplados a los ciclos biológicos naturales y no minimizar sus implicaciones.

Economía circular

La perturbación ambiental generada, principalmente, por un desequilibrio en los flujos de energía utilizados para fabricar los productos y servicios ^(1, 2) se debe a que por años se ha favorecido el consumo desmedido de artefactos, de los que no se tienen en cuenta la carga de emisiones contaminantes en su proceso de diseño, fabricación, manejo y transporte ^(1, 2); dicha cifra siempre se ha encontrado oculta para el usuario, lo que ha generado una falsa creencia entorno al impacto contaminante de los objetos ⁽¹⁾. Se ha estimado que alrededor del 80 por ciento del impacto ambiental de un sistema, producto o servicio se determina en la etapa de diseño ⁽¹⁾.

La implementación de tecnologías regenerativas que en su diseño inicial contemplen los aspectos ambientales, económicos y sociales, va de la mano con la llamada economía circular. Repensar o “rediseñar” los objetos y sus procesos de fabricación tomando en cuenta los límites del sistema de artefactos

y su relación con el sistema natural que lo envuelve y del cual obtiene los materiales y materias primas ⁽¹⁶⁾, es salir del paradigma del crecimiento ilimitado, de tal modo que, el intercambio de este sistema tecnológico con su entorno a los tres niveles se encuentre en congruencia con su realidad actual.

Para que esto sea posible, los diseñadores e ingenieros, entre otras disciplinas enfocadas a materializar soluciones, deben trascender al “objeto”, es decir, la atención debe estar puesta en el proceso de diseño, pues en esta etapa es cuando se determina la relación entre sus diferentes partes y componentes, siendo el momento idóneo para tomar en cuenta sus relaciones con el ambiente y determinarlos con base en flujos renovables manteniendo los materiales en circulación continua.

El concepto de economía circular sienta las bases de un sistema productivo que desde su base contempla todos los impactos ambientales posibles relacionados con la obtención, manejo, disposición, reutilización de materiales, componentes, estructuras, residuos y productos ⁽¹⁵⁾. Selecciona procesos y tecnologías de acuerdo con el menor impacto ambiental y recursos renovables. Minimiza la acumulación de desechos al diseñar los objetos para ser renovados y reciclados prolongando su vida útil, reutilizando materiales y componentes para mantenerlos en circulación y uso durante el mayor tiempo posible ⁽¹⁵⁾.

La transición a una economía circular plantea también el reto de encontrar nuevas formas de intercambio, es decir, la implementación de nuevos modelos de negocio innovadores que faciliten un intercambio más responsable entre los fabricantes y consumidores, entre los que actualmente figuran: Sistemas producto-servicio (capítulo 2.5), consumo colaborativo, reciclaje 2.0 y transformación de producto ⁽¹⁵⁾. Estas nuevas formas de intercambio exigen que tanto el fabricante o proveedor, así como el consumidor, tomen un papel fundamental, ya sea en el reciclaje o reutilización, tanto como en la disposición final de los materiales y recursos.

2.1 Diseño Sistémico (SD)

El Diseño Sistémico se define como un acercamiento que busca crear no solo productos industriales sino sistemas complejos productivos y sustentables ⁽¹⁹⁾, dicho de otra manera, busca conocer las interrelaciones ambientales ⁽²²⁾, sociales y económicas de los sistemas productivos con el fin de que los flujos de materiales y energía se integren de forma tal que las salidas (outputs) o desechos de un sistema productivo sean las entradas (inputs) o materia prima de otros sistemas productivos, previniendo así, que los residuos sean liberados al ambiente. Esta postura de diseño integra dos grandes corrientes de diseño como lo son Diseño Biomimético y Diseño de la Cuna a la Cuna ⁽¹⁹⁾.

Además, este enfoque de diseño se basa en teoría de sistemas, establece que un ecosistema productivo se encuentra fuertemente influenciado por su entorno ⁽²⁰⁾, este enfoque de diseño puede ayudar a crear sistemas productivos que se adapten mejor a los cambios ya que su diseño abarca los contextos económicos, sociales y ambientales implicados.

El diseño sistémico se basa en 5 principios fundamentales ^(20, 23):

- **Salidas-Entradas:** La salida o desecho de un sistema se convierte en la entrada o materia prima de otro sistema.
- **Interrelaciones:** El estudio de las interrelaciones no solo entre los mismos componentes del sistema sino entre el sistema y otros sistemas más amplios que comparten entorno.
- **Actuación local:** Se refiere al contexto local y los recursos disponibles como capital humano, culturales y materiales.
- **Autopoiesis:** Sistemas autosostenibles capaces de multiplicarse a sí mismos y evolucionar junto a su contexto.
- **El humano como el centro del proyecto:** El ser humano se posiciona en el centro considerándolo como un ente conectado ambiental, cultural, social y éticamente al contexto y al entorno ⁽²¹⁾.

El objetivo de este análisis es desarrollar un sistema productivo sustentable que a través de integraciones tecnológicas o procesos se asegure la reutilización de los desechos del sistema logrando un impacto ambiental mucho menor al comparado si se piensa a la tecnología como un ente aislado o independiente de su entorno ⁽²³⁾.

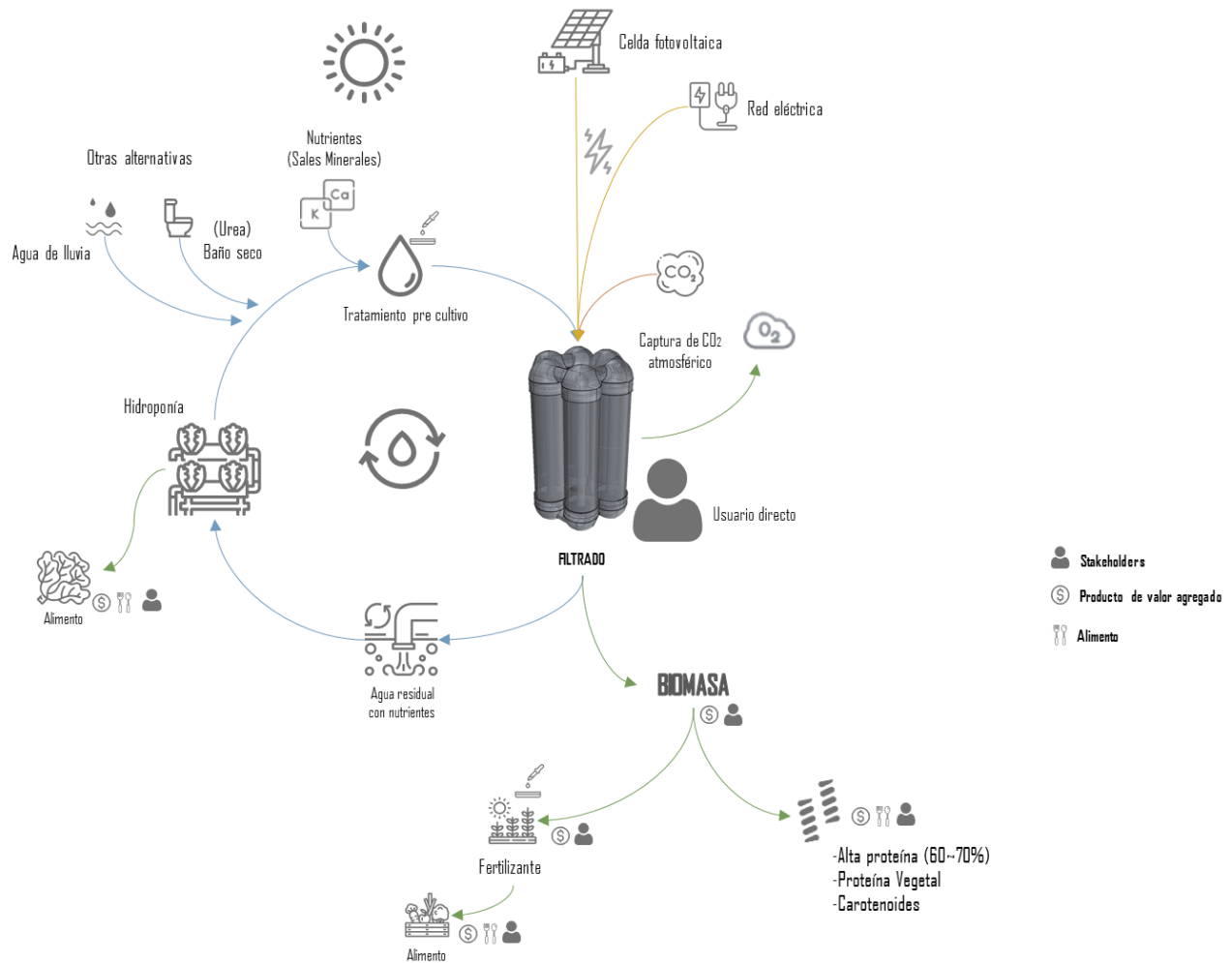


Figura 2. Diagrama esquemático de las interrelaciones de un sistema microalgal (fotobiorreactor) con su entorno en un contexto fuera de la industria o laboratorio. Se muestran las posibles salidas de materia y entradas de energía requeridas para su funcionamiento como sistema abierto a su entorno. Fuente: elaboración propia.

Cada célula microalgal es un sistema abierto que se encuentra en constante intercambio de materia y energía con su entorno, estas características se traspasan al sistema tecnológico de cultivo, es decir, el sistema de cultivo obedece a estas relaciones y debe cumplirlas. Esta conexión del sistema tecnológico con su entorno no puede ignorarse a la hora de trasladarse a un contexto específico pues los flujos de materia y energía son constantes y necesarios, estas salidas se traducen a elementos físicos, químicos y residuales derivados de su funcionamiento.

Si se pretende ver a la tecnología sólo desde un único enfoque, por ejemplo, como una solución al exceso de CO₂ atmosférico, puede caerse en lo que Manzini llama “las soluciones remedio”⁽²⁾, definidas como, “soluciones tecnológicas que emergen como “soluciones” a contextos ya degradados pero que no mejoran la calidad de vida de las personas sino que a su vez contribuyen a un aumento en el consumo de bienes y

productos generando un ciclo de producción-consumo que se refuerza a sí mismo”^{(sic(2))}, cuya justificación es atacar un problema -exceso de CO₂ atmosférico- que evidentemente es de carácter sistémico y está relacionado con la manera en que producimos y consumimos los bienes y servicios. En este respecto el sistema tecnológico deberá capturar CO₂ de la manera más eficiente posible para superar la cantidad de CO₂ y contaminantes liberados en su proceso de diseño, producción, transporte y durante su uso (ver capítulo 2.2).

Es aquí donde el diseño sistémico nos permite visualizar de una manera mucho más amplia las interrelaciones que la tecnología tiene con su entorno. Dichos aspectos deben tomarse en cuenta si se pretende diseñar un sistema y no sólo un objeto o producto aislado, aprovechando no solo una de estas características sino las más posibles o plantear soluciones directas al manejo de estos residuos o salidas materiales y energéticas (ver capítulo 3.6 Fotobiorreactores e Hidroponía).

Además, es necesario comprender que estas características no se encuentran limitadas a lo ambiental, sino que se encuentran unidas a la dimensión social y económica: gasto de agua, tratamiento del agua residual, costo energético, producción y adición de nutrientes, cantidad de biomasa producida, horas de uso, reparaciones, mantenimiento, etc. las cuales tienen un efecto en su entorno y serán realizadas por los diversos usuarios de la tecnología (ver capítulo 2.5 y 3.5) “.

2.2 Diseño basado en el Ciclo de Vida del Producto (LCD)

El Diseño Basado en el Ciclo de Vida es una postura de diseño que permite adoptar una visión sistémica analizando el conjunto de entradas (inputs) y salidas (outputs) en los diferentes niveles de interacción con el medio ambiente y en las diferentes etapas en el ciclo de vida del producto como son: preproducción (diseño, extracción, adquisición de recursos y materiales), producción, distribución o transporte, uso o mantenimiento, y disposición final (recuperación, reutilización, reciclaje y desecho)^(2, 18). Esta postura comprende que es mucho más viable tener en cuenta los efectos negativos que un producto pueda tener en el ambiente desde las primeras etapas de su diseño y desarrollo, con el fin de prevenir problemas posteriores, que intentar reparar el daño ya hecho. Por lo tanto, esta postura de diseño sirve en la planeación estratégica y en la toma de decisiones para la compra de materiales y minimización de desperdicios.



Figura 3. Diagrama esquemático que muestra de forma general el ciclo de vida de un sistema microalgal en el espacio social urbano. Fuente: Elaboración propia

Las decisiones tomadas en el diseño inicial de un objeto o producto se reflejan y tienen un efecto en etapas subsecuentes como en su producción, transporte y comercialización, por esto mismo, en la fase de premanufactura o diseño se deben tener en cuenta aspectos como los materiales, sus procesos de manufactura, qué materiales poseen mayor carga ambiental, cómo se puede extender su vida útil o en su caso, como se reciclarán una vez terminada la vida útil del producto o si se pueden reemplazar en la unidad funcional para extender la vida útil del producto ⁽²⁴⁾. Entre las estrategias de reducción de materiales se encuentran la reducción de espesores de ciertos componentes, la eliminación completa de componentes no esenciales para el funcionamiento del producto, evitar el sobredimensionamiento o diseñar el desensamblable⁽²⁾ (ver capítulo siguiente).

La etapa de manufactura comprende los procesos de producción del producto y estos pueden pensarse como procesos con poca merma de material o de bajo consumo energético, siempre y cuando estas características se encuentren de acuerdo con los objetivos de producción.

En la etapa de uso o funcionamiento del artefacto o producto, es imprescindible tener en cuenta el comportamiento sistémico de la unidad funcional, es decir, contemplar los ciclos de vida adicionales en el uso: aquellos que se encuentran en relación con los recursos materiales y energéticos consumibles, y residuos o desperdicios producidos durante el uso de la unidad funcional. ⁽²⁾

En resumen, el diseño basado en el ciclo de vida permite:

- Minimizar el consumo de energía
- Minimizar el consumo de materiales
- Minimizar los residuos y desechos
- Minimizar el consumo de materiales durante el uso

Entre otras estrategias para generar un producto ecoeficiente se encuentran seleccionar materiales y energía de fuentes locales, ⁽²⁾ evaluar el uso colectivo del producto bajo esquemas de intercambio como producto-servicio ⁽²⁵⁾, diseñar productos más duraderos, seleccionar procesos de manufactura flexibles y de bajo impacto ambiental. Durante la utilización minimizar los inputs como los materiales, agua, consumo eléctrico para así reducir la huella lo más posible y aprovechar los recursos disponibles.

Si a la tecnología de microalgas se le pretende ver como una posible solución a la fijación de CO₂ atmosférico entonces se debe poner especial atención en los materiales que lo componen, su carga ambiental, sus procesos de producción, su manejo y duración de su vida útil, esto para aprovechar al máximo las características de reducción de contaminación ambiental que esta tecnología ofrece, ya que al ser una tecnología cuya característica principal es la de ser un sistema abierto (figura 3) se pueden aprovechar sus diversas outputs e inputs generando sistemas completos en lugar de productos u objetos aislados.

Las decisiones tomadas por el diseñador van a tener un efecto en la cadena de fabricación, cadena de suministro, en el transporte, en el reciclaje, en el uso en el mantenimiento por esto se debe pasar de diseñar un producto u objeto a diseñar su función y las diversas relaciones con el ambiente para generar un tren de decisiones a lo largo de la cadena de fabricación que sean coherentes con el propósito final de la tecnología.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite realizar una aproximación cuantitativa del impacto ambiental de los productos al analizar por completo su ciclo de vida ⁽¹⁸⁾. Esta herramienta resulta de gran utilidad para contar con un estimado en términos de emisiones de CO_x, SO_x, NO_x, grado de eutrofización, acidificación, toxicidad de las sustancias contenidas, contaminación por residuos, contribución al calentamiento global, agotamiento de los materiales vírgenes y reducción de la capa de ozono relacionadas con un producto en una determinada etapa de su ciclo de vida y realizar modificaciones con el fin de mejorarla ⁽²⁾. Se enfoca primordialmente en el consumo de energía, extracción y producción de materiales, y residuos emitidos al ambiente, sin embargo, la profundidad del análisis varía en función de los objetivos perseguidos y el tipo de producto que se requiera evaluar; no contempla consideraciones en materia económica o social ⁽²⁾.

Este análisis consta de cuatro pasos principales ⁽²⁾⁽¹⁸⁾:

- **Definición de objetivos:** Se define la profundidad y alcance del análisis, razón por la que se realiza el estudio y el uso que se dará a los resultados,
- **Análisis de inventarios:** Recopilación de datos,
- **Análisis de impactos:** Se analizan las mediciones de desempeño ambiental,
- **Análisis de mejoras:** Se identifican oportunidades para la mejora en el desempeño ambiental del producto.

El ACV es utilizado ampliamente en diversas industrias para la evaluación del impacto ambiental de productos y procesos. Se encuentra definido a detalle por la norma internacional **ISO 14040:2006**. Existen diversas herramientas que permiten realizar este análisis como software especializado y métodos de aplicación como el de BUWAL, Método CML y Ecoindicador, además de matrices para el análisis de información, v. g., Matriz MET ⁽¹⁸⁾⁽²⁾.

2.3 Diseño para el Desensamble (DfD)

El Diseño para el Desensamble es una práctica de diseño cuyo objetivo es que los componentes del objeto sean fácilmente desensamblados. El diseño para el desensamble permite extender la vida útil del producto al hacer que la fase de mantenimiento y reparación sea más económica en términos de tiempo, recursos económicos, materiales y mano de obra. Además, ayuda a reducir los costos de producción al mejorar el tiempo de ensamblado inicial ⁽²⁶⁾.

DfD permite facilitar el intercambio de piezas y desensamblado final, lo cual mejora los procesos de reciclaje y reutilización de los materiales al término de la vida útil del producto pues permite separar más fácilmente materiales que no son compatibles entre sí en las fases de reutilización o reciclaje ⁽²⁾.

En este método de diseño el diseñador toma un papel principal pues es él quien determina la fijación entre componentes, superficies de apoyo, concepción del armado inicial, tipos de combinaciones, estandarización de piezas y modularidad ⁽²⁶⁾. Uno de los objetivos principales es evitar, en la medida de lo posible, uniones permanentes innecesarias. Para esto es útil apoyarse en diagramas 3D, cálculo de tolerancias entre piezas, tablas de compatibilidad de materiales, etc.

Estrategias generales de DfD ⁽²⁾⁽²⁴⁾:

- Dividir la composición física del producto en fracciones reciclables
- Agrupar materiales compatibles en subensambles
- Evitar la combinación de materiales corrosivos
- Puntos de drenaje accesibles
- Utilizar sistemas de unión removibles
- Reducción de las dimensiones de los productos y de sus componentes
- Reducción del número de sujeciones

Diseño para el desensamble es una de las técnicas de diseño que pudiera contribuir a la sustentabilidad del producto de manera significativa, debido a que se pone especial atención en la estrategia que se seguirá al término de la vida útil de producto, lo que en la mayoría de los productos actuales no se contempla. Para ello es necesario poseer una buena comprensión de los procesos de reciclaje de los materiales, además, de los diferentes actores que se encuentran relacionados con este proceso como el propio usuario, recolectores de basura, procesadoras de materiales, recicladoras, etc., y así poder diseñar de manera más acertada una estrategia para el desensamblado y aprovechamiento de los materiales ⁽²⁾.

2.4 Diseño Centrado en el Usuario (DCU)

“El aspecto primario del diseño no tiene que ver con la creación de objetos estéticamente placenteros o que funcionen con suavidad. El diseño, sobre todo, es para mejorar la calidad de vida de las personas.” (17,28)

El Diseño Centrado en el Usuario es un proceso de diseño que se basa en las características del usuario para diseñar un producto u objeto con el fin de mejorar su usabilidad ^(27,131). Una de las características principales de este proceso de diseño es que se aleja del pensamiento tradicional de diseño que se concentra en la funcionalidad o la forma de los objetos, sino que más bien, se pone al usuario y su experiencia con el objeto en el centro del proceso de diseño. Este sistema usuario-objeto se evalúa cualitativamente para determinar la calidad, pertinencia y coherencia de la solución de diseño ⁽¹³¹⁾.

El fundamento de la metodología consiste en la definición completa del sistema usuario-objeto-actividad-entorno (UOAE) sus relaciones e interdependencias; comprendiendo que el objeto se utilizará por un usuario específico en un tiempo y lugar determinados realizando una actividad concreta. El usuario pertenece a un grupo social o tribu particular y se toma como una representación de estos. Para lograr esto se puede generar un arquetipo de “persona” que describa lo más detallado posible el tipo de persona o usuario hacia el cual se dirigen los esfuerzos de diseño.

Se trata de que los productos sean eficientes en su uso, seguros, que, en su forma, se indique el modo de uso para disminuir los riesgos para el usuario derivados de malas posturas durante la interacción o procesos que conlleven un riesgo como altas temperaturas o recipientes a presión; también se trata de disminuir los riesgos para el objeto asociados a un mal uso que ponga en riesgo la integridad del objeto/producto. Se evalúa la experiencia del usuario con el objeto, se retroalimenta el proceso y se evalúa nuevamente.

Algunas características particulares del DCU son:

- Promueve y dirige esfuerzos de innovación a mercados específicos ⁽¹³¹⁾,
- Los usuarios participan durante el proceso de diseño,
- Es iterativo,
- Es multidisciplinar.

Se apoya en la ergonomía la cual estudia la interacción entre los objetos y las personas que los van a usar, esta interacción puede darse a nivel físico o cognitivo, se ocupa de las características que mejoran esta

interacción y la hacen segura tanto para el usuario, así como para el objeto optimizando los contextos en los que se desempeña la actividad.

Algo importante sobre la ergonomía es que es transversal para todos los usuarios de un objeto/producto, es decir, es igual de importante para el usuario principal tanto como para la persona que dará mantenimiento o quien realizará las reparaciones o el desensamblado final del objeto. El análisis ergonómico cuenta con fases como la indagación, planeación y evaluación. Se apoya en técnicas como la antropometría, análisis funcional, elementos biomecánicos, aspectos cognitivos como la percepción, memoria, capacidad analítica, entre otros.

Apoyado en la ergonomía, el diseño centrado en el usuario DCU arroja datos de tipo cualitativo que sirven como guías para las modificaciones subsecuentes en el diseño, debido a su naturaleza centrada en la persona. El DCU puede, además, apoyarse de disciplinas como la psicología, la antropología y la etnografía.

2.5 Sistema Producto-Servicio (SPS)

El Sistema Producto-Servicio (SPS) es un modelo económico en el que se integra o crea un nuevo sistema alrededor de un producto a través de su integración con un servicio, con la intención de reducir su impacto ambiental y encontrar nuevas maneras de comercialización ⁽¹⁹⁾, según el servicio esté orientado a dar soporte al producto, o al uso individual o compartido, o al resultado ⁽²⁵⁾.

Este modelo como parte de la llamada Economía Circular se aleja de la forma de comercialización tradicional y la cambia por una en la que el usuario paga por el uso y operación del producto en modo de “renta”, mientras que la empresa, dueña del producto, es quien se encarga de la instalación, mantenimiento, reparación y retiro de este. Esto incentiva a las compañías dueñas de la tecnología a mejorar sus procesos de manufactura y diseñar actualizaciones y/o mejoras haciendo que la vida útil del producto se extienda ⁽¹⁹⁾. Incluso una vez que se termine la vida útil del producto, la compañía se hace responsable de los materiales resultantes y les da una disposición final adecuada.

Tradicionalmente, el sistema producto-servicio SPS se ha clasificado en tres categorías principales ⁽¹⁹⁾:

- **SPS orientado a producto:** se da cuando se comercializa un producto en integración con servicios adicionales que agreguen valor al ciclo de vida del producto. Estos servicios pueden ser, por ejemplo, mantenimiento, reparación, actualización, sustitución y retiro ⁽¹⁹⁾.
- **SPS orientado al uso:** se da cuando se comercializa el acceso a un producto que permite que el consumidor obtenga los resultados que busca. El consumidor obtiene el resultado, sin embargo, no compra el objeto o producto físico que lo lleva a cabo. El consumidor paga por el tiempo de uso del objeto ⁽¹⁹⁾.
- **SPS orientado al resultado:** es cuando lo que se comercializa es una combinación entre productos y servicios de los que se obtiene un resultado final esperado por el consumidor. Este grupo de productos y servicios son de la empresa que los ofrece. En este sentido, el consumidor no mantiene relación con los costos de adquisición, uso y mantenimiento de los productos y del equipo ⁽¹⁹⁾.

Estas estrategias implementadas por la empresa tienen un impacto directo en la cadena de valor, promueve su desmaterialización lo que involucra un rediseño de la cadena de suministro y de las redes de distribución de la empresa, así como el replanteamiento de los actores económicos o “*stakeholders*”. Se debe tener claro quién es el usuario y cuáles son sus necesidades, de qué manera se le hará llegar el servicio y cuáles serán las ventajas para él, la compañía, la sociedad y el ambiente ⁽²⁵⁾.

SPS involucra que el proceso de diseño del objeto sea diferente al tradicional, puesto que se requiere cambiar de un pensamiento centrado en el objeto o en el usuario a uno de orden sistémico, donde se tomen

en cuenta los diversos factores que convergen a diferentes niveles ⁽¹⁹⁾. El diseñador debe apostar por maximizar la funcionalidad del objeto a través de un diseño más robusto y duradero. También se puede diseñar reduciendo el consumo energético y el consumo de recursos en el uso, considerando los procesos de reaprovechamiento de los componentes al final de la vida útil, y utilizando técnicas del ecodiseño como: diseño sistémico (SD), diseño modular, diseño para el desempeño (DfPe), diseño para el desensamble (DfD), diseño para la remanufactura (DfRm) ⁽¹⁸⁾, entre otros. Sin olvidar que se está diseñando no sólo un objeto sino una nueva forma de comercialización o modelo de intercambio siempre propiciando el uso frente a la posesión ⁽²⁵⁾.

En el caso de la fabricación se puede aplicar una producción enfocada al proceso que otorgue un bajo volumen y una alta variedad de combinaciones que se adecuen a las necesidades de diversos usuarios o consumidores como: customización masiva, líneas de ensamblaje, fabricación flexible, además de, plataformas para el mantenimiento, plataformas para el reciclaje y reutilización de piezas.

SPS ofrece la posibilidad de generar innovación, no solo tecnológica, sino a un nivel más profundo, representa un cambio en las relaciones de intercambio donde el valor lo tiene “el impacto” que el producto ofrece y no el producto por sí mismo, se reduce el consumo al cambiar la idea de que se debe ser dueño de algo para poder tener acceso a este resultado y se genera valor. Como lo menciona Manzinni ⁽²⁾:

“...es necesario repensar lo que son las empresas y cuáles son sus productos. De hecho, su única posibilidad de producir valor al reducir la cantidad de materiales y productos, mejorando la calidad de los contextos, es adoptar una nueva forma de mirar el mercado, la empresa y su papel dentro de ellos.”

(sic)(2)

SPS es un modelo de negocio que se apega más a nuestro contexto actual, donde el impacto al medio ambiente, ocasionado por los hábitos de consumo actuales, es cada vez más evidente, sin embargo, al ser un modelo de aplicación reciente aún tiene muchas barreras que deben trabajarse como las culturales, empresariales, sistémicas y regulatorias, por mencionar algunas ⁽¹⁹⁾.

Marco Teórico

Biotechnológico

2.6 Microalgas

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos que utilizan la luz solar y CO_2 para reproducirse. Su reproducción se da por división celular donde cada célula da origen a otra célula, y así sucesivamente. Las microalgas originalmente se encuentran en ecosistemas acuáticos, como en lagos, mares, manantiales, ríos y lagunas. En general, las algas contribuyen al balance de oxígeno en los ecosistemas acuáticos, donde gracias a ellas, se inicia el flujo de energía en estos ecosistemas ⁽²⁹⁾, con esto las microalgas son los organismos que más contribuyen al mantenimiento de la cadena trófica en medios marinos, ríos y lagos ⁽³⁰⁾.

En 1887, el alemán Victor Hensen utilizó por primera vez el término “plancton” para denominar a todas las partículas organogénicas que se mueven a merced de las aguas, lo que incluye un amplio grupo de microorganismos autótrofos microscópicos que figuran como primer eslabón en la cadena alimenticia ⁽²⁹⁾. El término “microalga” apareció posteriormente ligado al desarrollo biotecnológico, refiriéndose a aquellos microorganismos unicelulares que contienen clorofila y otros pigmentos fotosintéticos, capaces de realizar fotosíntesis oxigénica ⁽²⁹⁾. Se ha estimado que existen entre 70,000 a 1 millón de especies de microalgas, de las cuales se han identificado alrededor de 44,000 ^(31, 32).

El origen de las microalgas data de 3,500 millones de años atrás, tiempo en el que la atmósfera de la tierra se encontraba compuesta principalmente de bióxido de carbono e hidrógeno. Capaces de metabolizar el bióxido de carbono (CO_2) y generar oxígeno (O_2) como subproducto (fotosíntesis oxigénica) cambiaron la composición atmosférica completa del planeta llenándola de oxígeno ⁽³³⁾. Esto propició la evolución a nuevas formas de vida multicelular basadas en la respiración aeróbica (aprovechamiento de O_2), incluyendo a la humanidad ⁽³³⁾.

El metabolismo de las microalgas además de aprovechar la luz solar y el CO_2 , genera una gran cantidad de materia orgánica conocida normalmente como biomasa. Esta, se encuentra compuesta de proteínas, polisacáridos (ej. β -1,3-glucanos) lípidos, pigmentos (ej. β -caroteno, astaxantina, ficocianina, entre otros),

compuestos bioactivos, hidrógeno y biopoliésteres, entre otros. La producción de biomasa depende de una serie de condiciones específicas cuyos valores varían según la especie, de forma general, los factores que modulan su crecimiento son los siguientes ⁽²⁹⁾:

- Disponibilidad y concentración de nutrientes.
- Disponibilidad, calidad, orientación e intensidad de la luz ⁽²⁹⁾.
- Temperatura
- Salinidad del medio
- pH del medio
- Disponibilidad de CO₂ en relación con el O₂ disuelto en el medio.

La importancia de las microalgas a nivel biológico radica en su potencial para la captura de CO₂, manteniendo, como ya se mencionó, el equilibrio natural de la tierra. El nivel de fijación global de CO₂ por parte de las microalgas es muy cercano a la cantidad de CO₂ fijado por plantas terrestres ⁽³¹⁾. Se estima que las microalgas fijan más del 40% del carbón de la tierra, además de ofrecer a la biósfera una considerable porción de oxígeno ^(31, 34).

2.7 Usos y Aplicaciones de la Biotecnología de Microalgas

Numerosas investigaciones ponen de manifiesto el poder biológico de las microalgas para el propósito de producir diversos compuestos de interés comercial e industrial, debido a que en su cultivo no se utilizan tierras de cultivo, además, pueden emplearse diversos residuos como fuentes de nutrimentos ⁽³⁴⁾. Esta gran diversidad de sustancias orgánicas microalgales han sido ampliamente aprovechada por la industria química, farmacéutica y alimentaria para generar productos como alimentos, piensos para ganado, fibras, biocombustibles (ej. biodiesel, hidrógeno), fertilizantes orgánicos, nutracéuticos, pigmentos, fármacos, vacunas y medicinas ^(31, 35). Además, una de las aplicaciones más extendidas es el cultivo de microalgas en aguas residuales, donde se consigue obtener biomasa microalgal al mismo tiempo que se reduce la carga de contaminantes en el agua.

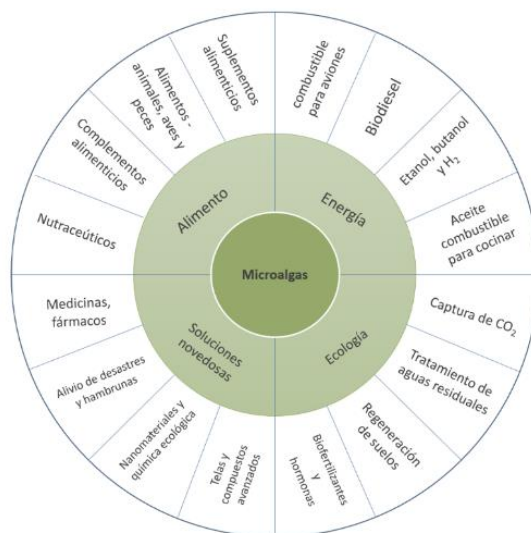


Figura 4. Se muestra un diagrama esquemático de la diversidad de aplicaciones y productos obtenidos a partir de las microalgas. Obtenido y traducido de (35).

Existen dos tipos generales de sistemas microalgales, los de cultivo cerrado y cultivo abierto, y su operación puede ser continua o discontinua (en lotes) ⁽³⁰⁾. La mayor parte del cultivo comercial de microalgas se realiza en sistemas abiertos; debido a que son menos costosos en su construcción y operación comparados con los sistemas cerrados o fotobiorreactores (FBR) ⁽³⁶⁾ (ver capítulo 3.1. Fotobiorreactores). Los sistemas de cultivo abiertos no cuentan con protección al medio ambiente, es decir, el cultivo se encuentra expuesto directamente a factores ambientales aumentando el riesgo de contaminación. Además, los sistemas de cultivo abierto abarcan grandes extensiones de área, varían en tamaño, forma, materiales y medios de agitación. Los sistemas abiertos más utilizados incluyen sistemas inclinados, tanques circulares y tanques tipo “raceway” ⁽³⁶⁾.

2.8 Especies Microalgales

De la gran diversidad de géneros microalgales, los de mayor interés biotecnológico y más utilizados en captura de CO₂ y aprovechamiento de su biomasa son: *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Chlorococcum*, *Haematococcus*, *Coelastrella*, *Dunaliella* y *Arthrospira* (Espirulina) (Tabla 1). Estas microalgas se caracterizan por poseer un crecimiento rápido, tolerancia a factores estresantes y tolerancia a altas concentraciones de CO₂ ⁽³⁷⁾, además, algunos de estos géneros se utilizan principalmente como suplementos nutricionales para humanos o aditivos alimenticios para animales ⁽³¹⁾.

Género/Especie	Iluminación	Temperatura óptima	Usos de Biomasa	Tolerancia al [CO ₂] (v/v)	Medios de cultivo
<i>Chlorella vulgaris</i> Microalga chlorophyta (verde) dulceacuícola Ø: 2.0 - 10 µm ⁽³⁷⁾	3200 lux máx., luz fría 12h luz / 12 h obscuridad ⁽²⁹⁾	20 °C -37 °C ⁽²⁹⁾	Fertilizantes, alimento, producción de biodiesel, producción de biogás.	15 ⁽³⁷⁾ -40% ⁽³⁴⁾	Bold's Basal Medium, Bayfolan forte, Bold 3N Modificado, Bristol.
<i>Arthrospira máxima</i> (Espirulina) Cianobacteria cosmopolita	1000 lux, luz fría. 12h luz / 12 h obscuridad	36 °C-38 °C	Alimentación humana y de animales, Biofertilizantes, Cosméticos	12 ^(37,38,39) %	Medio especial para Spirulina, Medio Jordan modificado, diversas variantes
<i>Scenedesmus sp.</i> género de algas verdes, de la clase Chlorophyceae	3200 lux (máximo), luz fría. 12h luz / 12 h obscuridad	20° C - 26° C	Producción de Biodiesel, tratamiento de aguas residuales, fijación de CO ₂	80% ⁽³⁴⁾	Guillard's F/2, Bayfolan forte
<i>Chlorococcum</i>	12h luz / 12 h obscuridad	22-30 °C ⁽⁴⁶⁾	Astaxantinas	40% ⁽³⁷⁾ – 70% ^(34, 39)	Bristol, BBM
<i>Dunaliella salina</i> Microalga chlorophyta (verde) salina	3200 lux (máximo)	20 °C	Cosméticos, suplementos nutricionales. Producción de carotenoides: betacaroteno.	12% ⁽⁴⁰⁾	2X Medio de Erdschreiber (2X ERD)
<i>Coelastrella sp.</i> Microalga chlorophyta (verde) dulceacuícola	Luz fría, 12h luz / 12 h obscuridad	32 ° C Hasta 50°C ⁽⁴¹⁾	Producción de astaxantinas, luteínas y β- carotenos	10% ⁽⁴²⁾	Medio BG-11, Bold 3N
<i>Haematococcus pluvialis</i> Microalga chlorophyta (verde) dulceacuícola Ø: 3.5 – 5.0 µm	3200 lux máx., luz fría 12h luz/12 h obscuridad. Bajo condiciones de estrés lumínico (20,000 lux) forma aplanosporas que concentran astaxantina.	25 °C	Clasificación FDA: GRAS (<i>Generally Recognized as Safe</i>). Aprobada para consumo humano en 2017. Producción de Astaxantinas	16 - 34% ⁽³⁷⁾	Bold's Basal Medium, Bold 3N Modificado, Bristol

Tabla 1. Tabla comparativa de especies de microalgas clasificadas por sus características: consumo de CO₂, versatilidad en el uso de la biomasa, condiciones de crecimiento. Ø: diámetro celular.

De las especies enlistadas en la Tabla 1 se detalla la descripción de *Chlorella vulgaris* y *Arthrospira máxima*, debido al valor biológico alimenticio de la biomasa.

Chlorella vulgaris

La microalga *Chlorella vulgaris* es una de las especies más investigadas en relación con la extracción de sustancias biológicamente activas para suplementos alimenticios, esto debido a las cualidades de su biomasa la cual puede llegar a conformarse de un 50-56% de contenido proteico ⁽²⁹⁾. Sus células presentan formas esféricas con diámetros no mayores a 10 μm (figura 5), y normalmente habitan en lagos o estanques ⁽³⁷⁾. Esta microalga, aunque ofrece grandes ventajas desde un punto de vista nutricional, la biomasa que desea utilizarse para la alimentación debe someterse previamente a un tratamiento de ruptura celular, con esto se exponen las proteínas celulares facilitando su digestibilidad ⁽²⁹⁾.

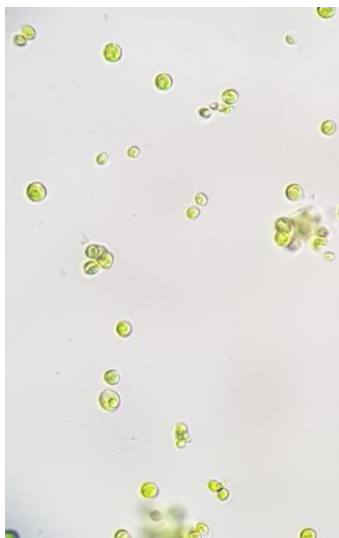


Figura 5. Microfotografía celular de Chlorella vulgaris; aumento 100x microscopio óptico. Fuente Autor: Ing. Alberto Vázquez, laboratorio T-166, área de Ing. Química UAM-I.

Por otra parte, *C. vulgaris* ha sido estudiada ampliamente en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y generación de biofertilizantes a partir de la biomasa producida. Así como para la extracción de lípidos microalgales para la producción de biodiesel. La capacidad de biofijación de CO_2 por parte de *Chlorella vulgaris* se ha registrado en promedio 1.4 g/l/día ⁽³⁷⁾, dependiendo de las condiciones. Existen

diferencias significativas en la concentración de biomasa cuando se administra CO₂ en combinación con aire al cultivo ⁽³⁷⁾.

Los cultivos de *Chlorella vulgaris* crecen en laboratorio (condiciones típicas de crecimiento) con una iluminación de 3,200 lux proporcionada por tubos fluorescentes de 36W, con fotoperiodo de 12 h luz :12 h oscuridad, y a una temperatura ambiente o en cámara controlada de 18°C ± 2°C y aireación constante a un flujo promedio de 2 l/min ⁽²⁹⁾.

Arthrospira máxima (Espirulina)

Arthrospira máxima no es propiamente una microalga, sino que pertenece a un grupo de microorganismos llamados cianobacterias (células procariotas), sin embargo, debido a su alto parecido metabólico a las microalgas eucariotas normalmente se les denomina “microalgas verdeazuladas”. Este microorganismo fotosintético posee clasificación de seguridad clase A otorgada por la *United States Food and Drug Administration* (FDA) ⁽⁴³⁾ y es una de las especies que actualmente posee mayor valor comercial al utilizarse principalmente como alimento debido a su alto contenido de proteínas (60-70%) ^(5,35,45), ficocianina, β-caroteno (contenido 30 veces mayor al de la zanahoria) ⁽⁴⁵⁾, vitamina E, superóxido dismutasa, clorofila y otros minerales ^(31,35,43,45). Aunado a esto, se ha reportado que los géneros *Arthrospira* son una fuente importante de ácido linoleico, un ácido graso esencial para el humano que aún no es posible sintetizar artificialmente ⁽³¹⁾. En cuanto a minerales, esta cianobacteria contiene hierro, magnesio, calcio y fósforo ⁽⁴⁵⁾ (tabla 2). La mayor parte de la biomasa de Espirulina se procesa y puede consumirse como pasta fresca, polvo o cualquier otra presentación de suplementos alimenticios ^(31,35). Espirulina es conocida por ayudar en la correcta función del tracto digestivo y contribuir a mantener la salud de la flora intestinal ⁽³¹⁾. La ingesta típica de Espirulina es de 1 a 5 g al día antes o durante las comidas ^(31,35,43).



Figura 6. Microfotografía celular de Arthrospira máxima, aumento 100x microscopio óptico. Fuente Autor: Ing. Alberto Vázquez, laboratorio T-166, área de Ing. Química UAM-I.

Numerosas investigaciones ^(5, 35, 43, 45) reportan diversos beneficios derivados de la ingesta diaria de Espirulina, entre ellos:

- Sirve como estimulante del sistema inmunológico ^(5,35,45)
- Previene la depresión ⁽⁴⁵⁾
- Previene la diabetes ⁽⁴⁵⁾
- Mejora la actividad mental al incrementar los niveles de ácido ribonucleico en el cerebro ^(5,45)
- Posee efectos antiinflamatorios ^(5,45)
- Estimula el metabolismo y la digestión ^(5,35,45)
- Ayuda a mantener la salud cardiovascular ^(5,45)
- Contiene una gran cantidad de antioxidantes que ayudan a prevenir el cáncer ⁽⁵⁾

Debido a sus propiedades la Espirulina ha llamado la atención de diversas organizaciones a nivel mundial como las Naciones Unidas que han catalogado a la Espirulina como el alimento más ideal para la humanidad ⁽⁵⁾ o la Conferencia Mundial de la Alimentación y el departamento de agricultura de los Estados Unidos de América que la definieron como el mejor alimento para el futuro ⁽⁵⁾.

Componente	Valor Nutricional (mg)	Componente	Valor Nutricional (mg)
Proteína Vegetal	63,000	Calcio	1,000
Carbohidratos	22,000	Fósforo	800
Grasa	2,200	Magnesio	400
Minerales	8,000	Hierro	58
Fibra	7,000	Zinc	3
Vitamina A	212	Cobre	1.2
Clorofila	600	Manganeso	0.5
Vitamina E	10	Cromo	0.03
Vitamina B1	3.5	Potasio	1.4
Vitamina B2	0.4	Ácido Gamma-linoleico	1
Vitamina B3	1.3	Vitamina B8	0.005
Vitamina B5	0.2	Vitamina B9	0.05
Vitamina B6	6	Vitamina B12	0.35

Tabla 2. Tabla nutrimental de la Espirulina por cada 100g. Obtenido y Traducido de (45)

Actualmente el cultivo industrial a gran escala de la Espirulina se encuentra muy difundido. Este alimento puede encontrarse en forma de pasta fresca, polvo, tabletas o en combinación con otros alimentos como galletas, pan, cereales, pastas, etc. ⁽⁵⁾.

El cultivo *Arthrospira máxima* (Espirulina) se da normalmente en cultivos abiertos o *raceways*, aunque en condiciones controladas de laboratorio o en cultivos cerrados (fotobiorreactores) crecen con una iluminación de $200 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con un fotoperiodo de 12 h luz :12 h oscuridad, y a una temperatura ambiente o en cámara controlada de $34^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y aireación constante a un flujo promedio de 2 L/min ⁽⁴⁴⁾.

Capítulo III

Estado del Arte

3.1. Fotobiorreactores

Un fotobiorreactor (FBR) se define como un sistema cerrado para el cultivo de microalgas en el cual ocurren de forma controlada las reacciones fotosintéticas. Los FBR's limitan el intercambio directo de gases y contaminantes entre el cultivo y la atmósfera ⁽⁴⁷⁾. Un factor importante es que para la mayoría de las especies de microalgas su cultivo sólo puede lograrse bajo condiciones controladas y aisladas del ambiente, esto para reducir el riesgo de contaminación y proliferación de otras especies microalgales u otros microorganismos ⁽⁴⁸⁾. Este control estricto de condiciones sólo puede lograrse a través del uso de sistemas de cultivo cerrado o FBR's.

Régimen de cultivo	Fuente de energía	Fuente de Carbono	Disponibilidad de luz requerida	Variabilidad en el metabolismo	Sistema Biorreactor	Costo	Retos
Fototrófico	Luz	Inorgánica	Indispensable	Sin cambio entre fuentes	Sistemas abiertos y cerrados	Bajo	Baja densidad celular, Alto costo de condensación, Problemas de escalabilidad
Heterotrófico	Orgánica	Orgánica	No requerida	Con cambio entre fuentes	Biorreactores de tanque agitado	Medio	Contaminación, Alto costo en sustratos
Fotoheterotrófico	Luz	Orgánica	Indispensable	Con cambio entre fuentes	Fotobiorreactores cerrados	Alto	Contaminación, Equipamiento de costo elevado, Altos costos en sustratos
Mixotrófico	Luz y orgánica	Inorgánica y orgánica	No indispensable	Consumo simultáneo	Fotobiorreactores cerrados	Alto	Contaminación, Equipamiento de costo elevado, Altos costos en sustratos

Tabla 3. Se muestra una comparación de diferentes regímenes y sistemas de cultivo, y sus relaciones. Obtenido y traducido de (31).

Existe una variedad de geometrías y configuraciones que aportan cualidades diferentes de rendimiento, mantenimiento, coste-beneficio y viabilidad, según sea el caso. La mayoría de estas configuraciones se encuentran bastante estudiadas y parametrizadas en la investigación biotecnológica o industrial por medio de modelos matemáticos que describen los fenómenos desarrollados en el interior de estos sistemas. Estos parámetros específicos se encuentran relacionados a la geometría del reactor, materiales de construcción, especie de microalga utilizada y agitación.

Parámetro	Sistema Abierto	Sistema Cerrado
Espacio requerido	Alto	Bajo
Relación Área/Volumen	Bajo (5-10 m ⁻¹)	Alto (20-200 m ⁻¹)
Control sobre proceso	Complicado	Sencillo
Pérdidas de CO ₂	Altas	Bajas
Pérdidas de Agua	Muy Altas	Bajas
Temperatura	Alta variabilidad	Enfriamiento requerido
Control en transferencia de gas	Bajo	Alto
Estrés hidrodinámico sobre microalga	Muy Bajo	Bajo-Alto
Dependencia en el clima	Alto	Bajo
Calidad de la Biomasa	Variable	Reproducibile
Eficiencia en el uso de luz	Pobre	Excelente
Riesgo de contaminación	Alto	Bajo
Productividad	Muy bajo	Moderadamente Alto*
Densidad celular	Bajo	Alto
Especies de algas cultivables	Limitado a pocas especies microalgales	Muy alto. La mayoría de especies microalgales
Gastos de capital	Bajos	Altos
Gastos de operación	Bajos	Altos
Escalamiento	Fácil	Complicado
Limpieza	Ninguna	Requerida
Eficiencia en cosecha	Bajo	Alto
Costo de cosecha	Alto	Bajo
Parámetros más costosos	Mezclado	Control de oxígeno y temperatura
Mantenimiento	Simple	Complejo

Tabla 4. Se enlistan las ventajas y desventajas de ambos tipos de sistemas de cultivo, fotobiorreactores y sistemas abiertos. Obtenido y traducido de (31).

Fotobiorreactores de placa plana

Los FBR's de placa plana o "flat-plate" se caracterizan por poseer una alta relación área-volumen, esto permite una gran incidencia de luz sobre su superficie, lo que conduce a la obtención de altas eficiencias fotosintéticas ^(49,50). Estos se componen de dos placas paralelas verticales del mismo tamaño separadas entre sí. La iluminación puede lograrse de forma artificial o directamente al sol, en cualquiera de ambos casos es necesario calcular la cantidad de luz recibida para definir la distancia entre las placas (trayectoria de luz) ⁽⁴⁹⁾.

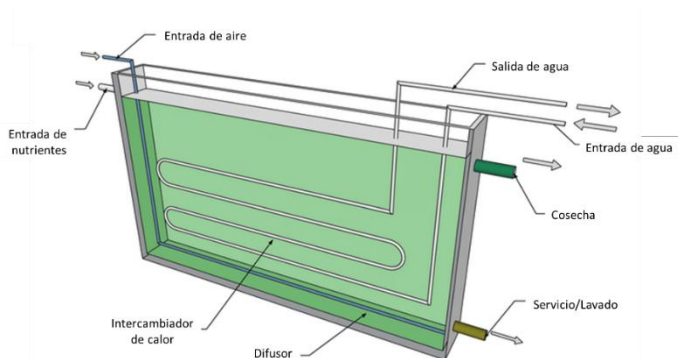


Figura 7. Se muestra el esquema general de un fotobiorreactor de placa plana. Obtenido y traducido de (51).

La zona de mayor incidencia de luz se encuentra en la superficie del reactor, de ahí la cantidad de luz comienza a disminuir conforme avanza hacia el centro del reactor debido al auto ensombrecimiento por las células del cultivo. Por este motivo, es importante mantener el cultivo en constante movimiento, permitiendo que las células se mantengan en flujo continuo que les permita moverse de la zona de luz a la zona de obscuridad constantemente, mejorando la eficiencia fotosintética y evitando fotoinhibición debido a un exceso de incidencia lumínica a solo una parte del cultivo ⁽⁴⁹⁾.

La agitación del cultivo se logra mediante la inyección de burbujas de aire desde la parte inferior del reactor a través de un tubo perforado o al girar el reactor mecánicamente por la acción de un motor (rueda de paletas) ⁽⁴⁷⁾. Los componentes clave de un FBR de placa plana incluyen: una entrada de agua, una salida de agua, una entrada de gas (aire-CO₂) y una salida de recolección de biomasa (Figura 7).

Este tipo de fotobiorreactores se fabrican normalmente de acrílico, policarbonato o vidrio. Son fácilmente escalables y pueden funcionar en modo continuo al conectar varios módulos en serie con recirculación continua de flujo ⁽⁵²⁾.

Fotobiorreactores tubulares

Los fotobiorreactores de tipo tubular normalmente consisten en un arreglo de tubos rectos de algún material transparente de plástico o de vidrio borosilicato ⁽⁵³⁾. Estos tubos normalmente tienen un diámetro no mayor a 10 cm debido a que diámetros mayores, la concentración de biomasa impide la penetración de la luz ⁽⁵³⁾. El cultivo de microalgas que fluye a través de los tubos recibe la luz del sol y pasa a un tanque auxiliar donde se realizan mediciones y control de parámetros como pH, temperatura del cultivo, inóculo de nutrientes y, además, aquí se da el intercambio de gases -desgasificación de O₂ e incorporación del CO₂ al medio- ⁽⁵³⁾ ⁽⁵⁴⁾. El flujo de recirculación se mantiene constante para permitir que todo el volumen del cultivo pase por la zona fotosintética y la zona de control de parámetros.

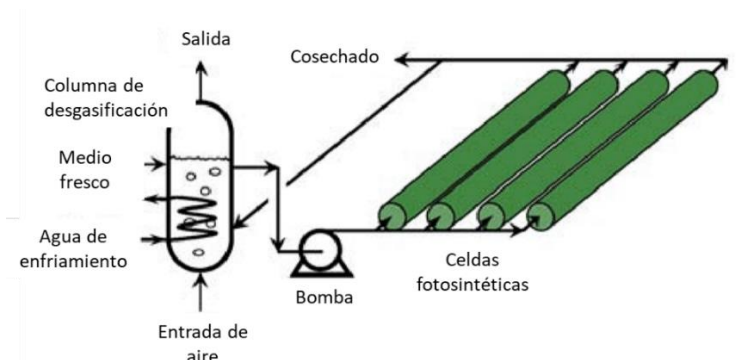


Figura 8. Se muestra diagrama general de un fotobiorreactor tipo tubular. Obtenido y traducido de: (53,54)

Los FBR's tubulares se pueden encontrar en diferentes configuraciones, pueden ser horizontales, en forma de serpentin, verticales, cónicos o inclinados ⁽³¹⁾, siempre y cuando, el arreglo elegido no obstaculice el paso de luz y permita que todo el FBR reciba la cantidad de luz adecuada. Ese tipo de FBR's aún presentan algunos inconvenientes como bajos índices de transferencia de masa, esto ocasiona altos gradientes de O₂ disuelto en el medio, lo que afecta la disponibilidad de CO₂ alrededor de las células y afecta el crecimiento de la microalga por un efecto foto-oxidativo ^(31,53,54).

Fotobiorreactores de tubo vertical (airlift)

Los FBR's de tubo vertical, columna de burbujas o "airlift" se componen de un cilindro transparente dispuesto verticalmente en el que la aireación se logra al inyectar CO₂ o aire a través de la parte inferior de la columna, el ascenso de las burbujas genera corrientes de mezclado y facilita que todo el cultivo rote y reciba la cantidad de luz adecuada. Este tipo de FBR's generalmente tienen el fondo en forma de cono para

evitar la sedimentación de las células ⁽⁴⁷⁾, al mismo tiempo que sirve como sistema de cosechado o separación de biomasa por decantación. En ocasiones, se incluye un tubo interior dispuesto de forma concéntrica que divide el flujo en corriente arriba y corriente abajo generando la rotación del cultivo y mejorando el mezclado.

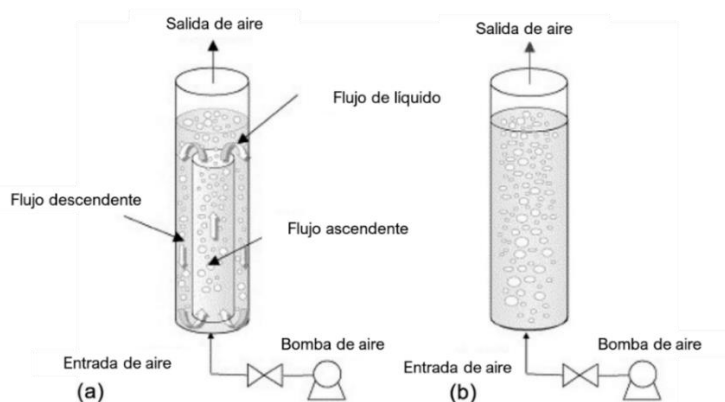


Figura 9. Se muestra el esquema general de un fotobiorreactor (a) tipo Airlift y (b) tipo columna de burbujas. Obtenido y traducido de (54,55)

Existen dos configuraciones generales de agitación del medio para este tipo de FBR's, una donde el medio se recircula internamente y otra donde el flujo de medio se da externamente. El diámetro de las burbujas de gas entrante debe ser muy pequeño para asegurar el intercambio de gases (CO_2 consumido y O_2 producido) en el medio, con esto se logra maximizar la eficiencia fotosintética, aumentando el índice de transferencia de masa dentro del reactor.

3.2. Criterios de Diseño

Independientemente del tipo de fotobiorreactor que se escoja es necesario tener en cuenta aspectos generales para el correcto funcionamiento de estos sistemas. Las microalgas, como ya se mencionó anteriormente, son sistemas abiertos que necesitan de parámetros específicos para reproducirse, por lo que cada especie diferente de microalga requiere de un diseño específico. No es posible cultivar todas las especies en un solo tipo de FBR y bajo los mismos parámetros. Es de vital importancia mantener un monitoreo constante de los parámetros dentro del sistema, su evolución e interrelación para lograr una buena optimización de los procesos.

Existen criterios generales que debe cumplir un sistema FBR para asegurar que funcione lo más óptimo posible, sin embargo, debido a que la mayor parte de estos parámetros dependen directamente de la

geometría del tanque del FBR, los modelos matemáticos que describen y predicen ciertos fenómenos como área iluminada y cantidad de luz por cm^3 , transferencia de gases, transferencia de energía (calor), agitación y mezclado, cambian dependiendo del tipo de FBR o la configuración geométrica que se elija (ver capítulo 3.1).

Cinética de crecimiento

La cinética de crecimiento describe el comportamiento del crecimiento de los microorganismos durante su ciclo de vida y bajo ciertas condiciones. Esta cinética de crecimiento depende de variables como la intensidad de luz, cantidad de CO_2 disponible en el medio, nivel de pH, temperatura, oxígeno disuelto en el medio, concentración del inóculo inicial, concentración de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y micronutrientes ⁽⁵²⁾.

La ecuación de Monod (ecuación 1⁽⁵¹⁾) es el modelo matemático que se utiliza para describir el crecimiento de microorganismos en medios acuosos en relación con la concentración de nutrientes presentes en el medio.

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

Donde μ es la tasa de crecimiento específica de las microalgas, μ_{max} es la tasa de crecimiento específica máxima y L_k es la constante de saturación lumínica ⁽⁵¹⁾. En el caso de la ecuación 1, ésta se encuentra adaptada para el crecimiento microalgal de acuerdo con la intensidad lumínica, aunque también puede encontrarse adaptada para la concentración de sustrato, CO_2 o contaminantes.

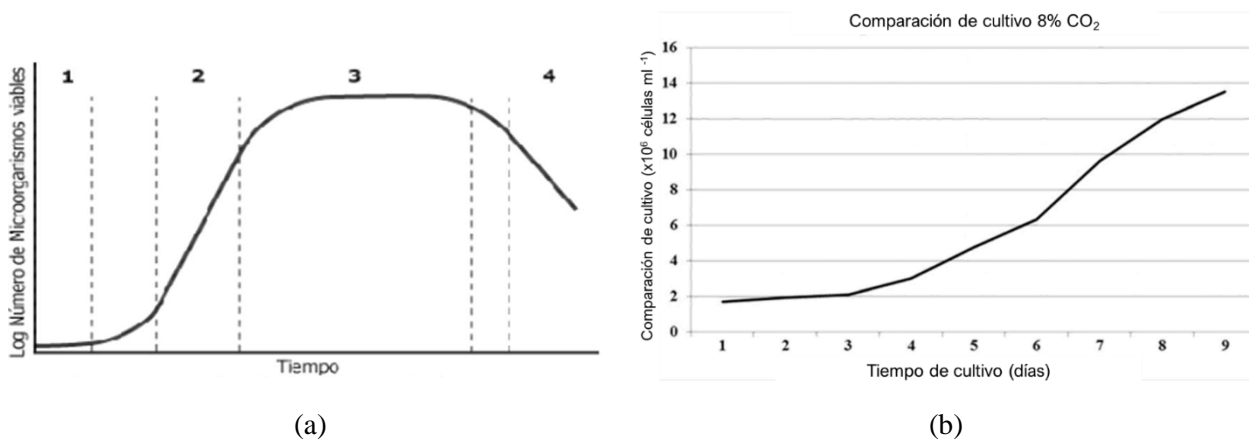


Figura 10. (a) Curva de proliferación típica de una población de microorganismos. Obtenida de (88). (b) Curva de crecimiento de *Chlorella vulgaris* durante 10 días de cultivo. Obtenida y traducida de (37).

La curva que describe el crecimiento de microorganismos posee 4 regiones principales llamadas fases de crecimiento (figura 10 (a ⁽⁸⁸⁾, b ⁽³⁷⁾)). La primera es la fase de adaptación o latencia (1) donde los microorganismos se encuentran en adaptación al nuevo medio y a las condiciones de cultivo (luz, temperatura, etc.), no hay reproducción celular, sólo actividad metabólica previa a la reproducción. La fase de crecimiento exponencial (2) se da cuando las células ya se han adaptado y comienzan a reproducirse a una velocidad que aumenta de forma exponencial. La fase estacionaria (3) se da cuando el cultivo llega a una etapa de saturación poblacional o los recursos se han agotado lo que da paso a la fase de muerte (4) que se caracteriza por una disminución de la población microalgal debido a la falta de nutrientes o saturación de metabolitos secundarios.

Sin embargo, debido a que el crecimiento de las microalgas es altamente complejo y depende de la relación de diversas variables, los modelos que describen su cinética de crecimiento pueden relacionarse matemáticamente con otros parámetros. Para el caso de la ecuación (2) ⁽⁵²⁾, donde el objetivo fue determinar el efecto de la intensidad de luz en el cultivo, se realiza un acomodo de la ecuación de cinética de crecimiento en relación con la intensidad de luz recibida por el FBR ⁽⁵²⁾.

$$\mu = \mu_{max} * \frac{I_{av}}{I_{opt}} * e^{\left(1 - \frac{I_{av}}{I_{opt}}\right)} * \left(\frac{pCO_2}{K_s + pCO_2 + \frac{pCO_2^2}{K_i}}\right) \quad (2)$$

Donde I_{av} es la intensidad de luz expresada como densidad de flujo de fotones, I_{opt} es la intensidad de luz en la cual $\mu = \mu_{max}$, pCO_2 representa la presión parcial del dióxido de carbono, K_s y K_i son la constante de velocidad media y la constante de inhibición, respectivamente ⁽⁵²⁾.

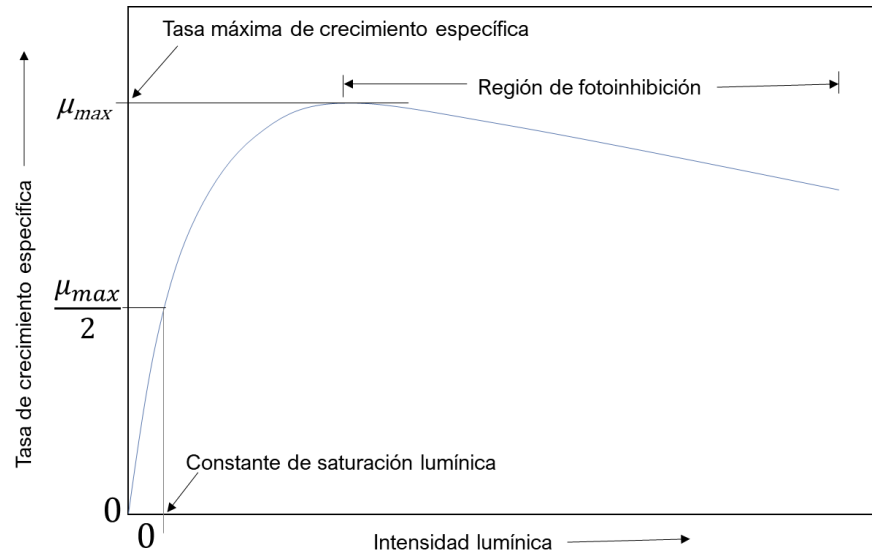


Figura 11. Efecto de la intensidad de luz en la tasa de crecimiento específica en microalgas. Obtenida, adaptada y traducida de (53).

Sin embargo, la intensidad de luz tiene un límite donde los receptores tilacoidales en el cloroplasto se saturan y estropean de manera irreversible lo que causa fotoinhibición. La saturación lumínica es caracterizada por una constante de saturación que indica la intensidad de luz a la cual la tasa de crecimiento específica de biomasa es la mitad de su valor máximo ($\mu_{m\acute{a}x.}$) (figura 11) ⁽⁵³⁾. Esto quiere decir que, por encima de cierto valor de intensidad lumínica la producción de biomasa se ve reducida, esto se conoce como fotoinhibición ⁽⁵³⁾.

Relación superficie/volumen (s/v)

La relación superficie/volumen es de gran importancia pues marca la relación que existe entre la cantidad de luz que puede absorber el cultivo a través de la superficie iluminada por cada unidad de volumen ⁽⁴⁷⁾. Normalmente, cuanto mayor es la relación s/v, mayor es la concentración celular que puede operarse en el FBR lo que aumenta la productividad volumétrica del cultivo ⁽⁴⁷⁾. Por esto se debe asegurar que la luz se administre en una longitud de onda, intensidad y duración apropiadas ⁽⁵²⁾. La ecuación que describe la absorción de luz es la denominada Ley de Lambert y Beer (ecuación 3⁽⁵²⁾).

$$I(z)=I_0e^{-\alpha Xz} \quad (3)$$

Donde z es la profundidad del FBR, X es la densidad celular microalgal, α es el coeficiente de absorción, $I(z)$ es el valor de la irradiancia sobre la longitud z , y I_0 es el valor de la irradiancia desde la fuente de luz ⁽⁵²⁾.

Se debe tener en cuenta que la irradiancia no es homogénea dentro del reactor debido al auto ensombrecimiento provocado por las células, lo que ocasiona que la cantidad de luz se reduzca de manera exponencial a través del cultivo y se vuelve difícil de predecir, en contramedida se puede utilizar un valor promedio de la intensidad de radiación ^(47, 52).

Control de temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más relevantes debido a que las especies microalgales son sensibles a ésta, tanto temperaturas muy altas como muy bajas pueden afectar la productividad del sistema o generar muerte celular. Una baja temperatura y alta irradiancia de luz genera fotoinhibición de las células lo que afecta la productividad. Si la temperatura es muy alta, ocasionada por la radiación solar, se requiere enfriar el sistema para evitar la muerte celular, esto se puede lograr con sistemas de enfriamiento automáticos a través de intercambiadores de calor o el sombreado, inmersión en baños de agua o rociado exterior con agua ⁽⁴⁷⁾.

Mezclado

El proceso de mezclado es de vital importancia, debido a que este parámetro es el encargado de asegurar que las células tengan nutrientes disponibles a su alrededor, además asegura el intercambio de gases: la liberación del oxígeno disuelto en el medio y asegura que el CO₂ entrante alcance la pared celular de las microalgas. Además, evita la sedimentación de la biomasa, genera un corriente que ayuda a las células a recibir periodos de luz y obscuridad adecuados ⁽⁴⁷⁾ y se encuentra relacionado a la distribución de energía en forma de calor en todo el medio.

El mezclado puede realizarse de diversas maneras, puede utilizarse el sistema de inyección de aire como sistema de mezcla, o también pueden adicionarse paletas de mezclado o a través de un refluo del volumen del contenedor.

3.3. Biofijación de CO₂

Eficiencia fotosintética

Como ya se ha mencionado, las microalgas poseen un gran potencial para la captura de CO₂. Estos microorganismos crecen de 10-15 veces más rápido que las plantas terrestres ^(37, 56). La diferencia radica principalmente en la ausencia de raíces, hojas y tallos, lo que significa que no invierten grandes cantidades de energía en la generación de estructuras, sino que la mayor parte de la energía se ocupa para el crecimiento y reproducción celular lo que lleva a una rápida concentración de biomasa ^(37, 56).

En el proceso de fotosíntesis el CO₂ es transformado en azúcares. Entre más eficiente sea el proceso de fotosíntesis dentro del reactor mayor será el consumo de CO₂ ⁽³⁷⁾. La eficiencia fotosintética puede variar según la especie de microalga, por ejemplo, para *Spirulina sp.* es de 3% mientras que para *Chlorella sp.* es de 20% ⁽³⁷⁾. Algunos géneros microalgales tales como *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Spirulina*, *Nannochloropsis* y *Chlorococcum* se caracterizan por poseer un rápido crecimiento, alta tolerancia a factores estresantes, y tolerancia a altas concentraciones de CO₂ ⁽³⁷⁾.

El diseño de un fotobiorreactor debe contemplar dos parámetros críticos y de gran relevancia en la remoción y captura del CO₂, [1] la tasa de transferencia de masa y [2] las condiciones de mezclado, estas dos variables se encuentran íntimamente relacionadas ⁽⁵⁷⁾. Altas concentraciones de oxígeno disuelto (OD) en el medio en combinación con altas intensidades lumínicas pueden ocasionar daño causado por fotooxidación en las células inhibiendo su crecimiento ^(53, 57). Es aquí donde la eficiencia del sistema de agitación y el diseño del tanque juegan un papel importante en el intercambio de gases dentro del reactor, lo que permite la liberación del oxígeno producido al ambiente ⁽⁵⁷⁾. La productividad fotosintética neta puede estimarse mediante la velocidad de liberación de O₂ ó de consumo del CO₂ ⁽⁵⁷⁾.

En algunos estudios se asume que 1 kg de biomasa producida captura alrededor de 1.8 kg de CO₂ ^(37, 39, 57). Aunque este método de cálculo simplificado sirve para hacer una primera estimación, es inexacto ⁽³⁷⁾. Si se desea contar con datos más exactos sobre el consumo de CO₂ por parte de una especie de microalga específica se requiere realizar un análisis de consumo de CO₂ en condiciones de laboratorio. Al conocer la cantidad de biomasa producida, la productividad y el consumo de CO₂ pueden calcularse con la siguiente ecuación ⁽³⁷⁾:

$$\text{BiofijaciónCO}_2 = C * P * \left(\frac{MCO_2}{MC}\right) \quad (4)$$

Donde “C” es la cantidad de carbono contenido en la biomasa, “P” es la productividad, MCO_2 es la masa molar de la molécula de bióxido de carbono, y MC es la masa molar del átomo de carbono ⁽³⁷⁾.

La eficiencia en la fijación de CO_2 se ve afectada por los siguientes parámetros: concentración de CO_2 en el cultivo, la especie de microalga, temperatura, pH, y fotoperiodo, aunque en menor medida, pero también se ve afectada por el tamaño y geometría del reactor ^(37, 57).

Transferencia de Masa

En la optimización del cultivo de microalgas es necesario evaluar la cantidad de bióxido de carbono (CO_2) que se encuentra entrando a las células, así como la cantidad de oxígeno (O_2) que se encuentra disuelto en el medio ⁽⁵²⁾. Debido a que el oxígeno se produce en la fotosíntesis, éste puede llegar a saturar el medio impidiendo la transferencia de CO_2 hacia las células ocasionando inhibición. Para hacer esta evaluación es necesario conocer los coeficientes de transferencia de masa dentro del reactor.

La ecuación más comúnmente utilizada es ⁽⁵²⁾:

$$N_{CO_2} = K_L a \cdot (C_{CO_2^*} - C_{CO_2}) \quad (5)$$

Donde N_{CO_2} es el flujo de moles transferido del gas al medio líquido, la concentración de CO_2 en el equilibrio (CO_2^*), de acuerdo con la ley de Henry, es de 0.1525 g/l a 25°C. $K_L a$ es el coeficiente volumétrico de transferencia de masa ⁽⁵²⁾.

La fracción retenida de gas o “gas hold-up” (ϵ) se obtiene de la siguiente ecuación ⁽⁵²⁾:

$$\epsilon_G = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad (6)$$

Existen diversas técnicas para medir la concentración de oxígeno disuelto en el medio, los métodos químicos y los métodos físicos. Los métodos químicos incluyen: Método de oxidación de sulfito de sodio, Método de absorción de CO₂ en disolución alcalina y también, se puede medir de manera indirecta al cuantificar la producción oxígeno por medio de reactivos químicos. Este tipo de métodos no son muy recomendables debido a los cambios fisicoquímicos que experimenta el medio al reaccionar con los reactivos de la prueba ⁽⁵⁸⁾. Los métodos físicos emplean la medición por medio de un sensor de oxígeno disuelto en el medio. Este tipo de mediciones dependen de la rapidez de la respuesta del sensor para dar una lectura lo más correcta posible ⁽⁵⁸⁾.

3.4. Simulación Matemática

Los métodos numéricos son una herramienta matemática para el análisis científico y tecnológico. Su desarrollo y aplicación computacional han permitido plantear soluciones aproximadas a problemas de gran complejidad donde no es posible resolverse, a través de soluciones analíticas, sistemas de ecuaciones no lineales a niveles descriptivos o predictivos. Son herramientas poderosas para la toma de decisiones informadas al realizar una propuesta de diseño y pueden ser ocupadas en diferentes etapas del desarrollo.

Método	Fundamento	Aplicaciones
Elementos Finitos (FEM)	Geometría espacial discretizada en puntos como dominio continuo del problema ⁽⁵⁹⁾	Geometría sometida a cargas y restricciones ⁽⁵⁹⁾ Análisis estructural de desplazamientos, deformaciones, tensiones, resistencia, rigidez o fatiga ¹ Transferencia de calor ⁵⁹ Electromagnetismo Sismología
Volúmenes Finitos (FVM)	Geometría espacial discretizada en volúmenes de tamaño finito. Conforman un volumen de control evitando su traslape con lo de los puntos adjuntos	Ingeniería hidráulica CFD Ingeniería Química Magnetohidrodinámica Transferencia de Calor
Diferencia Finitas (FDM)	Espacio discretizado en puntos donde la solución está definida	Redes neuronales artificiales Meteorología Sismología Ingeniería Química

Tabla 4. Se muestran las familias generales de métodos (mesh-based) para solución numérica de EDPs.

Su implementación en cómputo científico es ampliamente reconocida a través de lenguajes de programación y discretización de formulaciones matemáticas se puede llegar a aproximaciones bastante cercanas a la realidad.

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacionales es una herramienta de cómputo que forma parte de los denominados Métodos de Volúmenes Finitos (FVM) y Elementos Finitos (FEM), estos son ampliamente utilizados en la optimización de FBR's. Los métodos de modelado y simulación matemática CFD se utilizan en el análisis de parámetros hidrodinámicos como turbulencia, propiedades de mezcla ⁽⁶¹⁾, estrés hidrodinámico de las células, tasas de transferencia de masa, transferencia de energía (momento, calor), retención de gas (gas hold-up) y funciones biológicas de las microalgas ⁽⁶⁰⁾ relacionados a la geometría del tanque o contenedor del FBR. Estas técnicas emplean métodos numéricos para la resolución de Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDE's) que representan las leyes de conservación de masa, momento y energía aplicadas a un volumen de control infinitesimalmente pequeño ubicado en un fluido en movimiento ^(62,63).

El planteamiento de estas soluciones generalmente son adecuaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes para momento, masa y energía.

Navier–Stokes momentum equation (*convective form*)

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) + \zeta (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} + \rho \mathbf{g}.$$

Ecuación 7. Ecuación de momento Navier-Stokes. Obtenida de (64).

Además de describir las propiedades de flujo dentro del reactor, esta herramienta ayuda a identificar factores limitantes críticos tales como un mezclado insuficiente que derive en una transferencia de nutrientes o gases ineficientes limitando el crecimiento de la biomasa microalgal ⁽⁶³⁾. Sin embargo, ya que las células microalgales poseen una resistencia limitada al estrés hidrodinámico, este tipo de herramientas puede ayudar a encontrar la relación entre la agitación (cantidad de energía suministrada al sistema) y el riesgo de potencia excesiva que derive en un rompimiento de las células a niveles críticos de esfuerzos cortantes.

El procedimiento básico para la realización de un análisis CFD puede dividirse en preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento ⁽⁶³⁾. De manera general, el primer paso consiste en la generación de la geometría a través de modelado 2D o 3D y la generación de la malla, planteamiento del modelo matemático, determinación de condiciones iniciales y de frontera. Así como, la determinación de factores como la viscosidad, densidad, tensión superficial ⁽⁶³⁾. La etapa de procesamiento incluye la discretización del espacio, paralelización computacional de la solución y resolución numérica del problema. En el postprocesamiento se realiza una evaluación y validación gráfica del método y se comparan los resultados numéricos con los datos experimentales.

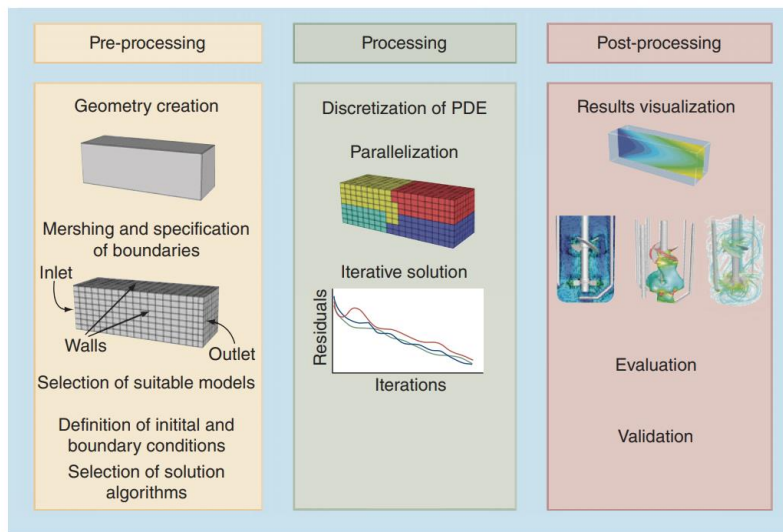


Figura 12. Proceso general en la implementación de análisis CFD. Obtenido de (63).

Debido a que los métodos numéricos son aproximaciones matemáticas de la solución real, la disminución del error, es decir, la exactitud del método aumenta al incrementar la finura de la malla que forma la geometría del modelo, sin embargo, esto eleva considerablemente el consumo de recursos computacionales aumentando el tiempo de procesamiento de datos ⁽⁶³⁾. Es aquí donde la paralelización computacional puede mejorar el tiempo de procesamiento si se dispone de procesadores adicionales en que se reparta el procesamiento de los datos.

Actualmente, existe paquetería especializada que ayuda al planteamiento y resolución de los problemas CFD. Cierta metodología se apoya en lenguajes de programación tales como Fortran, Python, C++ o Matlab, aunque también existen softwares comerciales (CAD, CAE) como ANSYS Fluent ⁽⁶¹⁾, ANSYS CFX, FLOWIZARD, PHOENICS, STAR-CCM+, OpenFOAM ⁽⁶³⁾, Inventor (plug-in CFD) o SolidWorks, entre otros. Este tipo de análisis reduce considerablemente el tiempo de diseño y experimentación, así como, los costos de construcción y escalamiento.

3.5. Sistemas Microalgales en el Espacio Urbano

La adaptación e integración de los sistemas microalgales a las ciudades es una propuesta que se ha planteado en los últimos años. Las primeras propuestas son diseños conceptuales que plantean un futuro en el que las microalgas y los FBR's serán adaptados, principalmente, a edificios e infraestructura urbana, otorgando autonomía energética o alimentaria a dichas edificaciones. Con el continuo desarrollo de la tecnología, las propuestas evolucionaron a sistemas completos, integrados, donde se plantea un aprovechamiento mayor de la tecnología y la diversa relación que poseen estos sistemas con el entorno.

En el caso de México los avances en cuanto a sistemas de microalgas se han dado de diversas formas:

- El proyecto “**Áreas verdes con microalgas en el paisaje urbano, para la reducción de gases de efecto invernadero: aspectos operacionales, económicos, estéticos y educativos**” propone introducir al paisaje urbano sistemas de captura de CO₂ en fotobiorreactores con diseños visualmente atractivos en edificios, esculturas y mobiliario ^(sic 65). Esta línea de investigación se encuentra formada por los doctores Mónica Morales y Sergio Revah, del Departamento de Procesos y Tecnología de la UAM Cuajimalpa; las doctoras Esperanza García y Brenda García Parra, del Departamento de Teoría y Procesos del Diseño de la misma sede académica ^(sic 66), y la maestra Mónica Rodríguez Palacio, del Departamento de Hidrobiología de la unidad Iztapalapa.

- La profesora Mónica Cristina Rodríguez Palacio del Laboratorio de Ficología Aplicada de la UAM Iztapalapa en conjunto con profesores de la UIAP, ha implementado sistemas microalgales con alga *Espirulina* en la montaña de Oaxaca -Chiquihuitlán de Benito Juárez– y en la sierra de Puebla –Jonotla– donde “se instalaron módulos de cultivo donados por la UIAP y se capacitó a la población mediante cursos y talleres de cocina para que integran el alga al alimento, sin cambiar sus costumbres pues el propósito es que sea un ingrediente más en la dieta”. “estos sistemas se encuentran integrados con celdas fotovoltaicas y no representan un gasto energético extra para el usuario” ^(sic 67).

- **Biomitech** es una empresa mexicana de reciente creación que se ha caracterizado por la aplicación de sistemas de fijación de CO₂ con tecnología a base de microalgas. Su creación se da tras el diseño de un sistema de biofiltración de agentes contaminantes atmosféricos, enfocado a mejorar la calidad de aire en espacios abiertos, cerrados y diferentes áreas de la industria ⁽¹³⁹⁾. “Biomitech 2.0” fue la ganadora del reto “Heineken Green Challenge” durante el festival de emprendimiento INCMtY 2018, organizado por el Tec de Monterrey ⁽⁶⁸⁾. Además, se han realizado alianzas con el gobierno estatal de Puebla, e instaló un sistema en una de las vialidades con más congestión en la capital del estado ⁽⁶⁸⁾.

Conceptos



Figura 13. Se muestra el diseño conceptual de la granja integrada. Obtenida de (35).

Este proyecto fue ganador del premio en modalidad de sistemas de producción y desarrollo alimentario en la *International Algae Competition* llevada a cabo por Robert Herikson y Mark Edwards en Richmon CA ⁽³⁵⁾.



Figura 14. Se muestra el diseño conceptual del interior de la granja integrada. Obtenida de (35).



Figura 15. Se muestra el prototipo conceptual de Spira. Obtenida de (69).

“*Spira*” es un diseño conceptual del diseñador Rob Russell, que, aunque se cuenta con prototipo aún no genera biomasa por sí mismo ⁽⁶⁹⁾. Este PBR se ha diseñado pensando en su uso en el hogar para el cultivo personal de alga Espirulina. Su configuración se compone de dos tubos transparentes de acrílico mientras que la iluminación se por medio de tiras LED proporcionan cinco watts por litro durante 16 horas al día. El control de temperatura mantiene el cultivo a 35 °C permanentemente ⁽⁶⁹⁾.

“*Algae Bus Stop*” es un proyecto diseñado por Zahra Mohammadganjee de *Sapienza University of Rome*, es una estructura modular que puede instalarse en la vialidad urbana, produce oxígeno gracias al metabolismo de las microalgas. El concepto incluye la utilización de la biomasa para la generación de biocombustibles ⁽⁷⁰⁾.



Figura 16. Se muestra una imagen digitalizada del concepto *Algae Bus Stop*. Obtenida de (70).

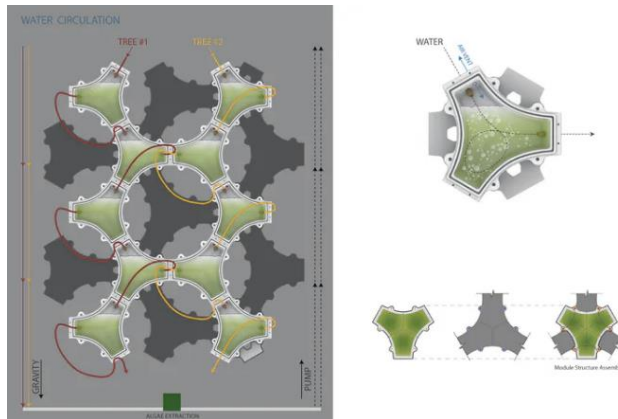


Figura 17. Se muestra una imagen digitalizada del concepto *Biokinetics*. Obtenida de (71).

“*Biokinetics*” es un proyecto desarrollado por arquitectos de la Universidad de Florida (EUA). Es un sistema FBR diseñado para fachadas de edificios. Con énfasis en la fabricación a través de herramientas como impresión 3D y corte CNC, cada módulo básico funciona como celda del PBR y además tiene una función estructural. Cada módulo se conecta a otros tres módulos por donde el alga se va recirculando, favoreciendo el intercambio de gases y mezclado. El monitoreo de parámetros se realiza por medio de microcontroladores Arduino ⁽⁷¹⁾.

Diseños Funcionales

Se presentan diseños y configuraciones de PBR's diseñados para su función en espacios urbanos, que además de presentar componentes de innovación en su concepto y diseño, son sistemas funcionales.



Figura 18. Se muestra una imagen de PhotoSynthEtica. Obtenida de (72).

microalgas en espacios urbanos ⁽⁷²⁾.

PhotoSynthEtica es un consorcio cofundado por Claudia Pasquero y Marco Poletto, dirigido por *ecoLogicStudio* en asociación con *Urban Morphogenesis Lab - UCL* y *Synthetic Landscapes Lab - Universidad de Innsbruck*.

Este proyecto tiene como objetivo la creación de experiencias a través de la implementación de la tecnología de

“**The Algae Dome**” es un proyecto realizado por un grupo de arquitectos, Aleksander Wadas, Rafal Wroblewski, Anna Stempniewicz en colaboración con el laboratorio de innovación Space10 de IKEA y el bioingeniero Keenan Pinto.

Se encuentra basado en FBR’s tipo tubulares. Cuenta con 320 metros de tubos con una capacidad de 450 litros. “Su diseño proporciona refugio al mismo tiempo que facilita la interacción social” ⁽⁷³⁾.



Figura 19. Se muestra una imagen de “The Algae Dome”. Obtenida de (73).



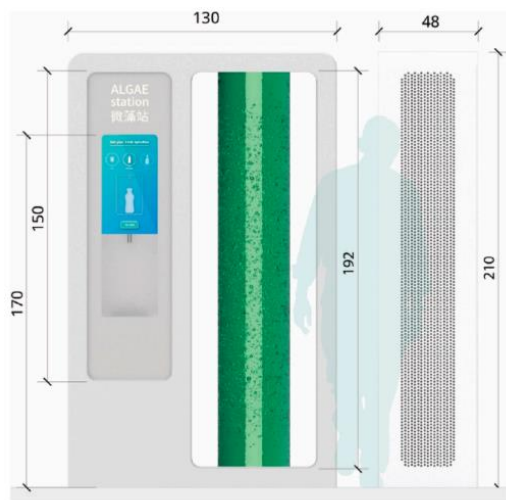
“The Coral Micro Farm” es un biorreactor de microalgas montado en la pared que tiene como objetivo cultivar alga Espirulina para alimentación doméstica ⁽⁷⁴⁾. Fue diseñado por Hyunseok An en la escuela de diseño de Rhode Island. Se compone de 16 cubos, cada uno de los cuales contiene Espirulina en crecimiento. Cada cubo es capaz de producir 2 gramos de alga Espirulina ⁽⁷⁴⁾. Para realizar la cosecha de Espirulina es necesario retirar cada uno de los cubos y filtrar en un envase con filtro por separado.

Figura 20. Se muestra una imagen de The Coral Micro Farm. Obtenida de (74).

“The Algae Grower” es un prototipo para la producción de alga Espirulina doméstica. Su diseño se encuentra dirigido para uso en cocinas y para satisfacer la producción diaria de alga Espirulina suficiente para un adulto ⁽⁷⁵⁾. Este prototipo fue elaborado por académicos de la universidad de *Wenzhou-Kean* en China y, Politecnico di Torino en Italia.



Figura 21. Se muestra una imagen de “The Algae Grower”. Obtenida de (75).



“*The Algae Station*” es una instalación modular para la producción de alga *Espirulina* en lugares públicos. La estación ofrece información en tiempo real sobre la cantidad de *Espirulina* producida y los niveles de CO_2 capturados ⁽⁷⁵⁾. Se compone de un FBR tubular donde el alga es producida, un sistema de cosechado y dispensado del alga. Este concepto fue elaborado por académicos de la universidad de *Wenzhou-Kean* en China y, Politecnico di Torino en Italia ⁽⁷⁵⁾.

Figura 22. Se muestra una imagen digitalizada de “*The Algae Station*”. Obtenida de ⁽⁷⁵⁾.

BioUrban es una serie de FBR’s fabricados por la empresa mexicana Biomitech, los cuales han sido diseñados para instalarse en espacios públicos como en calles, parques, plazas y edificios. Los FBR’s se componen de tanques tipo columna de burbujas en sus diversas modalidades. Estos sistemas cuentan con monitoreo de la calidad del aire y su principal función es la purificación del aire en las zonas donde se instalan ⁽⁷⁶⁾.



Figura 23. Se muestran *Biourban 3.0* y *Biourban 2.0*, ambos de la empresa *Biomitech* México. Fuente: *biomitech.org* ⁽⁷⁶⁾

Los fabricantes aseguran que estos FBR’s tiene una capacidad de flujo de caudal de aire de $825 \text{ m}^3/\text{h}$, con un volumen de purificación de aire de $7,227,00 \text{ m}^3$ anuales y que llegan a filtrar hasta un 99.7% de partículas $\text{PM}_{2.5}$ y $\text{PM}_{10.0}$ ⁽⁷⁶⁾.

Edificios

El edificio de demostración “*Bio Intelligent Quotient (BIQ House)*” (figura 24) presentado en Hamburgo, Alemania, en abril de 2013, es el primer edificio construido en el mundo que incorpora FBR’s de placa plana en su fachada. Es un edificio residencial de 15 apartamentos de cinco pisos diseñado por “*Splitterwerk Architects*” en colaboración con “*Arup*” ^(77,80). El diseño emplea fotobiorreactores de placa plana para producir calor y biogás, el resultado es una emisión neta de carbono sin emisiones a la atmósfera ⁽⁷⁸⁾.

Caso de estudio	“BIQ House” Hamburgo, Alemania, 2013	“SymbIO ₂ PROJECT”,	“Process Zero”, Los Ángeles California, USA
Tipo de integración	 <p data-bbox="293 562 654 594"><i>Figura 24. Fachada de edificio ⁽⁷⁸⁾</i></p>	 <p data-bbox="716 562 1076 594"><i>Figura 25. Fachada de edificio ⁽⁸¹⁾</i></p>	 <p data-bbox="1146 562 1529 625"><i>Figura 26. Fachada de edificio (conceptual) ⁽⁷⁸⁾</i></p>
Superficie	<p data-bbox="289 684 656 894">200 m² de superficie cubierta con 129 paneles fotobiorreactores. Cada uno con una medida de 2.5m largo x 0.7m ancho y 0.08m de grosor ^(78,80).</p>	<p data-bbox="678 684 1122 894">Prototipo de edificio integrado a una planta de procesamiento de residuos para la producción simultánea de microalgas y el tratamiento parcial de gases de combustión ⁽⁸²⁾.</p>	<p data-bbox="1141 684 1534 821">2,300 m² de superficie cubierta con una red de módulos a partir de tubos de vidrio transparente ^(78,79).</p>
Tipo de FBR's	<p data-bbox="289 919 656 993">FBR's de placa plana en fachadas sureste y suroeste ⁽⁸⁰⁾.</p>	<p data-bbox="781 947 1016 978">FBR's de placa plana</p>	<p data-bbox="1141 919 1534 993">FBR's tubulares horizontales en las cuatro fachadas</p>
Características particulares	<p data-bbox="289 1056 656 1224">La biomasa de algas se puede quemar para generar energía y generar calor. La energía se puede almacenar sin pérdida ⁽⁸⁰⁾.</p>	<p data-bbox="678 1045 1122 1255">Configuración estructural en una doble fachada de doble revestimiento para el intercambio de aire entre el edificio y los FBR's con el fin de reducir los costos operativos.</p>	<p data-bbox="1141 1014 1534 1266">Diseño conceptual. El sistema obtiene el CO₂ de la carretera más cercana y está diseñado para obtener los nutrientes del agua residual resultante de la misma actividad dentro del edificio ⁽⁷⁹⁾.</p>
Rendimientos	<p data-bbox="289 1314 656 1440">La biomasa, resultante produce una energía total de 30KWh / m² año ⁽⁸⁰⁾.</p>	<p data-bbox="678 1314 1052 1346">1,500 m² de área de producción ⁽⁸²⁾</p>	<p data-bbox="1141 1293 1534 1503">-Reducción del 84% de la demanda energética global del edificio ⁽⁷⁹⁾. -9% de la energía del edificio es generada por el sistema FBR propuesto.</p>

Tabla 5. Se muestran ejemplos de edificios con fachadas a partir de microalgas. Obtenido y adaptado de (78,79,80,81,82).

El equipo de *BIQ House* afirma que la clave para una implementación exitosa de los FBR's a una escala más amplia será la cooperación entre las partes interesadas y los diseñadores ⁽⁸⁰⁾. Como nueva tecnología se beneficia de una fuerte colaboración interdisciplinaria, que combina habilidades en diseño ambiental, fachadas, materiales, simulaciones, servicios, ingeniería estructural y sistemas de control ⁽⁸⁰⁾.

3.6. Fotobiorreactores e hidroponía

Una de las principales salidas de los sistemas microalgales es el agua resultante después del proceso de separación de la biomasa microalgal. Esta agua, además de contener materia orgánica disuelta, contiene grandes cantidades de nutrientes no asimilados por las microalgas, principalmente, Fósforo (P) y Nitrógeno (N), que bajo una incorrecta gestión de este efluente descargado directamente al ambiente puede generar una eutroficación de ríos y lagos ⁽⁸³⁾. La cantidad de nutrientes, así como los tipos de nutrientes presentes en el agua resultante del cultivo depende directamente del tipo de medio de cultivo que se utilice.

Existen diferentes estrategias en la gestión del agua resultante del proceso, una de ellas es su recirculación al sistema microalgal, sin embargo, esta agua debe pasar por un proceso de tratamiento para eliminar la materia orgánica residual y el exceso de nutrientes para su reutilización en el sistema.

En los últimos años ha llamado la atención entre la comunidad científica la posibilidad de cultivar microalgas en sistemas hidropónicos. Las microalgas crecen de manera natural en los sistemas hidropónicos considerándose problemáticas ya que, cuando crecen de forma descontrolada, provocan atascamientos, compiten por nutrientes e incrementan la carga de carbono orgánico ⁽⁸⁷⁾. Sin embargo, diversas investigaciones han estudiado como se desarrollan las microalgas en estos sistemas, su afectación y beneficios e incluso han planteado acoplamientos entre ambas tecnologías en aprovechamiento de los nutrientes presentes en el agua para el crecimiento de diversos cultivos de plantas.

La hidroponía es una técnica de cultivo de vegetales a partir del uso exclusivamente de agua con nutrientes, sin el uso convencional de tierra como sustrato ⁽⁸³⁾. Los sistemas hidropónicos cuentan con una gran variedad de ventajas entre las que se encuentran el poco espacio requerido para su implementación, la gran variedad de especies vegetales que pueden cultivarse utilizando esta técnica, además de un alto rendimiento de absorción de nutrientes debido a que las raíces de las plantas se encuentran sumergidas directamente en el agua ^(83, 87).

Ciertas investigaciones han estudiado la adaptación que poseen algunas cepas microalgales como *Chlorella vulgaris* ^(83,85,86), *Scenedesmus quadricauda* ⁽⁸⁵⁾, *Chlorella infusionum* ^(84,86) en co-cultivo con especies vegetales como lechuga: *Lactuca sativa* ^(83,86), jitomate: *Solanum lycopersicum* ^(84, 85), arugula: *Eruca sativa* ⁽⁸⁶⁾, colinabo morado: *Brassica oleracea* var. *Gongylodes* ⁽⁸⁶⁾.

Estas investigaciones demuestran que el proceso de fotosíntesis llevado a cabo por las microalgas puede mejorar el rendimiento y crecimiento de los cultivos al suministrar oxígeno (O₂) disuelto que ayuda a la respiración de las raíces ^(84, 87). Sin embargo, existen algunas diferencias en el metabolismo de plantas y microalgas, especialmente en lo referente a las formas de Nitrógeno (N) asimilables, las plantas consumen

N en forma de nitratos (NO_3^-), mientras que las microalgas lo hacen en la forma de amoníaco (NH_3). Durante el acoplamiento la transformación del Nitrógeno genera variaciones importantes en el pH. La mayoría de las plantas crecen a un pH de entre 5.5 a 7.5 ^(86, 87), si los niveles de pH pasan este umbral será difícil que las plantas asimilen correctamente los nutrientes presentes en el agua. Un incremento en el pH puede deberse al proceso de fotosíntesis llevado a cabo por las microalgas, que resulta en un consumo de HCO_3^- y una acumulación de OH^- en la solución ⁽⁸⁶⁾.

En (84, 85, 87) se reporta una posible mejora en el cultivo de plantas por la acción de diversos metabolitos secundarios y otros aleloquímicos como fitohormonas producidas por las microalgas y aprovechadas por las raíces de las plantas.

Existen diversas opciones en este acoplamiento tecnológico, una es cultivar las microalgas y las plantas en un mismo sistema, sin embargo, la coexistencia de microalgas y plantas en un mismo sistema genera un traslape de especificaciones operacionales ⁽⁸⁷⁾, lo cual debe tomarse en cuenta para evitar la competencia por recursos y un mal funcionamiento que se traduzca en bajos rendimientos o se ponga en riesgo la seguridad del sistema o de los usuarios.

Un acoplamiento del sistema hidropónico a la salida del sistema microalgal, en aprovechamiento de los nutrientes residuales en el agua puede resultar prometedor, solo hay que tener en cuenta una posible deficiencia nutricional en el cultivo hidropónico. En (87) se muestra que el agua de salida del sistema microalgal reutilizada para el cultivo hidropónico ayuda al cultivo por un periodo máximo de 24 días, después de este periodo las hojas de los vegetales comienzan a secarse, lo que indica una concentración de nutrientes limitada por un periodo de tiempo limitado. Sin embargo, este tipo de acoplamiento puede dar el suficiente tiempo para que el cultivo microalgal crezca y se coseche para después renovar el volumen de agua reutilizada en el sistema hidropónico.

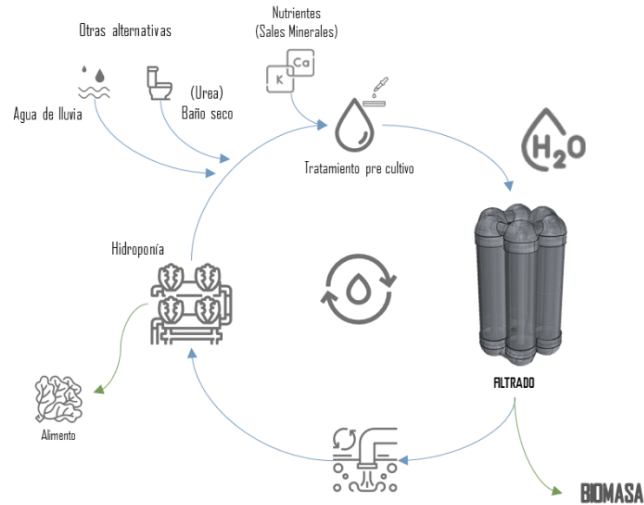


Figura 27. Se muestra un diagrama esquemático del acoplamiento entre un sistema microalgal y un sistema hidropónico.
Fuente: elaboración propia.

Además de su carácter ambientalmente positivo donde se genera un ciclo natural de gestión y tratamiento del agua efluente de ambos sistemas, este acoplamiento tecnológico puede servir de estrategia para mejorar la rentabilidad económica de ambas tecnologías ^(83,86,87).

3.7. Manufactura de Fotobiorreactores

Estrategias de procesos

Una de las decisiones más importantes en el diseño de un nuevo producto es encontrar la mejor forma de producirlo. Una estrategia de proceso o transformación es el enfoque adoptado por una organización para transformar los recursos en productos y servicios ⁽¹⁰⁷⁾. Las estrategias de proceso más conocidas y utilizadas globalmente incluyen: enfoque en el proceso, enfoque repetitivo, enfoque en el producto y personalización masiva ⁽¹⁰⁷⁾.

Como se mencionó en capítulos anteriores, existen nuevas formas y modelos de negocio para enfocar los productos como SPS (capítulo 2.5), así como estrategias para desarrollar un producto con base en el análisis de su ciclo de vida LCD (capítulo 2.2). Es en la etapa de producción donde las decisiones tomadas en el análisis de ciclo de vida, en la elección de los materiales, procesos de reciclaje, estrategia de ensamble y desensamble (capítulo 2.3) toman relevancia en la manufactura del producto.

La estrategia de proceso elegida deberá ir de acuerdo con el tamaño deseado de producción y esto determinará en gran medida los procesos de transformación de los materiales, lo que a su vez influirá en los costos y la calidad de los bienes producidos ⁽¹⁰⁷⁾; una estrategia de proceso que busca producir un bajo volumen de componentes, pero con flexibilidad en cuanto a variedad de productos, deberá estar enfocada al proceso, es decir, se pueden agrupar departamentos cuyos procesos sean similares para la fabricación de varios componentes o productos. En este caso, los equipos requeridos para la transformación de los materiales son de propósito general ⁽¹⁰⁸⁾. Por otra parte, un proceso que busca una producción continua y homogénea puede dividirse en módulos de ensamble, esto es la tradicional línea de ensamble donde el producto puede tomar una variedad de formas, dependiendo de la combinación de estos módulos. A esta estrategia de proceso se le conoce como enfoque repetitivo (figura 28) ⁽¹⁰⁷⁾.

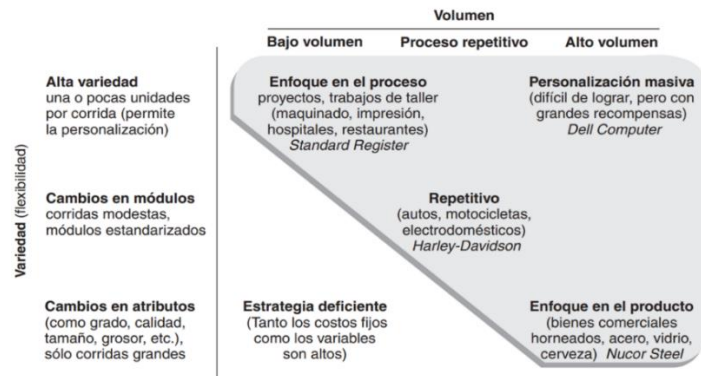


Figura 28. Se muestra un diagrama que describe las cuatro estrategias de proceso, se describe la manera en que seleccionado debe ajustarse al volumen y a la variedad. Obtenido de ⁽¹⁰⁷⁾.

Un proceso de producción enfocado a producto (figura 28), se caracteriza por generar un alto volumen de producto con muy poco margen de variación en sus características. Se basan en la estandarización del producto y una calidad específica deseada ⁽¹⁰⁷⁾. Los equipos requeridos para este tipo de procesos son muy específicos y de alto volumen de producción ⁽¹⁰⁸⁾. Por último, la personalización masiva es la combinación de procesos enfocados en el proceso y también en el producto. Ésta es una estrategia de proceso que se adapta a muchas situaciones de la vida moderna, en la que cada vez se requieren productos abundantes, sofisticados e individualizados. Esta estrategia se basa en la producción rápida y de bajo coste de bienes y servicios individualizados a volúmenes altos ⁽¹⁰⁷⁾.

Tales estrategias de procesos, como parte de la gestión de operaciones, pueden acoplarse a la manufactura de fotobiorreactores. Por supuesto que la elección de cada proceso deberá ajustarse a la dimensión y capacidad de producción. Cualquiera que sea la estrategia de producción, ésta puede complementarse con un Sistema de gestión ambiental (SGA) basados en normas internacionales como ISO 14000, 14001. Con el objetivo de monitorear y controlar dichos procesos para un mejor manejo ambiental.

Materiales

Fotocelda

Los materiales más comúnmente utilizados para la construcción de fotobiorreactores son el vidrio Borosilicato, polimetilmetacrilato (PMMA), Cloruro de Polivinilo (PVC), Policarbonato y Polietileno de alta (HDPE) o baja (LDPE) densidad ⁽¹³²⁾. Cada material presenta diversas propiedades y necesidades durante la operación del FBR, puede que ciertos materiales sean mejor opción que otros para cada tipo, tamaño y uso del FBR y uso destinado de la biomasa resultante ⁽⁸⁸⁾.

El material seleccionado para la fotocelda del FBR, que es por donde las microalgas capturan la luz, debe ser completamente transparente para dejar pasar la mayor cantidad de luz posible. Las microalgas utilizan luz en un rango de 420 a 720 nm ⁽⁸⁸⁾. Materiales como el vidrio borosilicato y el polimetilmetacrilato (PMMA) poseen niveles de transmitancia de luz mayores al 90% ⁽⁸⁸⁾. Se debe tener en cuenta que algunos materiales pierden transparencia con el uso, rayaduras, degradación por exposición solar o por interacción con ciertos químicos.

También existen materiales que por su proceso de fabricación pueden liberar sustancias al medio microalgal, como es el caso de algunos policarbonatos y acrílicos, los cuales deben ser de grado alimenticio para evitar contaminación del medio microalgal y el producto final (biomasa). El material de la celda fotosintética también debe ser resistente a esfuerzos mecánicos. Si es que el FBR se encontrará en la intemperie, el material debe ser resistente a rayos ultravioleta para evitar la degradación progresiva del material y la contaminación del medio microalgal.

Los materiales poseen un coeficiente expansión lineal debido a los cambios en la temperatura, por ejemplo, el vidrio borosilicato se dilata 3.3mm a un cambio repentino de temperatura de 20°C, mientras que el UV-PVC se dilata 39mm y el polimetilmetacrilato (PMMA) se dilata hasta 70mm lineales ⁽⁸⁸⁾. Esta expansión del material debe tomarse en cuenta en el diseño de juntas que faciliten el movimiento de los materiales para evitar daños en la unidad FBR. Otro aspecto importante es la resistencia a ciertos químicos, ya que los medios de cultivo para microalgas normalmente se encuentran formulados con sales fosfato, sulfatos y nitratos, entre otros. Aunado a esto, se debe tener en cuenta los tipos de químicos que pueden utilizarse en el proceso de limpieza para cada material, que no degraden u opaquen la celda fotosintética, utilizándose en mayor medida alcoholes, cloro o sosa.

La tabla 6 muestra las características más relevantes de tres tipos diferentes de material para la fotocelda. El vidrio borosilicato es una muy buena opción debido a su alta resistencia mecánica y química, sin embargo, este material es normalmente utilizado en FBR's tubulares, más no en Airlift o columna de burbujas debido al coste de tubos con diámetros mayores a 10 cm.

Celda (contenedor)	Grado alimenticio	Resistencia Química Típica	Propiedades Mecánicas Típicas	Propiedades Térmicas Típicas	Propiedades ópticas típicas
Policarbonato	Existe en grado alimenticio, sin embargo, la mayoría libera Bisfenol A (BPA) u otros componentes químicos	Resistente a Bicarbonatos, Nitrato de Amonio, Sulfato de Hierro, Nitrato de Potasio (saturado), Sulfato de Potasio, Cloruro de Sodio Etanol (96%), alcohol Isopropílico, Hipoclorito de Sodio (5%), Sulfato de Sodio, Tiosulfato de Sodio, Cloruro de Calcio (Saturado), Nitrato de Calcio, Dióxido de Carbono (gas), Sulfato de Magnesio, Cloruro de Magnesio, Ácido Nítrico (20%), Almidón, Fosfato Trisódico, Urea, Vinagre. Sin resistencia o resistencia limitada a Etanol puro, Acetato de Potasio, Hidróxido de Sodio, Nitrato de Sodio, Óxido Nitroso, Ozono, entre otros. ⁽⁹⁶⁾	Resistencia al impacto 0.125" (Izod con muesca ATSM D256): 18 ft·lbs/in ⁽⁹⁹⁾ Resistencia al impacto 0.125" (Izod sin muesca ATSM D256): 60 ft·lbs/in (sin rotura) ⁽⁹⁹⁾ Puede ser mecanizado, taladrado, cortado y aserrado, Se une fácilmente con disolventes o adhesivos ⁽⁹⁷⁾ Resistencia a la tracción: 9,500 psi, ^(98, 99) Absorción de humedad (inmersión 24 horas): 0.15 % ⁽⁹⁸⁾	Estabilidad y resistencia a rayos UV. Alta resistencia a temperatura, a llamas y autoextinguible ⁽⁹⁷⁾ Coeficiente de expansión térmica lineal: 3.8 in/in/°F x 10 ⁻⁵ (98,99) Coeficiente de conductividad térmica: 1.35 BTU·in/hr·ft ² ·°F ⁽⁹⁹⁾	Transmisión de Luz 86-90% ^(96,99) Índice de refracción 1.586 ⁽⁹⁹⁾
Polimetilmetacrilato (PMMA)	Existe en grado alimenticio	Resiste a la mayoría de los productos químicos: bases, ácidos, amoníaco (no muy concentrado), hidrocarburos alifáticos (hexano, nafta y octanos), alcohol isopropílico (70%), peróxido de hidrógeno (3-5%). ⁽¹⁰¹⁾ No resiste hidrocarburos clorinados (cloruro de metileno, tetracloruro de carbono); solventes aromáticos como benceno, terpeno, tolueno, trementina; alcoholes etílicos y metílicos; ácidos orgánicos como el acético, fenoles, thinner, cetonas y éteres. ⁽¹⁰¹⁾	Resistencia al impacto 0.125" (Izod con muesca ATSM D256): 0.4 ft·lbs/in ⁽¹⁰³⁾ Resistencia al impacto 0.125" (Izod sin muesca ATSM D256): 60 ft·lbs/in (sin rotura) ⁽¹⁰³⁾ Resistencia a la tracción: 10,000 a 11,030 psi, ^(103,104) Bajo peso (densidad 1.2 g/cm ³) ⁽¹⁰¹⁾ Baja resistencia a la abrasión ⁽¹⁰¹⁾ Resistencia a la degradación por rayos ultravioletas ⁽¹⁰¹⁾ Absorción de humedad (inmersión 24 horas): 4% ⁽¹⁰³⁾ Resistencia a la flexión 1020 kg/cm ²	Coeficiente de expansión térmica lineal: 3.0 in/°F x 10 ⁻⁵ ⁽¹⁰⁴⁾ Coeficiente de conductividad térmica: 0.23 W/m°k	Índice de refracción 1.48 - 1.50 ⁽¹⁰²⁾ Transmisión de Luz 92 - 95% ^(101, 102, 103) Transmisión de la luz en el espectro ultravioleta, entre 290 mm. y 330 mm., para 6,4 mm.
Vidrio borosilicato	Existe en grado alimenticio	Sin resistencia o resistencia limitada a Hidróxido de Sodio, ácido fluorhídrico, ácido fosfórico ⁽¹⁰⁵⁾	Resistencia a la compresión: 248 Mpa ⁽¹⁰⁵⁾ Resistencia a la tracción: para cargas sostenidas de 19.3 hasta 28.4 Mpa ⁽¹⁰⁵⁾ Densidad 2.5 g/cm ³ ⁽¹⁰⁵⁾	Calor específico C= 0.72x10 ³ J/(kg°K) ⁽¹⁰⁵⁾ Coeficiente de dilatación lineal 9x10 ⁻⁶ °K ⁻¹ ⁽¹⁰⁵⁾ Conductividad térmica 1 W/(m°K)	Índice de refracción 1.52 ⁽¹⁰⁵⁾

Tabla 6. Valores típicos, estos pueden variar dependiendo el fabricante.

El policarbonato es un material muy resistente y con buena transmitancia lumínica, sin embargo, la dificultad de encontrar en grado alimenticio es alta. El polimetilmetacrilato (PMMA) posee gran resistencia a diversos químicos, entre los que figuran algunos utilizados en los medios de cultivo para microalgas y productos de limpieza. Posee una alta resistencia a la intemperie y a la degradación por rayos ultravioleta. Es, además, un material que puede maniobrarse y trabajarse con mayor facilidad que el vidrio y el policarbonato.

Componentes plásticos

Existe una gran variedad de materiales plásticos que pueden utilizarse en la manufactura de fotobiorreactores. Los plásticos son materiales que se obtienen a través de procesos de polimerización ^(#3) a partir de derivados del petróleo. Estos se dividen en dos categorías generales -termoplásticos y termoestables-.

- Los termoplásticos pueden moldearse por calor más de una vez, lo que los hace más fáciles de reciclar, entre los que se incluyen: Polietileno de Baja Densidad (PEBD), Polietileno de alta densidad (PEAD), Polipropileno (PP), Tereftalato de Polietileno (PET), Policloruro de Vinilo (PVC), Poliestireno (PS), Poliestireno expandido (EPS), Policarbonato (PC) ⁽¹⁰⁹⁾.
- Los plásticos termoestables son difíciles de reciclar ya que no es posible moldearlos por calor más de una vez, aunque son muy resistentes al calor ⁽¹¹⁰⁾. Entre estos figuran: resinas fenólicas, resinas ureicas ⁽¹⁰⁹⁾, baquelita, melanina, poliuretano, etc ⁽¹¹⁰⁾.

Existen diversos procesos a través de los cuales se pueden fabricar piezas en diferentes tipos de plásticos, a continuación, se realiza un listado de los procesos existentes.

Impresión 3D

En la impresión 3D la pieza tridimensional se va formando al depositar material capa por capa hasta completar una pieza completa. La impresora 3D toma la información de cada capa directamente de un archivo CAD digital. Existen 3 tipos de tecnología de impresión 3D: Moldeado por Deposición Fundida (FDM), Estereolitografía (SLA) y Sinterización Selectiva por Láser (SLS) ⁽¹¹¹⁾. De las tres la más conocida y hasta ahora accesible en cuanto a variedad de materiales y precio es la tecnología FDM.

La tabla 7 presenta las características mecánicas típicas de tres materiales para impresión 3D en tecnología FDM más comúnmente utilizados. La resistencia mecánica de las piezas depende en gran medida de tres

factores principales: la resistencia del filamento, la adherencia de la unión entre filamentos de una misma capa y la adherencia de la unión entre capas ^(89,90). Existe una gran variedad de materiales para manufactura digital por impresión 3D, desde los más conocidos y sencillos de imprimir hasta algunos de grado ingeniería o de alta especialidad. Los más conocidos y de mayor uso son el ácido poliláctico (PLA), el Acrílico-Butadieno-Estireno (ABS) y el Tereftalato de Polietileno Glicol (PETG). La impresión de las piezas en la primera fase de prototipado en este trabajo (capítulo 4.8) se utiliza PLA de 1.75 mm, sin embargo, para el resto de las piezas se utiliza PETG grado alimenticio el cual es un material mucho más resistente mecánicamente y que no se degrada en contacto con el agua.

Material	Grado alimenticio	Propiedades químicas típicas	Propiedades Mecánicas Típicas	Propiedades Térmicas Típicas	Temp. De extrusión
Ácido Poliláctico (PLA)	No existe en grado alimenticio	Biodegradable, Poca durabilidad	Límite elástico 60 Mpa Alargamiento a la rotura 6% Módulo de tracción 3,600 Mpa Resistencia a la Flexión 83 Mpa Módulo de Flexión 3,800 Mpa ⁽⁹⁰⁾ Densidad 1.24 g/cm ³ ⁽⁹¹⁾	Temperatura de deflexión térmica (TFC): 52 °C Coeficiente de expansión térmica 60 μm/m·°C ⁽⁹¹⁾	Temp. De extrusor: 185-210 °C Temp. De Cama: 45-60 °C ⁽⁹¹⁾
Acrílico-Butadieno-Estireno (ABS)	No existe en grado alimenticio	No biodegradable, Alta durabilidad	Densidad 1.04 g/cm ³ Límite elástico 40 Mpa ⁽⁹²⁾	Temperatura de deflexión térmica (TFC): 98 °C Coeficiente de expansión térmica 90 x 10 ⁻⁶ m/m°K ⁽⁹¹⁾	Temp. De Extrusor: 220-250 °C Temp. De Cama: 95-110 °C ⁽⁹¹⁾
Tereftalato de polietileno glicol (PETG)	Existe en grado alimenticio	No biodegradable, Alta Resistencia a la humedad, Alta durabilidad	Gravedad Específica 1.27 g/cm ³ ⁽⁹³⁾ Elongación 10% ⁽⁹⁴⁾ Resistencia a la tracción 50 N/mm ² ⁽⁹⁴⁾ Resistencia al impacto 0.125" (Izod con muesca ATSM D256): 1.5 ft-lbs/in (80 j/m) ⁽⁹⁵⁾	Temperatura de deflexión térmica (TFC): 68 - 73°C a 0.45 Mpa ^(93, 95) Coeficiente de expansión térmica 60 x 10 ⁻⁶ m/m°K ⁽⁹⁵⁾ Conductividad Térmica: 0.29 W/m°K	Temp. de Extrusor :230-250 °C Temp. De Cama: 75-90 °C ⁽⁹¹⁾

Tabla 7. Valores típicos, estos pueden variar dependiendo el fabricante.

Debido al espacio entre capas, es necesario recubrir las piezas con algún material, ya sea resina o pintura que ayude a asegurar la impermeabilidad de las piezas y evitar fugas de agua a través de estas. A pesar de este paso adicional, las ventajas de usar impresión 3D en esta fase del prototipado son aún diversas. El prototipado 3D permite realizar iteraciones de producto mucho más rápido en comparación con otros procesos, lo que permite validar casi de inmediato diseños, piezas y componentes, además de existir una gran cantidad de materiales accesibles que permiten validar diversas formas, tamaños, texturas y propiedades físicas, mecánicas para componentes funcionales ⁽¹⁰⁶⁾.

Maquinado CNC

El maquinado CNC es un proceso substractivo en el que se corta, taladra o rectifica material de un bloque de plástico o metal, barras o varillas, a través de una broca giratoria que elimina material moldeando la forma deseada ⁽¹¹¹⁾. Este proceso de fabricación es ideal para piezas pequeñas con tolerancias muy estrechas o geometrías que son difíciles de moldear por inyección o termoformado, también es ideal en fases de prototipado o en procesos de bajo volumen de producción ⁽¹¹¹⁾. El archivo tridimensional se carga a través de software CAD (*computer-aided design*) y para generar las rutas que seguirá la herramienta hasta completar el maquinado se utiliza software CAM (*computer-aided manufacturing*) ⁽¹¹²⁾.

Los procesos de maquinado CNC (fresado o torno) poseen algunas restricciones adicionales en comparación con procesos como la impresión 3D, por ejemplo, algunas geometrías como cavidades internas curvadas no son posibles de formar utilizando estos procesos. En el caso de algunas geometrías, tal vez sea necesario rotar la pieza para que las herramientas de desgaste puedan tener acceso ⁽¹¹¹⁾.

La mayoría de los plásticos comerciales pueden ser maquinados en CNC, en este respecto, cada material posee propiedades diferentes lo que hace que el proceso varíe tanto en tiempo de moldeo como en herramientas. Entre los plásticos comúnmente utilizados para estos procesos se incluyen: acrílico (PMMA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA), policarbonato (PC), polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), polioximetileno (POM), entre otros ⁽¹¹¹⁾.

Vaciado en Molde

El vaciado en molde es un proceso de fabricación en el que un plástico, que puede ser resina poliéster, resina epóxica, silicona, poliuretano o acrílico, se vierte en un molde impregnado con un material desmoldante. La resina o polímero se preparan previamente con un líquido catalizador que genera una reacción química, normalmente exotérmica, haciendo que solidifique ⁽¹¹¹⁾. Los moldes de vaciado flexibles normalmente son de silicona o látex, esto facilita la extracción de la pieza; aunque también existen moldes rígidos, normalmente divididos en piezas, que al desensamblarse liberan la pieza formada ⁽¹¹¹⁾.

El proceso de fabricación se compone de diversas etapas ⁽¹¹¹⁾:

- Preparación de los moldes
- Vaciado
- Fraguado o curado
- Desmolde

- Lijado o cortado

Las diversas etapas necesarias lo convierten en un proceso relativamente lento. Sin embargo, la resolución de detalle en las piezas formadas es aceptable. Este proceso de fabricación es una opción viable si el volumen de producción es bajo. Por esto, el vaciado en molde es un proceso utilizado normalmente en fases de prototipaje, joyería o aplicaciones dentales ⁽¹¹¹⁾. Los moldes poseen una vida útil de entre 25 a 100 piezas producidas, lo que depende de la calidad de los materiales elegidos.

Rotomoldeo

El rotomoldeo es un proceso de fabricación en el que un molde hueco se llena con resina líquida o plástico en polvo (termoplástico). Este molde luego se hace rotar sobre dos ejes perpendiculares dentro de una cámara de calor, lo que funde el polímero y lo impregna en las superficies del molde de manera homogénea tomando su forma ⁽¹¹³⁾. Este proceso se utiliza en la fabricación de piezas huecas y de gran volumen como tinacos, tanques o botes plásticos. Las piezas formadas no contienen costuras y sus paredes son de un grosor uniforme ⁽¹¹¹⁾.

El proceso de fabricación se compone de diversas etapas ⁽¹¹¹⁾:

- Carga del material
- Calentamiento
- Enfriamiento
- Desmoldeo y desmontaje

La fabricación de los moldes puede realizarse por diversos procesos como maquinado CNC o vaciado en molde, estos pueden ser de materiales resistentes al calor y con buenas propiedades de transferencia de calor, normalmente se utilizan las resinas epoxi o aluminio. El costo de cada pieza es relativamente bajo, aunque la instalación necesaria para llevarlo a cabo puede ser costosa y voluminosa. Este proceso es una buena alternativa para producciones de bajo volumen ^(111, 113). Finalmente, los materiales utilizados en este proceso incluyen: polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), policarbonato (PC) y nylon ⁽¹¹¹⁾.

Moldeo al Vacío

El moldeo al vacío es un proceso de fabricación en que una fina lámina de plástico se calienta hasta volverse flexible, e inmediatamente se posiciona sobre un molde y se succiona generando un vacío, lo que hace que la lámina tome la forma del molde. El moldeo al vacío es muy similar al termoformado, siendo como única

diferencia la complejidad en la geometría de los moldes utilizados ⁽¹¹⁴⁾. Estos pueden ser de madera, plástico resistente al calor o resina, los cuales pueden fabricarse a través de impresión 3D para volúmenes de producción pequeños. Para volúmenes de producción altos, normalmente se utiliza acero o metal.

Los espesores de las láminas varían según el producto deseado y van desde 0.2 mm, para envases o embalaje, a 6 mm o más para carcasas de maquinaria o automóviles ⁽¹¹⁵⁾.

El proceso de fabricación se compone de diversas etapas ⁽¹¹¹⁾:

- Calentamiento
- Moldeo al vacío
- Enfriamiento
- Recorte de material extra

Debido al nivel de automatización posible, este tipo de procesos pueden utilizarse para producciones a alta escala, sin embargo, las geometrías posibles se encuentran limitadas debido al proceso de desmoldeo que solo permite piezas que sean más anchas de la base y angostas en la parte superior, tomando en cuenta un ángulo de salida de 3 grados mínimo ⁽¹¹⁵⁾.

Entre los materiales disponibles para este proceso figuran: acrílico (PMMA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC), polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC) y poliestireno (PS) ⁽¹¹¹⁾.

Moldeo por Inyección

El moldeo por inyección es un proceso de manufactura en el cual gránulos de resina o material termoplástico se calientan y mezclan hasta fundirse a lo largo de un tornillo sin fin que transporta la mezcla hasta inyectarla a presión en un molde. Una vez que el material en el molde se enfría y endurece, el molde se abre y se eyecta la pieza por medio de pivotes eyectores ⁽¹¹⁶⁾.

El moldeo por inyección es uno de los procesos más utilizados para la fabricación de piezas plásticas. Su configuración y características permiten producir una gran cantidad de piezas de forma automatizada. Una característica especial es que los moldes utilizados son altamente complejos y normalmente son de aluminio u otros metales, lo que eleva el costo y el tiempo de preparación, aunque una vez preparado el molde, el precio por pieza es bastante bajo. El costo por pieza dependerá también de la geometría de cada pieza debido al proceso de desmolde.

El proceso de fabricación se compone de diversas etapas ⁽¹¹¹⁾:

- Preparado e instalación del molde
- Extrusión del material termoplástico
- Moldeo
- Enfriamiento y eyección
- Postprocesamiento

Entre los materiales disponibles para este proceso figuran: acrílico (PMMA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC), polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), poliamida (PA) y polietileno tereftalato glicol (PETG) ⁽¹¹¹⁾.

Extrusión

El moldeo por extrusión es un proceso de manufactura en el cual gránulos de resina o material termoplástico se calientan y mezclan hasta fundirse a lo largo de un tornillo sin fin que transporta la mezcla hasta inyectarla a presión en un molde en flujo continuo.

El moldeo por extrusión sirve para fabricar una gran cantidad de productos longitudinales, por ejemplo: tubería de agua y drenaje, popotes, mangueras, marcos, películas para embalaje, bolsas de plástico, filamentos, envases, etc ^(111, 116, 117). La maquinaria necesaria para este proceso de manufactura es menos compleja que en procesos como inyección o CNC.

El proceso de fabricación se compone de diversas etapas ⁽¹¹¹⁾:

- Preparado e instalación del molde
- Extrusión del material termoplástico
- Moldeo
- Enfriamiento
- Corte a medida

Entre los materiales disponibles para este proceso figuran: acrílico (PMMA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC), polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), poliamida (PA) y polietileno tereftalato glicol (PETG) ⁽¹¹¹⁾.

Moldeo por soplado

El proceso de moldeo por soplado se utiliza para fabricar una gran cantidad de productos como envases, tanque, barriles y/o botellas, generalmente se fabrican objetos huecos. Este proceso consiste en la extrusión de una preforma moldeada por inyección para después expandirla mediante calor y aire comprimido dentro de un molde que le da la forma al envase ⁽¹¹⁸⁾. Una vez que la pieza se enfría es expulsada del molde de soplado. Este proceso puede lograrse con una gran automatización para producir grandes corridas de piezas de forma continua, pues la conformación de cada pieza puede llegar a tomar escasos segundos, dependiendo de la geometría particular de cada pieza ⁽¹¹¹⁾.

El proceso de fabricación se compone de diversas etapas ⁽¹¹¹⁾:

- Preparación del molde
- Conformación de la preforma por extrusión
- Moldeo por soplado
- Enfriamiento
- Liberación del molde de soplado

Entre los materiales disponibles para este proceso figuran: acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), y polietileno tereftalato glicol (PETG) ⁽¹¹¹⁾.

Capítulo IV

Desarrollo

4.1. Definición de Usuario

Para comenzar con el desarrollo del prototipo se realiza primero la definición de los usuarios hacia los que va dirigida la propuesta, esto ayuda a fijar la escala y los objetivos a cumplir con el FBR, características generales de uso y aplicaciones.

El proceso de indagación es parte de la evaluación ergonómica de productos, herramientas u objetos (físicos o virtuales) con el fin de mejorar su usabilidad. Su proceso incluye la definición completa y detallada del sistema usuario-objeto-actividad-entorno (UOAE), sus relaciones e interdependencias, pues se debe tener en cuenta que el objeto en cuestión se utilizará por un usuario específico en un tiempo y lugar determinados realizando una actividad concreta (ver capítulo 2.4: DCU).

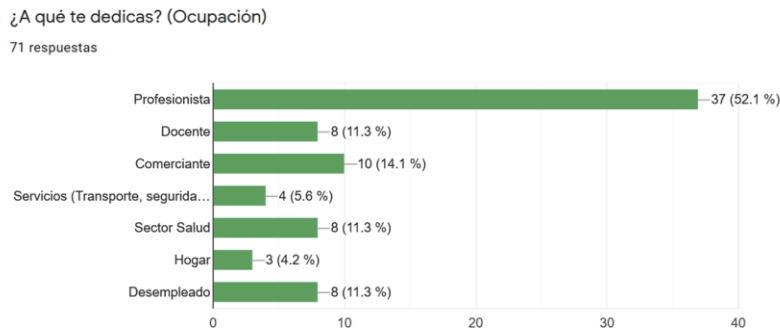
El propósito de la indagación que aquí se presenta es definir el sistema UOAE y sus características principales para la fabricación de un sistema FBR para la producción de biomasa de alga *Espirulina* en un ambiente doméstico. El cual será utilizado por usuarios que poseen muy poco o nulo conocimiento técnico relacionado a los FBR's y microalgas.

La especie de microalga a utilizarse es *Arthrospira máxima*, más comúnmente conocida como alga *Espirulina*, debido a que es una microalga que ha sido aprobada para consumo humano y fácil recuperación debido al tamaño de célula que ronda entre los 20 micrómetros a 150 micrómetros (ver capítulo 2.8: Especies Microalgales).

El perfil de usuario describe sus características específicas y el tipo de persona que se encontrará en interacción con el objeto en cuestión. Es importante definirlo para que los esfuerzos de diseño vayan bien encaminados a satisfacer necesidades reales de estos usuarios.

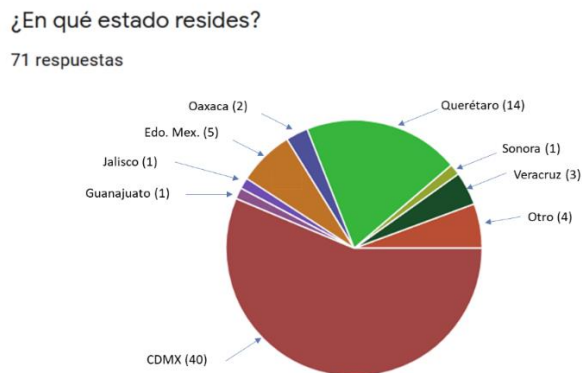
Como parte de la identificación de usuarios se realizó un cuestionario en línea, en el que se le pidió a un grupo de 71 personas que respondieran una serie de preguntas relacionadas con su edad, nivel de escolaridad, lugar de residencia y sexo, para la clasificación de las respuestas. Del total de las respuestas recibidas 35 fueron de mujeres y 35 de hombres, más una que prefirió no mencionarlo; el 84.5% tiene una escolaridad a nivel superior, mientras que el 12.7% respondió tener escolaridad media superior y 2.8%, equivalente a dos personas, de nivel básico (gráfica en Anexo A).

En cuanto a ocupación (gráfica 1) el 52.1% de los encuestados mencionó ejercer una profesión, seguido por comerciantes (14.1%); actividad docente y sector salud con el 11.3%, hogar solo el 4.2%.



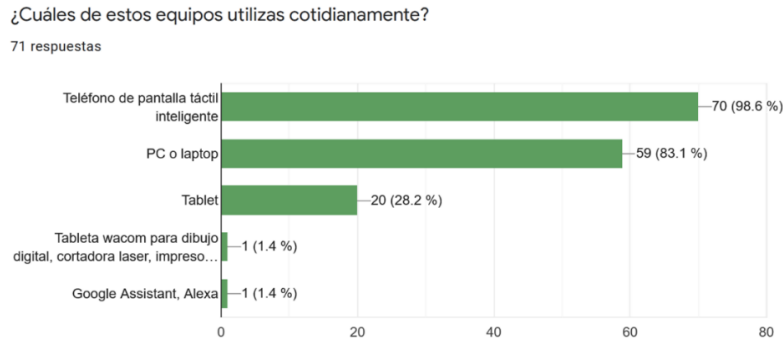
Gráfica 1. Se muestran los porcentajes obtenidos por ocupación para los participantes del cuestionario en línea.

La mayor parte de las respuestas que se recibieron fueron de personas residentes en la Ciudad de México con 40 respuestas, seguido del estado de Querétaro con 14 respuestas (gráfica 2). De la misma manera, la mayoría de las respuestas recibidas vienen de personas cuya edad se comprende entre los 20-29 años, seguido de personas en edades entre 40 a 49 años, y personas con un rango de edad ente los 50 y 59 años (gráfica en Anexo A).



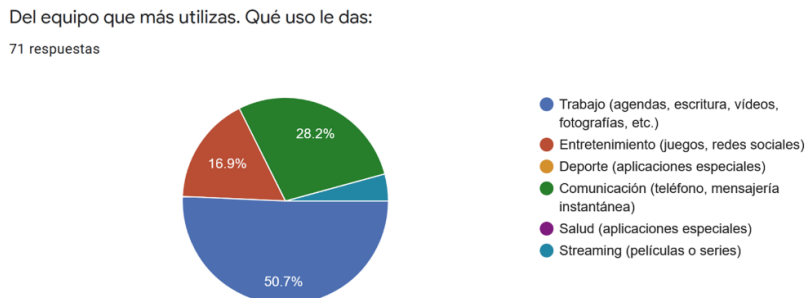
Gráfica 2. Se muestran los diferentes lugares de residencia de los participantes del cuestionario en línea.

En una segunda sección se les pidió a los participantes que respondieran preguntas relacionadas con sus habilidades y hábitos utilizando dispositivos digitales (gráfica 3). A lo que la mayoría de los encuestados respondió que el equipo que más utilizan es teléfono de pantalla táctil, seguido de la PC o laptop. En el caso de dispositivos como tabletas táctiles solo el 28.2% de los participantes respondieron de manera afirmativa a su uso.



Gráfica 3. Se muestran los equipos mayormente utilizados por los participantes del cuestionario en línea.

La siguiente pregunta (gráfica 4) tenía como objetivo identificar con qué fin los usuarios destinan el uso de este tipo de dispositivos, diferenciando entre actividades diarias de trabajo u organización, entretenimiento, aplicaciones especiales para deporte, comunicación, aplicaciones con temas en salud y transmisión de audio y video (*streaming*). Del total, 36 personas (50.7%) respondieron utilizar sus dispositivos para el trabajo, mientras que la comunicación es el uso principal para 20 participantes (28.2%).



Gráfica 4. Se muestran los usos más comunes de los dispositivos de la pregunta anterior.

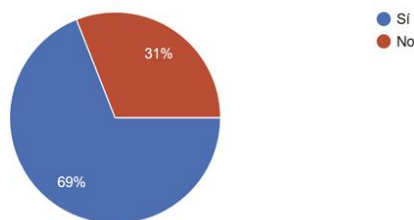
Una vez detectados los hábitos de los participantes en cuanto al uso de dispositivos móviles, la siguiente pregunta buscaba conocer si los participantes poseen dispositivos domésticos cuyo uso depende del empleo de aplicaciones digitales. Con esto se buscaba conocer si las personas se encuentran dispuestas a utilizar dispositivos domésticos, si los reconocen y a cuáles se encuentran más habituados.

¿Posees dispositivos electrónicos (electrodomésticos) en tu casa u oficina (impresoras, aires acondicionados, etc.) que se controlen y/o programen por medio de equipo como teléfono celular, PC o Tablet? ¿Cuáles?

Cuarenta de los participantes respondieron que sí poseían dispositivos electrónicos programables por medio de teléfono celular, PC, o Tablet, mientras que 31 participantes afirmaron no poseer dispositivos electrónicos con dichas características. De las respuestas positivas, la que mayor aparición tuvo fueron impresoras con 18 menciones, televisión con 8 menciones, focos inteligentes obtuvo 7 menciones, bocinas obtuvo 5 menciones. De ahí, figuraron dispositivos especializados con solo una o dos menciones, entre ellos, sistemas de video vigilancia, apagadores, aire acondicionado, repetidores de señal Wifi y sistemas Google Home y Alexa de Amazon.

Al comienzo de la última sección se le preguntó a los participantes si poseían algún conocimiento acerca del alga Espirulina. Esta pregunta pretendía sondear de manera cuantitativa qué porcentaje de los participantes tienen conocimiento sobre el alga, con el fin de conocer el nivel de penetración y conocimiento general que se tiene en la sociedad de la existencia de tal alimento (gráfica 5).

Comenzaremos esta sección preguntándote si sabes qué es o has escuchado hablar sobre el alga Espirulina.
71 respuestas



Gráfica 5. Se muestra el porcentaje de participantes que respondieron sí o no a la pregunta de conocimiento sobre el alga Espirulina.

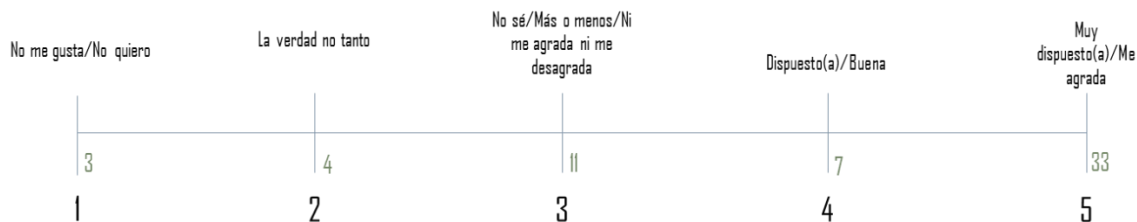
Como se observa en la gráfica 5, más de la mitad de los participantes afirmaron conocer o haber escuchado hablar sobre el alga Espirulina, lo cual parece ser muy positivo debido al grado de especialización del

desarrollo que aquí se presenta. El que las personas reconozcan a un nivel mínimo la existencia de la microalga y sus propiedades, abre la puerta a que el desarrollo tenga un impacto significativo en la sociedad.

Tanto a los participantes que respondieron que no conocían o habían escuchado sobre la microalga Espirulina como a los que respondieron afirmativamente, se les pidió leer una diapositiva informativa (Anexo B) en la que se enlistaron las propiedades más significativas de la microalga. En la siguiente pregunta se les cuestionó a todos los participantes, qué tan dispuestos se encontraban de probar o consumir alga Espirulina.

¡Muy Bien! Ahora que ya conoces los beneficios de la Espirulina ¿Qué tan dispuesto/a estarías en probarla? Si ya la has probado, por favor, coméntanos ¿qué tal te parece? ¿Te gusta su sabor?

Esta pregunta se formuló como abierta con la intención de sondear los pensamientos generales de las personas encuestadas sobre la Espirulina. Las respuestas se clasificaron utilizando una escala tipo Likert para su presentación (gráfica 6); la mayoría de éstas son positivas y muestran una buena predisposición de los participantes a consumir el alga o a probarla una vez que conocen sus propiedades nutricionales.



Gráfica 6. Se muestra en formato escala tipo Likert la clasificación de las respuestas recibidas por parte de los participantes del cuestionario en línea.

Las siguientes preguntas tenían como objetivo realizar un sondeo sobre la aceptación del desarrollo. Se mostraron un par de imágenes digitalizadas del prototipo al que se le denominó “EspiruFilter” (figura 29) con la finalidad de facilitar la comprensión de los participantes sobre el tipo de desarrollo.

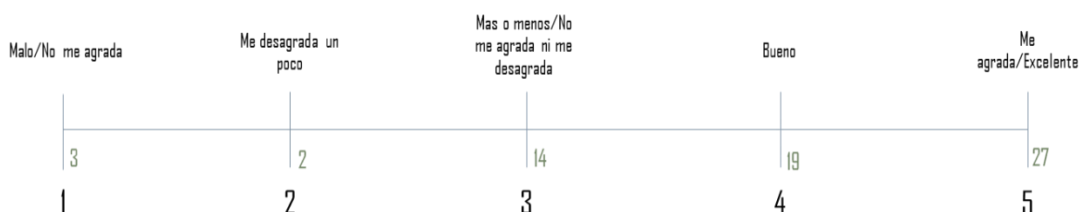


Figura 29. Se muestra la imagen digitalizada de la propuesta que se utilizó en el cuestionario en línea.

De manera sucesiva se pidió a los participantes que contestaran la siguiente pregunta:

De la imagen anterior, por favor, cuéntanos qué te agrada o desagrada del EspiruFilter.

Esta pregunta se formuló como abierta con la intención de dar libertad a los participantes a expresarse sobre la propuesta que se les presentó. Las respuestas se clasificaron en una escala tipo Likert para mejor presentación (gráfica 7).

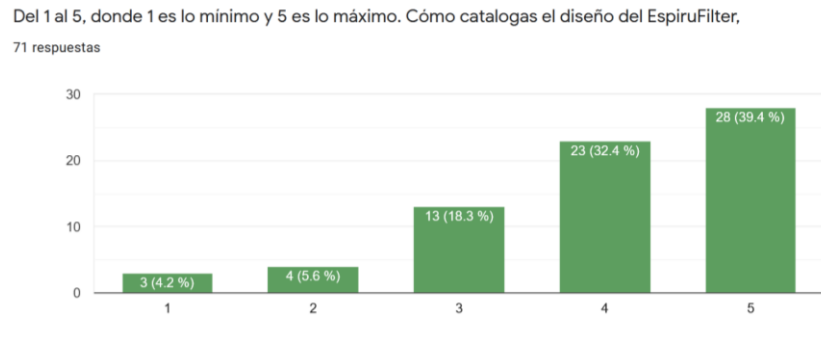


Gráfica 7. Se muestra en escala tipo Likert la clasificación de las respuestas recibidas por parte de los participantes del cuestionario en línea

La mayor parte de las respuestas recibidas clasificaron de manera positiva la idea, destacando que el desarrollo permite un consumo mucho más fácil del alga al tenerlo en casa. Sólo tres de los participantes mostró inquietud negativa respecto al tamaño y color de la propuesta.

La siguiente pregunta se enfocó en el diseño del desarrollo, para saber cómo es que los participantes percibían de manera estética la propuesta.

Del 1 al 5, donde 1 es lo mínimo y 5 es lo máximo. ¿Cómo catalogas el diseño de EspiruFilter?



Gráfica 8. Se muestran los resultados

De las respuestas, 28 (39.4%) de los participantes respondió de manera positiva al diseño de la propuesta, sólo 23 (32.4%) respondieron de manera moderada. Del total 13 (18.3%) de los participantes respondieron de manera neutral y sólo 3 (4.2%) participantes respondieron de manera negativa al diseño propuesto.

De manera sucesiva, se les mostró a los participantes una imagen digitalizada de una interfaz de usuario adapta para dispositivos táctiles como teléfono móvil o Tablet. Se les explicó, además, que la propuesta “EspiruFilter” se controla a través de una aplicación para dispositivos móviles (figura 30).

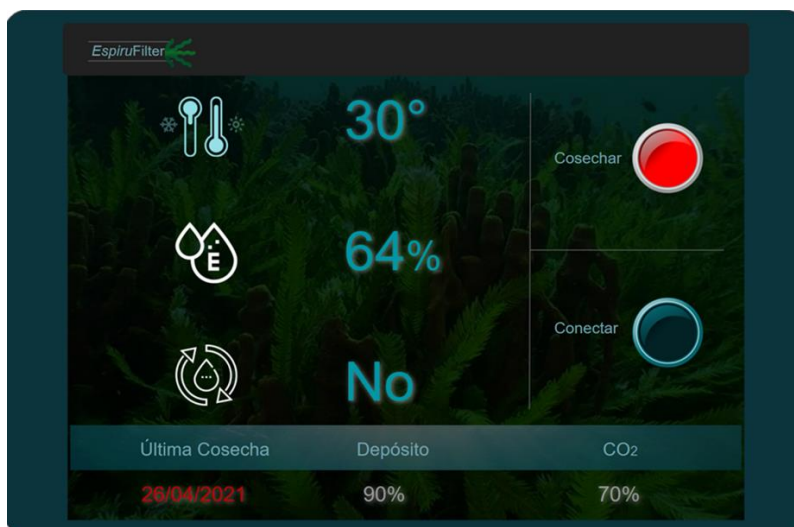
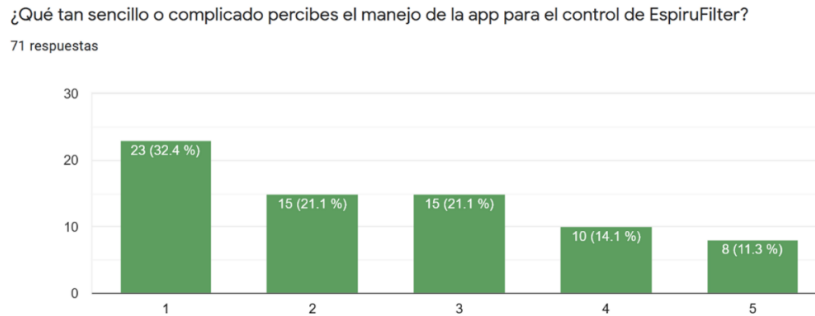


Figura 30. Se muestra una imagen digitalizada de la interfaz de control de la propuesta adaptada para dispositivos con pantalla táctil.

Una vez que los participantes observaron la interfaz de usuario, se les pidió que respondieran la siguiente pregunta (gráfica 9):

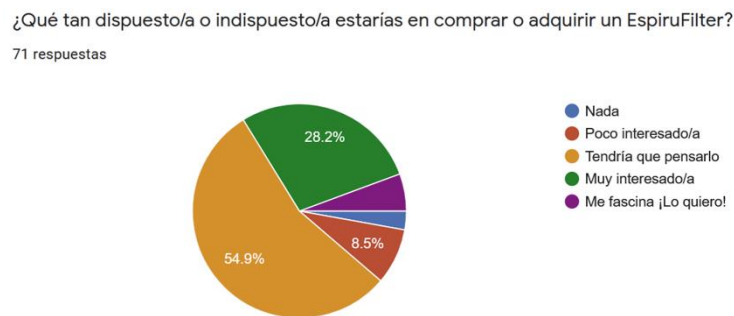
¿Qué tan sencillo o complicado percibes el manejo de la aplicación para el control de EspiruFilter?



Gráfica 9. Se muestran los resultados clasificados de las respuestas recibidas por parte de los participantes del cuestionario en línea.

Esta pregunta se realizó en formato tipo Likert, donde los participantes podían elegir entre la opción 1 catalogada como “muy sencillo” e ir subiendo hasta el 5 catalogado como “muy complicado”. La mayor parte de las respuestas por parte de los participantes (32.4%) clasificaron de manera positiva la aplicación escogiendo la opción de “muy sencillo”. Las opciones 2 (moderadamente sencillo) y 3 (neutral), se mantuvieron al mismo nivel de respuestas con 21.1% cada una. El siguiente nivel correspondiente al número 4 y con descripción de “moderadamente complicado” obtuvo un 14.1% de las respuestas, mientras que la opción de “muy complicado” obtuvo el 11.3%. Con esto se puede observar que el porcentaje de participantes que catalogaron la aplicación como de uso complicado, sumando ambos niveles 4 y 5, nos da un total de 25.4%.

Finalmente, se cuestionó a los participantes sobre su disposición a adquirir un objeto como el que se les mostró durante el cuestionario (gráfica 10).



Gráfica 10. Se muestran los porcentajes de aceptación por parte de los participantes a ver la propuesta como posible producto para el hogar.

En la gráfica 10 se puede observar que la mayor parte (54.9%) de los participantes del cuestionario respondió de manera moderada mencionando que tendrían que pensarlo. Seguido de un 28.2% que respondió que le interesaría adquirir un artículo como el propuesto. De manera contraria, un 8.5% de los participantes no mostraron interés en la propuesta como posible artículo para el hogar.

Finalmente, se les preguntó a los participantes si deseaban dejar algún comentario adicional a elección libre. Tales respuestas se muestran en las figuras 31 y 35.

Definición de Usuarios

De los resultados obtenidos del cuestionario se concluyen varios factores. En primera instancia, la mayor parte de los participantes poseen una escolaridad alta (profesional), lo que el nivel de conocimiento en cuanto al uso de tecnología móvil, pc, laptop y Tablet es alto. El uso de dispositivos móviles obtuvo el puntaje más alto, de acuerdo con esto, la propuesta se desarrolla en torno a este tipo de dispositivos.

Debido a que los rangos de edad de los participantes obtuvieron valores muy cercanos como 20-29 con 38%, 40 a 49 con 23.9% y de 50-59 con 18.3%, se decide generar tres perfiles diferentes que encajen en estos tres rangos.

La mayor parte de los participantes notificó poseer uno o más dispositivos domésticos controlados a través de teléfono táctil, lo que resulta muy positivo para la aceptación del control del FBR por medio de este tipo de dispositivos.

La mayor parte de los participantes afirmó poseer conocimiento previo con respecto al alga Espirulina, esto puede ser algo muy positivo ya que se puede indicar que el nivel de conocimiento del alga Espirulina en la sociedad es alto.

Es de mencionar que el cuestionario aquí desarrollado es de formato simple y el tamaño de la muestra es pequeño, durante el proceso de diseño se deben hacer más evaluaciones posteriores con muestras más grandes y desarrollar una metodología estadística para el análisis cuantitativo de los resultados.

Sin embargo, el ejercicio anterior abre la puerta para la definición primaria de usuarios potenciales. A través de un mapa de empatía (figura 31) se realiza una clasificación de las respuestas a las preguntas abiertas donde se recibieron comentarios por parte de los participantes.

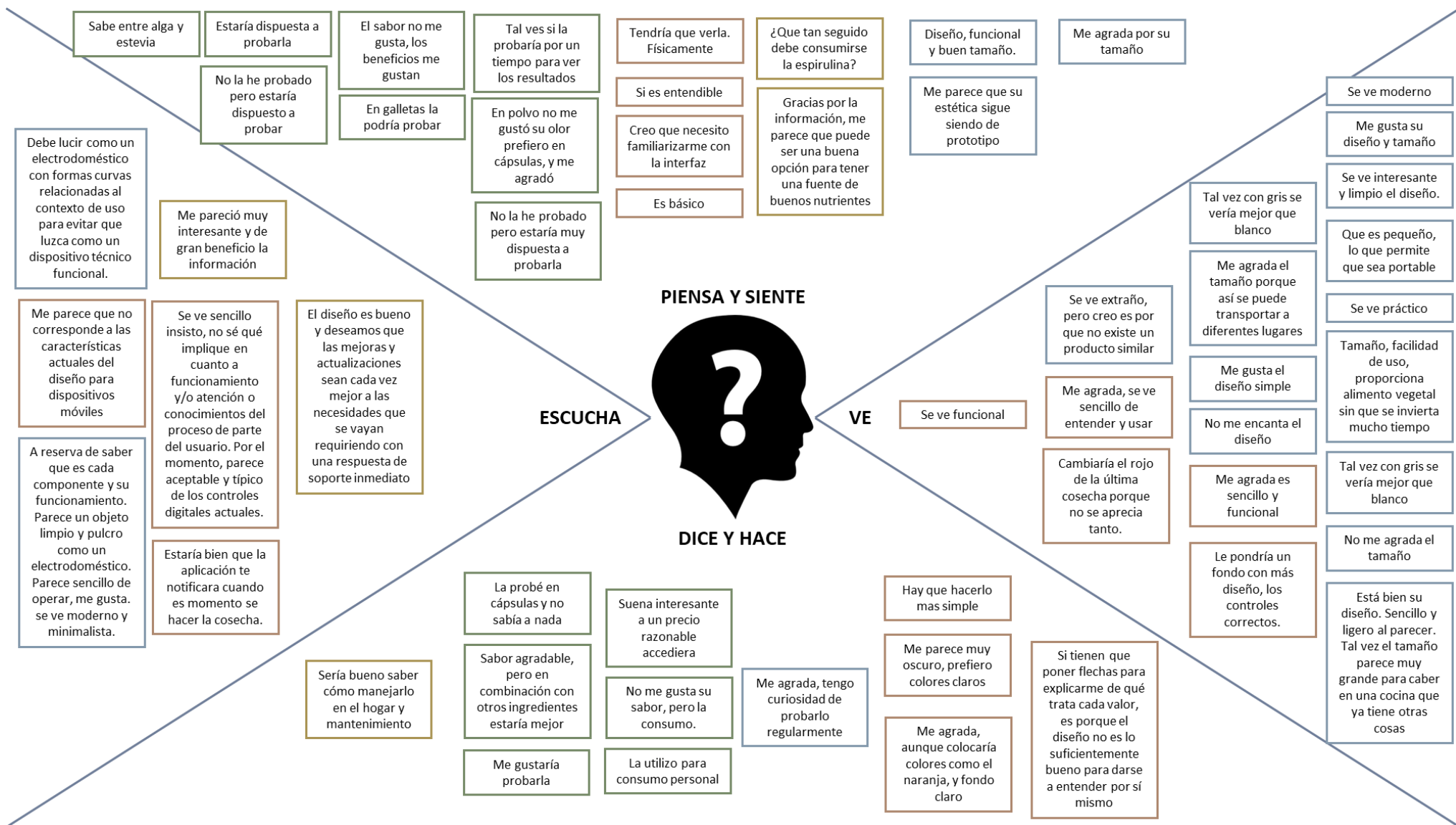


Figura 31. Se muestran las respuestas a las preguntas abiertas más sobresalientes. Cada color indica la referencia del comentario. Verde: Espirulina (¿Qué tan dispuesto/a estarías en probarla? Si ya la has probado, por favor, coméntanos ¿qué tal te parece? Gráfica 6), Azul: EspiruFilter (De la imagen anterior, por favor, cuéntanos qué te agrada o desagrada del EspiruFilter. Gráfica 7). Naranja: Diseño de la interfaz digital (¿qué tanto te agrada o desagrada el diseño de la pantalla?). Amarillo: Comentarios adicionales (¿Quieres dejarnos algún comentario?).

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las respuestas recibidas en las preguntas abiertas, en la figura 35, se enlistan algunos comentarios que muestran que podría motivar a los usuarios a probar la propuesta o qué haría que un usuario rechace aceptarla (figura 2).

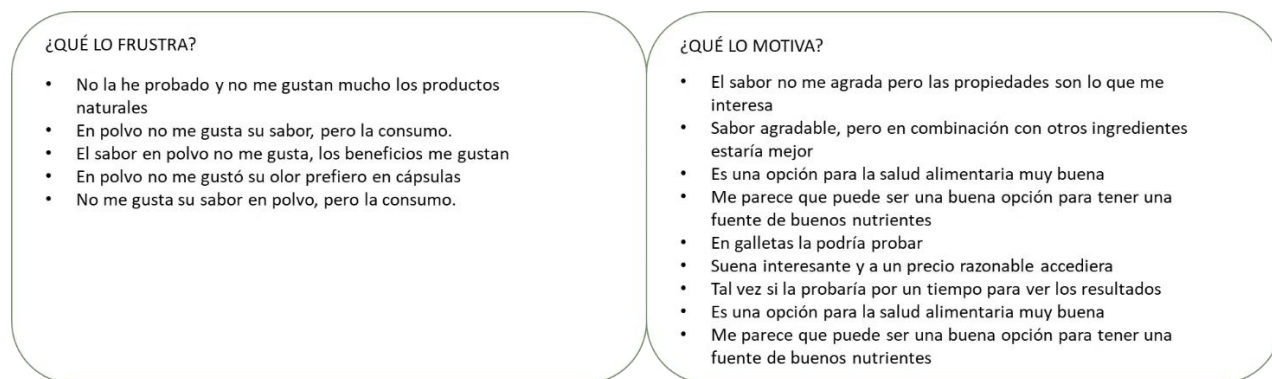


Figura 32. Se muestran algunas respuestas recibidas durante el cuestionario como evidencia de qué factores podrían motivar o detener a los usuarios de aceptar la propuesta.

Con base en los resultados del cuestionario y la clasificación de las respuestas en el mapa de empatía (figuras 31, 32), se elaboran 3 perfiles de usuario distintos. Para la elaboración de cada perfil se utiliza el formato “persona”⁽¹¹⁹⁾, el cual es un método utilizado ampliamente en el Diseño Centrado en el Usuario (Capítulo 2.4-DCU), en el que se generan personajes ficticios con base en ciertas características pertenecientes a un grupo demográfico determinado que pudieran resultar usuarios potenciales de determinados productos⁽¹¹⁹⁾.

El primero perfil (figura 33) es Roberto, una persona profesionalista y aficionada al ejercicio físico. Posee conocimiento previo del alga Espirulina, la ha probado en cápsulas, conoce sus propiedades y beneficios. Tiene interés en su consumo regular. Posee un alto conocimiento en el manejo de dispositivos móviles, primordialmente, teléfono móvil o Tablet. Su edad corresponde al mayor porcentaje obtenido en el cuestionario (38%) con 29 años y es residente de la Ciudad de México. Roberto suele preferir marcas ecológicas y de alimentos orgánicos.

Usuario 1: Roberto Jiménez



Figura 33. Se muestra en formato “persona” un primer perfil de posible usuario de la propuesta.

El segundo perfil de usuario se llama Marina (figura 34). Ella es una mujer de 53 años residente del área metropolitana, aficionada a las plantas y dedicada al sector salud. Marina es consciente del cuidado de su salud y siempre está en busca de alimentos altamente nutritivos. Su manejo de dispositivos móviles es básico, normalmente los utiliza sólo para comunicarse o como entretenimiento. Ha escuchado hablar sobre el alga Espirulina, no la ha probado, aunque le llama la atención los beneficios y propiedades que ha escuchado de algunos colegas y comerciales de marcas en polvo.

Usuario 2: Marina

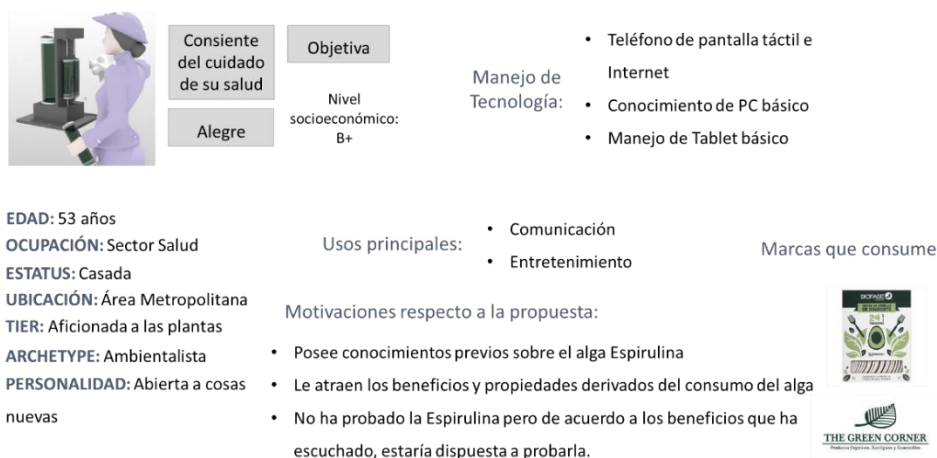


Figura 34. Se muestra en formato “persona” un segundo perfil de posible usuario de la propuesta.

El siguiente perfil de usuario es Miguel López (figura 35), un empresario de 37 años aficionado a la tecnología y residente en la región centro del país. Miguel es consciente del cuidado de su salud y la de su familia, lo que lo hace preferir el consumo de marcas de alimentos orgánicos y ecológicos. Su afición a la tecnología y su trabajo le permiten un conocimiento alto en el uso de pc, tablet, y dispositivos domésticos y de oficina controlados a través de teléfono inteligente. Normalmente utiliza su móvil para monitorear sus sesiones de ejercicio físico. Miguel no poseía conocimiento sobre el alga Espirulina, sin embargo, al escuchar sobre ella, se muestra dispuesto a probarla y ver los resultados.

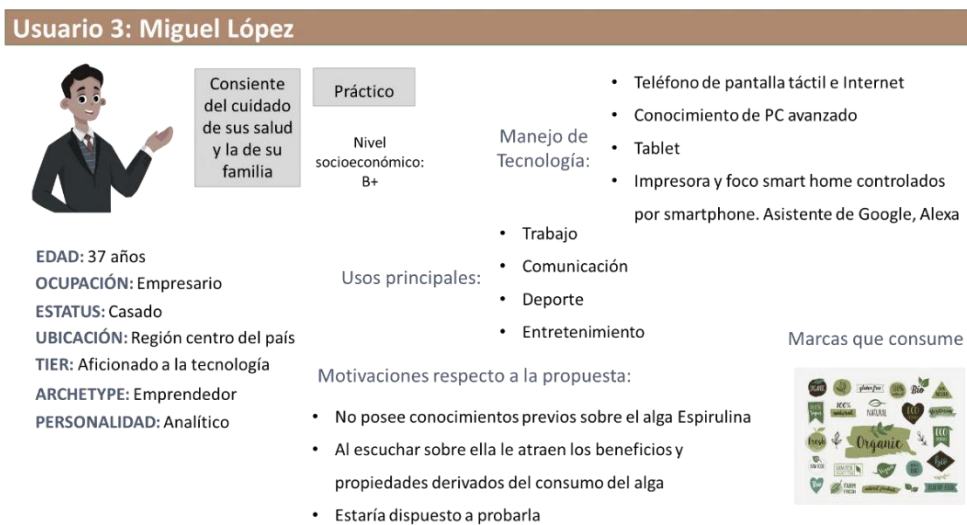


Figura 25. Se muestra en formato “persona” un tercer perfil de posible usuario de la propuesta.

4.2. Funcionamiento General de Sistema

La figura 37 muestra el esquema general de un sistema microalgal (FBR) para la producción de biomasa de alga Espirulina de uso doméstico. En dicho sistema el usuario obtiene biomasa fresca que utiliza como alimento de alta proteína. El usuario realiza la instalación del FBR que consiste en el llenado del tanque (fotocelda), conexión a la red eléctrica, y adición de nutrientes para el cultivo. El usuario y el FBR comparten información mediante el uso de una aplicación digital para dispositivos móviles. El usuario controla dicho dispositivo y recibe notificaciones del estado de la microalga, nivel de nutrientes, agua y

programación de cosecha a través de la aplicación digital, así como una cuantificación de la cantidad de CO₂ capturado.

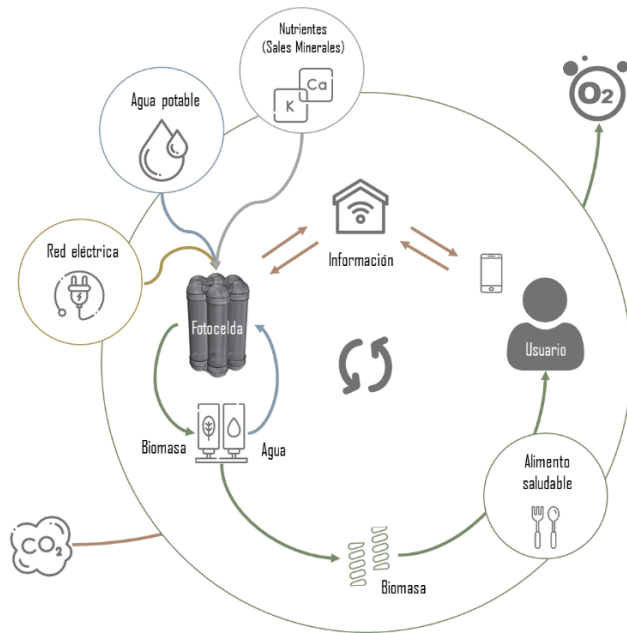


Figura 37. Diagrama esquemático que muestra de forma general el funcionamiento y requerimientos del sistema, así como, la interacción que el usuario tendrá con el sistema a través de su dispositivo móvil.

El sistema se compone de varios subsistemas: (1) la fotocelda encargada de la iluminación, agitación y cultivo, (2) sistema eléctrico, (3) sistema de monitoreo de parámetros compuesto por sensores y microcontroladores y (4) el sistema de purificación de agua y recuperación de biomasa.

Secuencia de Uso

Las actividades son el conjunto de acciones que desarrollará el usuario para lograr el objetivo de recuperación de la biomasa de Espirulina (ver capítulo 2.4. DCU). Estas pueden subdividirse en tareas para mejorar su evaluación y análisis. En lo sucesivo, se describe de manera general la interacción de un usuario, de acuerdo con el perfil número 2 (capítulo anterior) denominado Miss Marina, con la fotocelda de producción de alga Espirulina:

Mis Marina cuenta con un lugar designado para la celda de microalgas en la cocina de su casa. Al despertarse por la mañana revisa el estado de la fotocelda, primero de forma visual, el color de la microalga, después a través de su teléfono celular revisa en su aplicación si es momento de cosecha.

Una vez que se asegura que es momento de realizar una cosecha, enciende el sistema de cosechado y espera unos minutos. Una vez terminado el proceso de cosecha, miss Marina desactiva el seguro del cartucho a la manguera, desenrosca la tapa del cartucho del filtro, retira el filtro y lo desenrosca para abrirlo, retira la malla de filtrado y la abre, exprime la pasta de Espirulina. Aquí realiza un enjuague con chorro de agua y vuelve a exprimir lista para consumirla. Retira la pasta de Espirulina con una cuchara y enjuaga la malla de filtrado. Arma el filtro y lo coloca en el cartucho, lo enrosca para cerrarlo y lo vuelve a colocar de nuevo en el lugar del filtro. Agrega el agua necesaria hasta el nivel señalado en la fotocelda y adiciona una pastilla de nutrientes. Recibe una notificación a través de la aplicación en su smartphone indicando que el proceso de cosecha ha concluido, toma la Espirulina filtrada y prepara su desayuno.

Para la limpieza del biofiltro, cada mes, Miss Marina utiliza paños para limpiar la superficie externa del biofiltro y hace el llenado de agua necesaria, según el nivel de agua marcado en la fotocelda.

Para el uso de la biomasa como fertilizante, Miss Marina toma la biomasa fresca y recién filtrada y la diluye en agua limpia para después verterla directamente en sus plantas y vegetales.

Miss Marina es feliz con su fotocelda de microalgas, es versátil y fácil de usar.

De la secuencia de uso anterior se deriva el siguiente diagrama de flujo (figura 38) que incluye las tareas que el sistema FBR deberá realizar para cumplir con el objetivo de proporcionar alga Espirulina fresca al usuario:

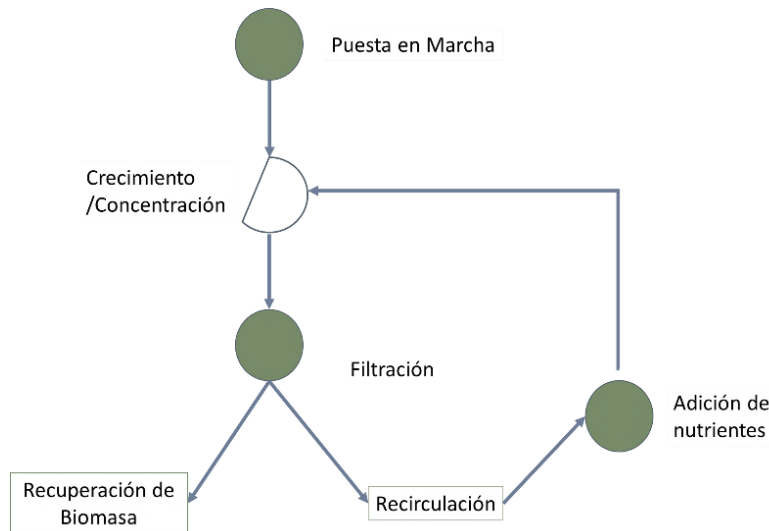


Figura 38. Diagrama de flujo de proceso de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

El proceso comienza con la *puesta en marcha*, la cual requiere de la participación del usuario y se compone de las siguientes tareas.

- Llenar de agua la fotocelda,
- conectar a la corriente eléctrica para iniciar agitación,
- agregar los nutrientes y esperar a que se homogenice,
- agregar la cepa inicial de Espirulina.

Una vez concluido el proceso de *puesta en marcha* se da comienzo a la etapa de *concentración/crecimiento*. En esta etapa la microalga Espirulina comienza a reproducirse. El sistema FBR se mantiene a una temperatura y agitación constantes (ver capítulo 4.5-Control de temperatura). La iluminación se controla de manera automática y no requiere ninguna acción de parte del usuario.

Una vez que la concentración de alga es la suficiente para poder comenzar el proceso de cosecha, el sistema de monitoreo de parámetros notifica al usuario por medio de su aplicación móvil. Al activarse el proceso de *recuperación de biomasa*, el sistema enciende una bomba de agua que extrae agua en combinación con el alga y la pasa al *sistema de filtración*. En la primera etapa del *proceso de filtración* se separa la biomasa de Espirulina y el agua que contiene medio residual. Esta agua residual pasa a un segundo filtro que purifica el agua y la recircula nuevamente a la fotocelda para reiniciar el proceso. En este punto se notifica al usuario que es necesaria la adición de nutrientes. En el caso de la adición de nutrientes, este puede darse por medio de una reserva intercambiable y reutilizable si se desea que sea de manera automática y no requiera la participación del usuario.

El usuario extrae la biomasa de Espirulina del cartucho de filtración y realiza los pasos necesarios para consumirla (ver capítulo 4.4-Filtración).

Mantenimiento

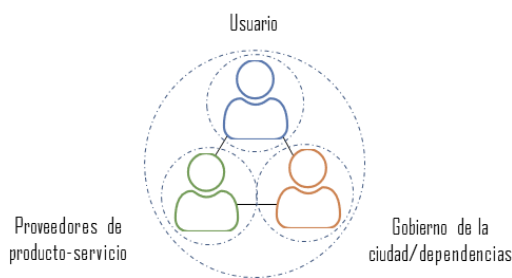
Hasta ahora se han descrito las características de funcionamiento del equipo en desarrollo, sin embargo, también es importante tener en cuenta las características derivadas del uso de tal dispositivo en un ambiente doméstico, donde el usuario es ciertamente inexperto en el funcionamiento técnico del dispositivo. Es aquí donde debemos plantearnos algunas preguntas de vital importancia como:

- ¿Qué se debe hacer en el caso de un problema técnico?
- ¿Quién lo va a reparar o dar mantenimiento?
- ¿Qué componentes son más proclives a fallar?
- ¿Qué procedimientos se deben seguir para dar mantenimiento al sistema?
- ¿Cuáles son los aspectos de seguridad en el uso de tal dispositivo?
- ¿Cómo proteger el dispositivo y al usuario de un mal funcionamiento?

Todos estos aspectos son de gran importancia si se pretende lograr algunos objetivos descritos anteriormente, como que el equipo funcione correctamente durante un largo periodo de tiempo, extender su vida útil, minimizar el mantenimiento y reparaciones, de lo cual mucho se puede tener en cuenta en el proceso de diseño y manufactura del dispositivo. Es importante señalar que tales aspectos invariablemente involucran diversos actores, desde el diseñador que resuelve el ensamble de dichos componentes y decide materiales, hasta el técnico que le dará mantenimiento, pasando por las decisiones tomadas en la línea de producción y que se ven influenciadas por las cadenas de suministro, proveedores, y procesos de manufactura, aspectos que además tienen un efecto directo en los costos de producción.

Aunado a esto, estas cuestiones pueden variar dependiendo de la forma de comercialización del producto, si es un producto que posee el usuario es muy probable que las reparaciones sean su responsabilidad. La pregunta que se deriva de esta situación es ¿dónde obtendrá el usuario el servicio técnico de reparación, en este caso? Si el equipo se dispone en renta como modalidad de un producto-servicio, en este caso las reparaciones son responsabilidad de la misma organización que fabrica y gestiona el dispositivo, en cualesquiera casos, lo ideal es disminuir en lo más posible la periodicidad en los mantenimientos, reparaciones y extender la vida útil, lo que puede significar una mejora en la competitividad de dicha organización.

La figura 56 muestra un esquema de los diversos actores involucrados durante la vida útil del dispositivo. Se puede observar que además del usuario y el proveedor del servicio, se encuentran el gobierno a través de algunas dependencias como pueden ser el suministro de agua potable, red eléctrica, normas oficiales de regulación en materia de inocuidad, seguridad alimentaria, componentes eléctricos, etc.



*Figura 39. Se muestra un diagrama esquemático de los actores involucrados durante la vida útil del equipo.
Fuente: elaboración propia.*

La relación entre el usuario y el proveedor de servicio es muy probable que no sólo incluya el mantenimiento y reparaciones, sino también el suministro del medio de cultivo y/o la cepa inicial si es que

por alguna razón el usuario necesitase de una cepa nueva. Lo que involucra un canal abierto de comunicación entre el usuario y la organización encargada del servicio, lo que se verá influenciado por la capacidad de respuesta y los materiales disponibles para proveer de dicho servicio.



Figura 40. Diagrama esquemático que muestra las relaciones entre los diversos actores durante la vida útil del producto. Fuente elaboración propia.

Además, se debe tener en cuenta el probable uso colectivo de tal tecnología. Un uso colectivo la utilización del dispositivo por grupos de personas interesadas en recibir un beneficio de éste. La producción colectiva de alga Espirulina es viable si el producto se escala a volúmenes que hiciesen esto posible. En estos casos, ¿quién es el responsable de la tecnología, de su mantenimiento, reparaciones y suministro de consumibles? La organización debe asegurar que tales cuestiones sean fácilmente solucionadas por los usuarios para que tal tecnología cumpla sus objetivos y siga siendo útil después del tiempo.

4.3. Descripción Técnica

Tipo de FBR

Como resultado del análisis de características y geometrías en FBR's (ver capítulo 3.1-Fotobiorreactores) se elige un diseño de FBR tipo columna vertical debido a que ocupa poco espacio, su viabilidad de construcción es alta, posee facilidad en su limpieza y puede requerir bajo mantenimiento.

Iluminación

La iluminación del contenedor se realiza por medio de una tira led de 12V dispuesta de forma vertical a largo del tubo de acrílico, entregando una cantidad de luz total de 2500 luxes hacia el centro del tubo. La cantidad de luz emitida se medirá con un sensor de iluminación marca Steren modelo HER-410 a temperatura ambiente promedio de 25 °C.

Temperatura

Como ya se describió, la temperatura es uno de los parámetros más elementales en tener en cuenta para el correcto crecimiento de las microalgas. Es de suma importancia que la temperatura no baje de los 25 °C durante las horas en las que la temperatura ambiente disminuye, por ejemplo, en las noches. Para el control de temperatura, se utilizará un termostato con resistencia cubierta que mantendrá la temperatura entre los 30 °C y 32 °C (ver capítulo 4.3-Control de Temperatura). Asegurando que las microalgas tengan la suficiente energía circundante en el medio para realizar fotosíntesis al encenderse la luz led.

pH

El monitoreo del pH se realizará tomando muestras cada cierto tiempo durante los experimentos para determinar si los valores cambian significativamente durante el uso. Este parámetro es de vital importancia para el crecimiento adecuado de la microalga, pero puede ser algo complicado para un usuario real sin conocimientos técnicos realizar el monitoreo y un posible ajuste si se sale del rango adecuado.

Descripción General

La figura 39 comprende un diagrama isométrico que muestra los componentes del sistema FBR. Este se compone de cuatro subsistemas principales, (1) la fotocelda encargada de la iluminación, agitación y cultivo, (2) sistema eléctrico, (3) sistema de monitoreo de parámetros compuesto por sensores y microcontroladores y (4) el sistema de purificación de agua y recuperación de biomasa.

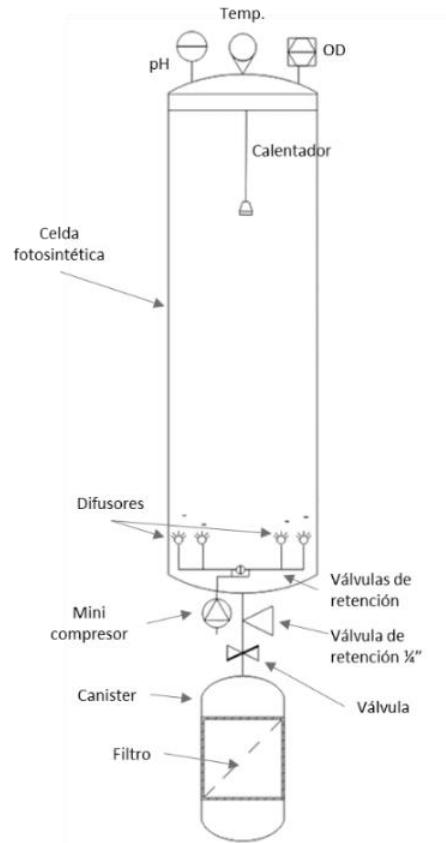


Figura 41. Se muestra un diagrama isométrico del sistema general que comprende el subsistema fotobiorreactor (fotocelda), el subsistema de filtración y recuperación de biomasa, y el subsistema de monitoreo de parámetros. Fuente: elaboración propia.

En la parte superior se localizan los sensores de pH y temperatura, así como, la entrada para el llenado y limpieza de la fotocelda. En la parte inferior se encuentra el sistema de aeración que se compone de 3 difusores dispuestos de forma radial en el disco inferior y 3 válvulas de retención, una por cada difusor. El aire es suministrado por una bomba peristáltica de 12 V con un flujo sin carga de 3.2 L/min. En el centro del disco inferior se encuentra una salida de flujo de 1/4 de pulgada hacia el filtro, el flujo es controlado por una válvula manual.

El filtro se compone de un cartucho de filtración con entradas y salidas de 1/4 de pulgada, en su interior se coloca una malla de filtración con abertura de 32 micrómetros (ver capítulo 4.2-Filtración). A la salida del primer filtro, el flujo de agua es dirigido a un segundo filtro que purifica el agua por medio de carbón activado y silicatos. El flujo para la filtración es potenciado por una bomba de succión de 12 V y 0.7 A con entrada de 1/4 de pulgada y una capacidad de 1.3 L/min.

Diseño del contenedor (fotocelda)

De acuerdo con lo descrito en la sección de *Selección de Materiales* del capítulo 3.7, el material elegido para la construcción de la fotocelda de *Espirulina* es el PMMA grado alimenticio, el cual, es un poco más accesible que el policarbonato, posee buena resistencia, se encuentra en grado alimenticio y puede encontrarse con resistencia a rayos UV. Es, además, un material que puede maniobrase y trabajarse con mayor facilidad que el vidrio. De manera que, el contenedor principal o fotocelda se compone de un cilindro transparente de Polimetilmetacrilato (acrílico) de 3mm de espesor, 6 pulgadas (15.24 cm) de diámetro y un largo de 45 cm. Lo que da un volumen total de 8 L (7.5 L utilizables). La altura total del contenedor junto con disco superior e inferior es de 55 cm (figura 42).

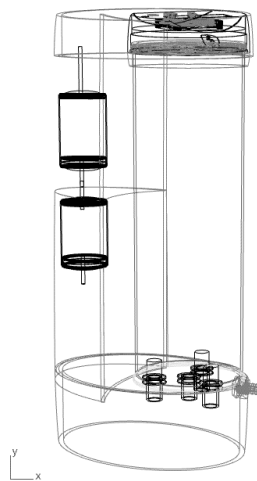


Figura 42. Diagrama isométrico del contenedor de la fotocelda con tapas inferior y superior. Medidas en milímetros. Fuente: elaboración propia.

El disco inferior (figura 41) comprende un diámetro de 15.30 cm. Este se dispone de forma transversal en la entrada inferior del contenedor sellando la salida de líquido al entrar en contacto con el anillo de cierre y dirigiendo el flujo hacia un orificio central de salida con diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulgada que conecta el contenedor con el filtro de biomasa.

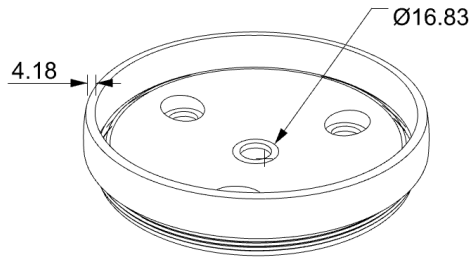


Figura 41. Se muestra el diseño 3D del disco inferior que sella el reactor y contiene el sistema de aireación.
Fuente: elaboración propia.

El disco inferior junto con el tubo de acrílico embona y hace contacto en el perímetro interior del cople de sellado (Figura 40), el cople de sellado tiene un diámetro externo de 15.34 cm y una distancia de entrada de 3 cm.

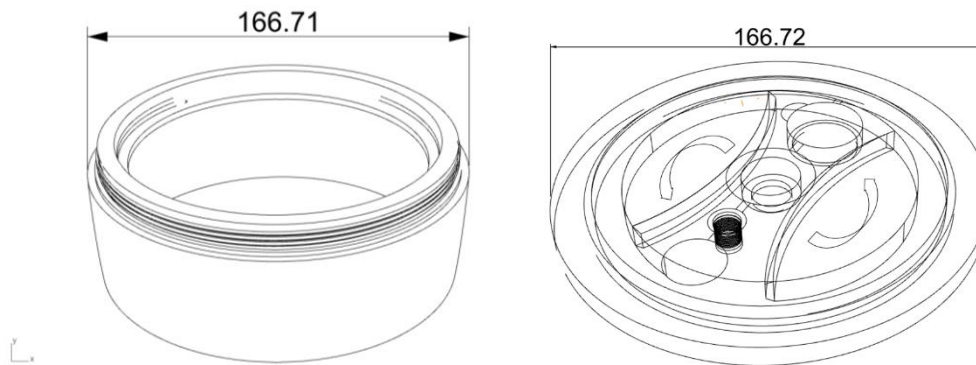


Figura 42. (Izquierda) Cople externo superior. (Derecha) Disco de sellado superior y sujeción de sensores.
Fuente: elaboración propia.

El disco superior cuenta con un orificio central en el cual se coloca el termostato por resistencia aislada para el control de temperatura, además, cuenta con dos cavidades dispuestas de forma radial en los cuales van sujetos los sensores de pH y temperatura, respectivamente, y una válvula de escape de gases (figura 43).

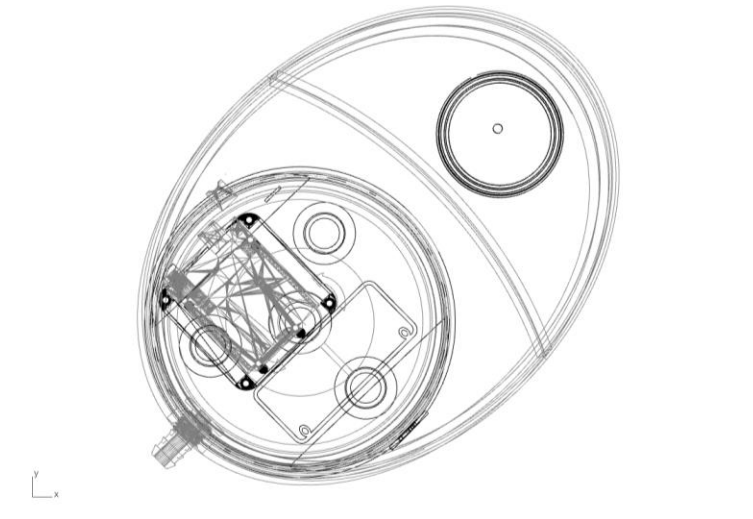
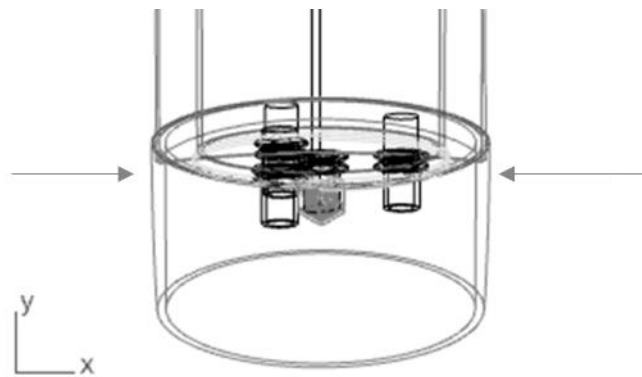


Figura 43. Se muestra un diagrama espacial con vista superior del prototipo. Fuente: elaboración propia.

Como estudio complementario para conocer la resistencia de las piezas se calcula la presión hidrostática sobre la base del contenedor con el fin de conocer la presión total que ejercerá el líquido sobre la base cuando éste se encuentre en estado de reposo (figura 44).



$$P = \rho gh \quad (7)$$

Figura 44. Cálculo de la presión de la columna del líquido sobre la base del contenedor.

Dando como resultado 0.045 kg/cm^2 lo que equivale a una carga total de 8.20 kg sobre la base, tomando la densidad del fluido como 1000 kg/m^3 . Este cálculo se realiza despreciando la carga por componentes del medio de cultivo y el crecimiento microalgal. Este peso es lo que el disco inferior cargará y puede tomarse en cuenta en el diseño y manufactura de este componente (detalles de cálculo Anexo C).

Mezclado

El mezclado del medio microalgal al interior de la fotocelda es generado por el sistema de inyección de aire localizado en la parte inferior del contenedor (figura 45); éste se compone de 3 difusores de aire dispuestos de forma radial, cada uno sellado por una válvula de retención que permite el paso de flujo de aire hacia el interior de la fotocelda sin permitir la fuga de agua hacia el exterior.

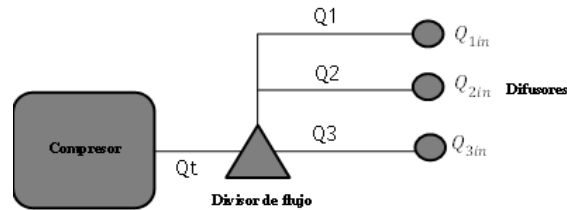


Figura 45. Se muestra un diagrama esquemático de distribución del sistema de aireación.
Fuente: elaboración propia.

El aire es suministrado por una bomba peristáltica de 12 V con un flujo sin carga de 3.2 L/min. En cada entrada de aire al contenedor se encuentra un difusor de aire de acero inoxidable con tamaño de burbuja de 0.5 a 2 micrómetros. Estos difusores liberan aire con dirección ascendente empujando el medio líquido hacia arriba, lo que genera un ciclo de flujo dentro del contenedor (figura 46). Con esto se busca asegurar que el mezclado dentro del contenedor sea lo más homogéneo posible y generar flujos de turbulencia para estimular el intercambio de gases (liberación de O_2 y disponibilidad de CO_2) en la fase líquida.

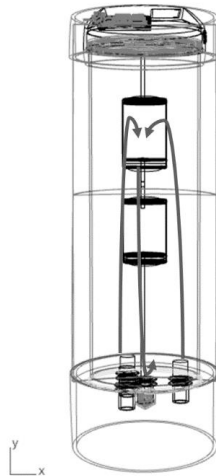


Figura 46. Flujo del medio microalgal dentro del contenedor del reactor. Fuente: elaboración propia.

En investigaciones posteriores tal dinámica del fluido puede modelarse por medio de análisis CFD (ver capítulo 3.4-Simulación Matemática), con el fin de conocer más a detalle las trayectorias de flujo y cómo es que afectan el intercambio de CO_2 y O_2 en la fase líquida y los números de transferencia de masa.

4.4. Filtración

La filtración es un proceso de bioseparación de un biológico sólido suspendido en un medio líquido a través de una membrana y un gradiente de presión. Tal proceso involucra la generación de una *torta de filtrado* sobre la superficie de la membrana ⁽¹²⁰⁾.

Factores que intervienen el proceso de filtración ⁽¹²⁰⁾:

- Requerimientos del proceso (flujo, % de separación, postratamiento, esterilidad),
- Propiedades del caldo (tamaño de la célula, densidad, viscosidad, porcentaje de sólidos, tipo de torta formada),
- Características del equipo (capacidad, filtrado intermitente o continuo, concentración máxima, claridad de la descarga).

El objetivo del sistema de filtración que aquí se propone es, en una primera etapa, separar la biomasa de *Espirulina* del medio líquido y, en una segunda etapa, filtrar el agua resultante para remover micropartículas remanentes y contaminantes presentes, y con esto, lograr su reutilización en el siguiente proceso de crecimiento.

Dicho sistema de filtración se compone de un contenedor de 2.3 L, el cual tiene una entrada de flujo en la parte superior que conecta a la salida de flujo del contenedor del reactor la cual se encuentra en la parte inferior del tanque a través del orificio central del disco inferior. Anterior a la entrada, se encuentra una válvula de flujo manual. Este flujo descendente pasa directamente al sistema de filtrado (figura 47). Aunque el prototipo funciona por medio de una válvula manual, este flujo puede controlarse automáticamente por medio de una válvula “check” de accionamiento automático por diferencia de presión.

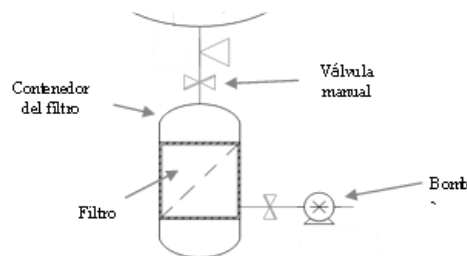


Figura 47. Diagrama isométrico que muestra los componentes de la unidad de filtrado.

El sistema propuesto genera, a través de una bomba de succión, una presión negativa dentro del contenedor, que extrae el caldo de microalgas y lo filtra a través de una membrana con abertura de 32 micrómetros. Las células jóvenes de *Espirulina* poseen un tamaño promedio de 8 micrómetros (μm) ⁽¹²¹⁾, mientras que las células más grandes alcanzan un tamaño de hasta 60 μm ⁽¹²²⁾. El tamaño de abertura de la membrana que aquí se propone tiene como finalidad retener las células de *Espirulina* más grandes y medianas, mientras que las células jóvenes aún permanecen en el medio para crecer y reproducirse e iniciar el proceso de concentración nuevamente.

Dicho proceso de filtración se realizará por medio de lotes, cada vez que el sensor de turbidez SEN0189 controlado por Arduino (ver capítulo 4.6-Medición de Parámetros y Control) detecta que la concentración de *Espirulina* es la óptima para comenzar el proceso de filtración, se le notificará al usuario por medio de la aplicación digital el momento de comenzar el proceso. De esta manera, el proceso de filtración se divide en ciclos de operación (figura 48) que inician al accionarse la bomba de succión, la cual, al irse formando la torta de células de *Espirulina* retenidas, irá disminuyendo la presión de forma constante (se toma la formación de la torta como de tipo incompresible); y termina con la descarga de la biomasa retenida.

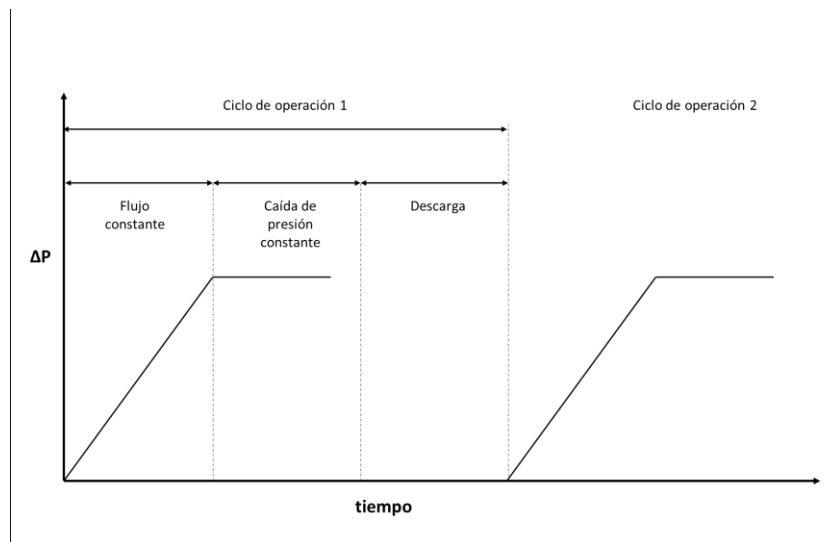


Figura 48. Se muestra el esquema de los ciclos de operación del sistema de filtración por lotes a caída presión constante y formación de torta incompresible. Obtenido y adaptado de (120).

Para el cálculo de la velocidad de filtración se utiliza la teoría de filtración por lotes con formación de tortas incompresibles y a cambio de presión constante (ecuación (8)) ⁽¹²⁰⁾:

$$\frac{(t - t_s)A}{(V - V_s)} = \frac{\mu\alpha\rho_0}{2\Delta P} \frac{(V + V_s)}{A} + \frac{\mu R_m}{\Delta P} \quad (8)$$

Donde:

t-t_s: tiempo de filtración,

A: área de la membrana,

R_m: resistencia del medio filtrante,

ΔP: cambio en la presión,

A: resistencia específica de la torta,

ρ₀: volumen de filtrado,

μ: viscosidad del fluido.

Tal ecuación permite obtener parámetros como la resistencia específica de la torta formada, la caída de presión en el filtro, la resistencia del medio filtrante, tiempo de filtrado y el área de filtración necesaria para filtrar cierto volumen de caldo ⁽¹²⁰⁾. En este caso puede suponerse que la resistencia de la torta formada es directamente proporcional al volumen de sólidos depositados por unidad de área de filtración ⁽¹²⁰⁾. La resolución de tal ecuación requiere de resultado experimentado como volumen filtrado por unidad de tiempo.

Recuperación de la biomasa filtrada

El proceso de recuperación de biomasa inicia una vez que la fotocelda ha finalizado el proceso de filtración, en este momento se notifica al usuario a través de la aplicación digital el término del proceso. El cartucho del sistema de filtración, donde la Espirulina es depositada durante el proceso, se compone de una serie de piezas desarmables con las que el usuario tendrá interacción continua durante la recuperación de la biomasa. Esto requiere que el usuario posea conocimientos básicos de apertura de envases a través del desenroscamiento de tapas y la desactivación y activación de un seguro que conecta la manguera de flujo de agua con el cartucho de filtración.

Componentes (figura 49):

- Cartucho de filtración con tapa desenroscable,
- seguro de cartucho-manguera,
- filtro con tapa desenroscable,
- malla de filtrado con tamaño de poro de 35 μm (micrómetros).

En lo sucesivo, se muestra en imágenes digitalizadas los componentes del sistema de filtración (figura 49).



Figura 49. Se muestran los componentes del sistema de filtración con los que el usuario tendrá interacción para el proceso de recuperación de la biomasa filtrada. Fuente elaboración propia.

Características relevantes para tomar en cuenta:

- El cartucho contiene una textura que ayuda a la actividad de enroscamiento,
- El filtro contiene indicadores para la colocación de dedos para ayudar al desenroscado,
- La tapa del cartucho y el filtro que contiene la membrana se encuentran unidos,
- La tapa contiene indicación visual del sentido del desenroscado tanto en cartucho como en filtro.

El proceso de recuperación de biomasa se divide en dos etapas, la primera (actividad A) consiste en una secuencia de 8 tareas (figura 50):

1. Desactivación del seguro en la manguera,
2. inclinación del cartucho,
3. desenroscamiento de la tapa del cartucho,
4. retiro del filtro,
5. apertura del filtro desenroscando la tapa,
6. retiro de la malla de filtrado del filtro,
7. retiro de la malla de filtrado,
8. retiro de la pasta de Espirulina.

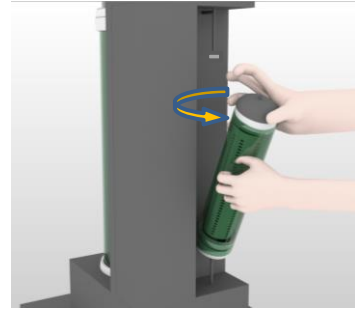
Se muestra la secuencia de las tareas en imágenes digitalizadas (figura 50),



T1. Desactivar el seguro.



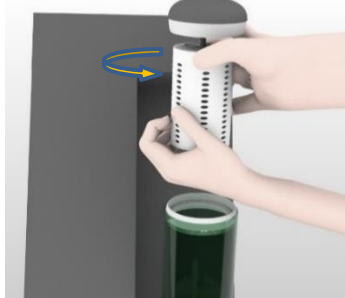
T2. Inclinarse el cartucho,



T3. Desenroscar la tapa del cartucho



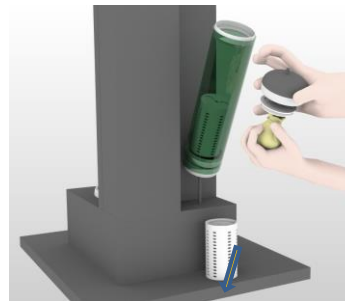
T4. Retirar el filtro,



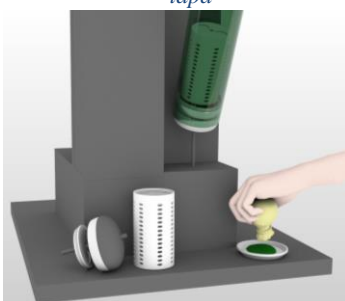
T5. Abrir el filtro desenroscando la tapa



T6. Sacar la malla de filtrado del filtro,



T7. Retirar la malla de filtrado,



T8. Exprimir la pasta de Espirulina.

Figura 50. Se muestra una secuencia en imágenes digitalizadas de las tareas que el usuario deberá seguir para cumplir con el proceso de recuperación de biomasa. Fuente elaboración propia.

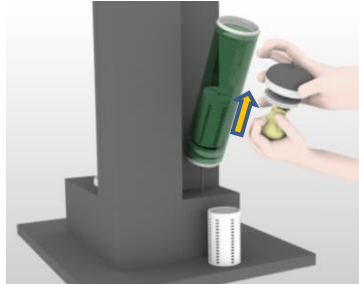
Este procedimiento debe realizarse con las manos limpias. Es posible que se deban utilizar ambas manos para la realización de las tareas. El prototipo contará con las señalizaciones de dirección de desenroscado (T3 y T5) e inclinación de cartucho (T2). La segunda etapa (actividad B) se compone del reposicionamiento de la membrana, el filtro y el cartucho, la cual consiste en una secuencia de 8 tareas (figura 51):

1. Lavado de malla,
2. colocación de malla de filtrado en la tapa del filtro,
3. insertado de malla de filtrado en el filtro,
4. enroscamiento de la tapa del filtro,
5. colocación de filtro en cartucho,

6. enroscamiento de la tapa del cartucho,
7. colocación de cartucho armado en posición vertical,
8. activación del seguro a la manguera.



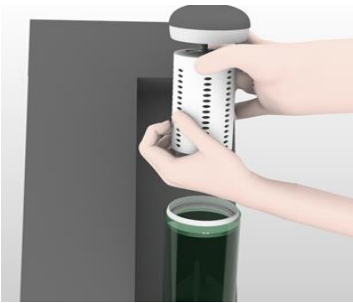
T1. Enjuagar la malla de filtrado.



T2. Colocar la malla de filtrado en tapa del filtro.



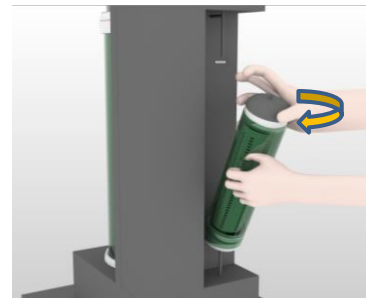
T3. Insertar la malla de filtrado en el filtro.



T4. Enroscar la tapa del filtro para cerrarlo.



T5. Insertar el filtro en cartucho.



T6. Enroscar la tapa del cartucho para cerrarlo.



T7. Colocar el cartucho en posición vertical.



T8. Colocar el seguro de cartucho a manguera.

Figura 51. Se muestra una secuencia en imágenes digitalizadas de las tareas que el usuario deberá seguir al término del proceso de recuperación de biomasa para colocar los elementos del sistema de filtración de nuevo en su lugar. Fuente elaboración propia.

Este proceso incluye la purificación de la biomasa recuperada, la cual consiste en un enjuague con agua limpia para retirar el exceso de sales y minerales presentes en el caldo de cultivo y aún remanentes en la biomasa. Una vez realizado este enjuague, la biomasa está lista para ser consumida por el usuario.

Además, es importante mencionar que dicho sistema de filtración/recuperación de biomasa de *Espirulina* se debe evaluar por medio de pruebas ergonómicas y de usabilidad para que cumpla con especificaciones que se acomoden a las necesidades de los usuarios. Es preciso analizar aspectos como las dimensiones de los componentes, posturas en la interacción usuario-objeto, la claridad en los signos al usuario y el ambiente adecuado para el funcionamiento. Estos aspectos son de gran relevancia en el proceso de diseño pues ayudan a dotar al objeto de las características adecuadas para su correcto funcionamiento y cumpla su objetivo de ser útil al usuario con el fin de conocer características importantes o relevantes del mismo durante la interacción con el usuario arrojando especificaciones de mejora.

4.5. Control de Temperatura

El análisis de transferencia de calor tiene como propósito saber la cantidad de tiempo que le tomará a la resistencia calentar el volumen de agua total dentro de la fotocelda, el tiempo estimado en que la resistencia se encontrará encendida, y así obtener una estimación del gasto energético del sistema de calentamiento.

El control de la temperatura se realiza a través de una resistencia de 200 watts aislada y controlada por Arduino. Se mide la temperatura del cultivo por medio de un sensor termopar DS18B20 encapsulado para líquidos. La resistencia se enciende cuando la temperatura desciende a los 30°C y se apaga cuando ésta llega a los 32°C.

De esta manera se establece un rango de operación entre 30°C y 32°C estimando que la variación de temperatura sea la mínima posible sin afectar la productividad de biomasa debido a que el alga *Espirulina* posee mejores rendimientos reportados a temperaturas de entre 30 y 38 °C. De igual manera, se espera que el gasto energético sea el menor posible. Para los cálculos se toma un valor promedio de temperatura ambiente de 25°C.

Primero se calcula el calor necesario para calentar un volumen de 7.5L de medio microalgal desde una temperatura inicial de 25°C a 32°C, C utilizando la ecuación (9).

$$Q = m * Cp * \Delta T \quad (9)$$

Donde:

Q: al calor total suministrado en Joules,

m: la masa total de agua en la fotocelda en kg,

Cp: es el calor específico del agua (J/kg°k),

ΔT: la diferencia de temperaturas al interior y exterior de la fotocelda.

Se obtiene que para un volumen de 7.5L de medio microalgal el calor necesario es 219,765 Joules, lo que al despejar la ecuación (10) se obtiene que a una resistencia de 50 watts le tomaría 1.40 h o 84 min en calentar todo el volumen a 33°C, alrededor de 42 min utilizando una resistencia de 100 watts y 28 min con una de 150 watts (detalles de cálculo Anexo D).

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (10)$$

Donde:

P: potencia de la resistencia,

E: energía total requerida,

t: tiempo de calentamiento.

Sin embargo, esta estimación no toma en cuenta las pérdidas de calor que se desprenden debido al gradiente de temperatura entre la fotocelda y el ambiente, para ello es necesario realizar un balance de energía para conocer la cantidad de calor que se pierde debido al flujo de energía hacia afuera de la fotocelda y el tiempo que le tomará a la fotocelda enfriarse desde una temperatura de 32°C, que es cuando se apaga la resistencia, hasta 30 °C, valor de temperatura al cual se enciende de nuevo la resistencia.

El siguiente esquema muestra el análisis de balance energético del sistema en interiores (en ausencia de luz solar), donde se elimina la transferencia de energía que entra al biofiltro desde una fuente externa y se desprecia el consumo de energía dentro del sistema.

$$\left\langle \begin{array}{c} \text{Acumulación de} \\ \text{energía} \\ \text{dentro del sistema} \end{array} \right\rangle = \left\langle \begin{array}{c} \text{Transferencia de} \\ \text{energía} \\ \text{al sistema} \end{array} \right\rangle - \left\langle \begin{array}{c} \text{Transferencia de} \\ \text{energía hacia afuera} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\rangle \\ + \left\langle \begin{array}{c} \text{Generación de} \\ \text{energía dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\rangle - \left\langle \begin{array}{c} \text{Consumo de} \\ \text{energía dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\rangle$$

Figura 52. Se muestra un análisis de los factores componentes del balance energético que influyen en la acumulación de energía dentro de la fotocelda.

Al eliminar estas condiciones, la acumulación de energía calorífica dentro del sistema es el resultado de la generación de energía por la resistencia menos la energía en forma de calor que se escapa por las paredes de la fotocelda debido al gradiente de temperaturas entre el interior de ésta y el exterior.

Se resume entonces que,

$$ACU = G - S$$

Donde:

ACU: es la acumulación de energía dentro del reactor,

G: generación de calor por medio del calentador por resistencia aislada,

S: salida de calor a través de las paredes del tanque hacia el medio que lo rodea,

El siguiente diagrama (figura 53) muestra el análisis dimensional de la transferencia de calor desde la parte central de la fotocelda hacia la parte exterior donde se encuentra el aire circundante.

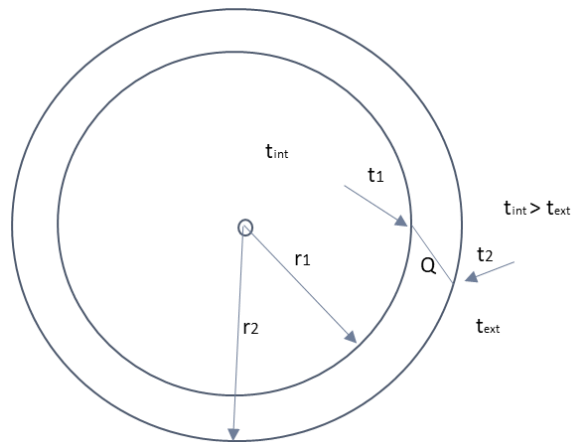


Figura 53. Se muestra el análisis dimensional del fenómeno de transferencia de calor. Vista superior de la fotocelda. Fuente: elaboración propia.

Donde:

t_{int} = temperatura interna del medio,

t_1 = temperatura de la superficie interna de la fotocelda,

t_2 = temperatura de la superficie externa de la fotocelda,

t_{ext} = temperatura externa (ambiente circundante)

r_1 = radio interior,

r_2 = radio exterior,

Q = flujo de energía calorífica.

En la parte interna de la fotocelda la temperatura del medio se mantendrá entre los 30°C y 32°C. El medio se encontrará en flujo continuo debido a la acción del sistema de mezclado e inyección de aire desde el disco inferior. La energía acumulada en forma de calor por el cultivo se transmite a las paredes del contenedor por convección. Se le llama convección a la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido ya sea líquido o gas.

Para simplicidad del análisis se asume que la temperatura de la superficie interna (t_{int}) de la fotocelda es igual a la temperatura del medio de cultivo ($t_{cultivo}$).

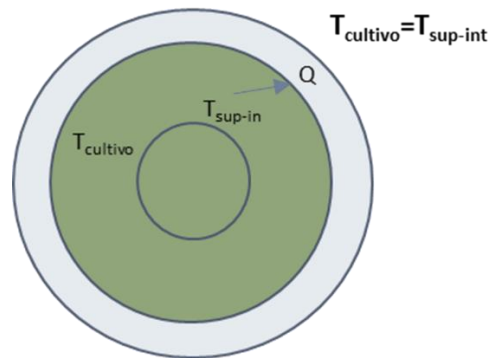


Figura 54. Se muestra el análisis dimensional del fenómeno de transferencia de calor por convección a la pared interna de la fotocelda. Vista superior de la fotocelda.
Fuente: elaboración propia.

A partir de este punto la energía en forma de calor sigue un gradiente de temperaturas con un flujo hacia la región de menor temperatura pasando a través de las paredes del contenedor hasta alcanzar la superficie externa del contenedor.

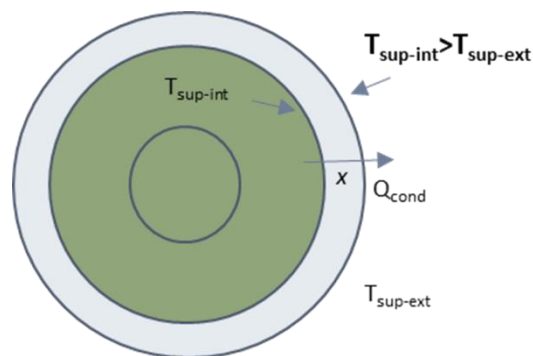


Figura 55. Se muestra el análisis dimensional del fenómeno de transferencia de calor por conducción por las paredes interna y externa de la fotocelda. Vista superior de la fotocelda.
Fuente: elaboración propia.

A este tipo de transferencia de calor se le conoce como conducción y depende de varios factores entre los que se encuentran la geometría del cuerpo, el espesor de pared, la conductividad térmica (k) del material, en este caso para el PMMA es de $k_{\text{PMMA}} = 0.23 \text{ W/m}^\circ\text{k}$ (capítulo 3.7, tabla 6), que es una medida de la capacidad del material para conducir el calor ⁽¹²³⁾. Así como la diferencia de temperatura entre la superficie interna (t_{int}) y la superficie externa (t_{ext}) de la fotocelda.

$$q = -kA \frac{dT}{dX} \quad (11)$$

q = flujo de calor,

k = conductividad térmica del material (PMMA),

A = área del objeto,

dt/dx = gradiente de temperatura.

La ecuación (11) se conoce como la ley de Fourier de la conducción de calor y es un modelo matemático que representa la transferencia de calor a través de un medio en una dirección específica (por ejemplo, la dirección x que en este caso es perpendicular a la superficie de la fotocelda) es proporcional a la diferencia de temperatura entre uno y otro lados del medio y al área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor, pero es inversamente proporcional a la distancia en esa dirección ⁽¹²³⁾.

Sin embargo, los materiales también poseen una resistencia natural a la conducción de calor, en otras palabras, todos los materiales poseen una resistencia térmica que es la capacidad del material de oponerse a la conducción de calor. En este caso, como el calor fluye desde la parte central de la fotocelda hasta el exterior, donde la transferencia se da primero de forma convectiva entre el medio microalgal (t_{int}) y la superficie interior del tubo de la fotocelda (t_1) se genera una resistencia convectiva R_1 (figura 52). El calor (t_1) fluye a través de la pared de la fotocelda hacia el exterior (t_2) de forma conductiva lo que genera una resistencia conductiva R_2 , por último, el calor se desprende desde la pared externa (t_2) del tubo de la fotocelda para disiparse en el aire circundante (t_{ext}) de forma convectiva con una resistencia R_3 (figura 56).

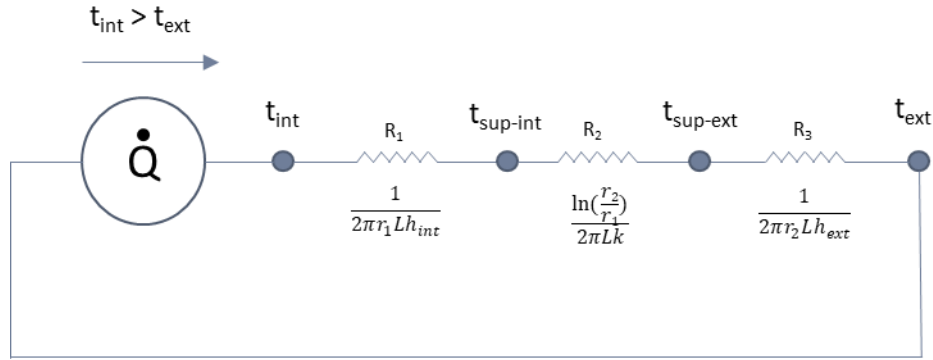


Figura 56. Se muestra un análisis de las resistencias generadas en el fenómeno de transferencia de calor, así como sus respectivas ecuaciones. Fuente: elaboración propia.

Se utiliza la ecuación (12) para calcular la cantidad de energía total que se escapa fuera de la fotocelda tomando en cuenta las resistencias generadas en cada punto del análisis de la figura 56.

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{1}{h_i(\pi r L)} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_0}\right)} \quad (12)$$

Donde:

Q = flujo total de calor,

h_i = coeficiente de transferencia de calor por convección al interior de la fotocelda, $W/m^2 \cdot ^\circ C$,

k = conductividad térmica del material,

h_0 = coeficiente de transferencia de calor por convección al exterior de la fotocelda, $W/m^2 \cdot ^\circ C$,

T_1 = temperatura interna,

T_2 = temperatura externa.

Después de aplicar la ecuación (12) se obtiene que la pérdida de calor total es de 17.31 W. Lo que en el transcurso de 12hrs se dispararía un total de 207.72 W.

$R_{\text{conv_int}}$	0.00153386	W/°k
R_{cond}	0.0618	W/°k
$R_{\text{conv_ext}}$	0.40	W/°k
Q_{total}	17.31	W = j/s

Tabla 8. Se muestran los resultados obtenidos del cálculo de las resistencias.

Sin embargo, se necesita determinar el tiempo en que la celda se enfriará desde los 32°C a los 30°C asumiendo una temperatura ambiente promedio de 25°C. Esto es una pérdida de calor a razón del tiempo, es decir, mientras avanza el tiempo la fotocelda emitirá calor de dos maneras principales, por convección natural debido al flujo de aire frío del ambiente que envuelve la fotocelda y por radiación emitida por la superficie de la fotocelda. Esto último debido a que, a una temperatura termodinámica por encima de cero, un cuerpo emite radiación en todas direcciones en un amplio rango de longitudes de onda. La cantidad de energía de radiación emitida desde una superficie depende del material del objeto y de la temperatura de su superficie ⁽¹²³⁾.

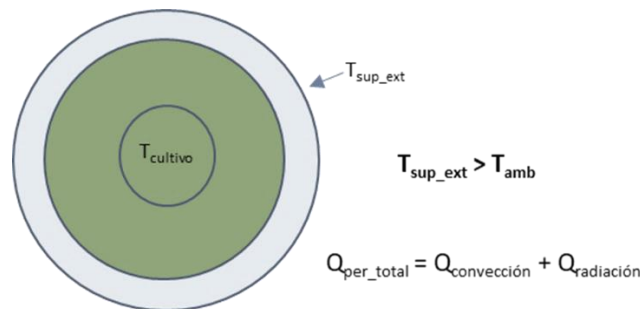


Figura 57. Se muestra el análisis dimensional del fenómeno de transferencia de calor por radiación y convección por las paredes externas de la fotocelda. Vista superior de la fotocelda. Fuente: elaboración propia.

Por tanto, para realizar el cálculo de la pérdida de calor en función del tiempo se asume que la temperatura de la superficie externa de la fotocelda es igual a la temperatura del medio de cultivo lo cual se ve influenciado por la conductividad térmica del material. Además, debido a que en la convección los fluidos en movimiento se ponen en contacto con porciones más frías o calientes del objeto aumentando la transferencia de calor. La velocidad de la transferencia de calor a través de un fluido es mucho más alta por convección que por conducción y entre más alta sea la velocidad de este fluido, mayor es la transferencia

de calor ⁽¹²³⁾. La transferencia de calor por convección se expresa por la ley de enfriamiento de Newton como (ecuación (13)):

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (13)$$

donde,

h = coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

A_s = área superficial de transferencia de calor, m^2

T_s = temperatura superficial, $^\circ C$

T_∞ = temperatura de la corriente libre, $^\circ C$

En el caso del coeficiente de transferencia de calor por convección h , este valor depende también de variables complejas como la viscosidad dinámica μ , la conductividad térmica k , la densidad ρ , calor específico c_p y velocidad v del fluido, como se muestra en la ecuación (14) ⁽¹²⁶⁾. Además, depende del régimen del fluido (laminar o turbulento) y de la configuración geométrica del cuerpo con el que se encuentra en contacto el fluido ⁽¹²³⁾.

$$h = \frac{Nu \cdot k}{\phi} \quad (14)$$

Para realizar la estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección se utiliza la metodología aplicada en (126), para esto es necesario calcular el número de Nusselt (Nu) (ecuación (15) ⁽¹²⁶⁾) el cual es un número adimensional y representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación a la conducción a través de una misma capa ⁽¹²³⁾. Además del diámetro de la fotocelda y la conductividad térmica del aire. Para convección natural Nu este se obtiene calculando:

$$Nu = [0.6 + 0.387 \left[\frac{Ra}{1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{1}{4}}} \right]^{\frac{1}{4}}]^2 \quad (15)$$

El número de Prandtl (Pr), necesario para realizar el cálculo de Nu , se define como un número adimensional y es el cociente entre la velocidad de difusión de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica, este valor también se puede obtener por medio del uso de tablas ^(124, 126) y se utiliza también para la estimación del número de Rayleigh (Ra) el cual es un número adimensional y se encuentra relacionado con la transferencia de calor al interior del fluido en convección natural.

$$Ra = (Gr \cdot Pr) \quad (16)$$

donde, Gr se refiere al número de Grashof el cual es un número adimensional resultado del cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas del fluido en convección natural, se obtiene resolviendo la ecuación (17) ⁽¹²⁶⁾:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)\phi^3}{\nu^2} \quad (17)$$

donde ⁽¹²⁶⁾,

g = aceleración gravitatoria,

β = inverso de la temperatura ambiente $1/T_\infty$,

T_∞ = temperatura ambiente,

T_s = temperatura de la superficie,

ϕ = diámetro de la fotocelda,

ν = viscosidad cinemática del aire.

Utilizando las ecuaciones (15), (16) y (17), se obtienen los siguientes resultados para los números de Rayleigh, Grashof y Nusselt (tabla 9). Mientras que el número de Prandtl se obtiene por medio de tabla escogiendo el valor para el aire ⁽¹²⁴⁾.

Núm. de Prandtl (aire) ⁽¹²⁴⁾	0.699 ⁽¹²⁴⁾
Núm. de Rayleigh	2,261,838.70
Núm. de Grashof	3,235,820.74
Núm. de Nusselt	88.67

Tabla 9. Se muestran los resultados obtenidos respectivos para los números de Rayleigh, Grashof, Nusselt y Prandtl.

Finalmente, empleándolos valores obtenidos de la tabla 9 y resolviendo la ecuación (14) se obtiene un valor de coeficiente de transferencia de calor $h=11.64 \text{ W/m}^2\cdot\text{k}$ para convección natural dada por el aire circundante al exterior de la fotocelda. Valor que nos servirá para cálculos más adelante.

En el caso de la transferencia de calor por radiación se asume el cuerpo de la fotocelda del reactor como un cuerpo negro, este se define como un *emisor y absorbedor perfecto de la radiación* ⁽¹²³⁾, es decir, emite energía de radiación de manera uniforme en todas direcciones, por unidad de área normal a la dirección de emisión ⁽¹²³⁾. A diferencia de los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección, la transferencia de calor por radiación no requiere de un medio material para llevarse a cabo, este se transmite por medio de ondas electromagnéticas denominadas radiación térmica. La radiación térmica (ecuación (18)) es emitida en forma continua por toda la materia cuya temperatura está por arriba del cero absoluto y ésta se incrementa al aumentar la temperatura ⁽¹²³⁾.

$$E_{emit} = \varepsilon\sigma A_s T^4 \quad (18)$$

Donde,

E_{emit} = se conoce como poder de emisión de cuerpo negro, W/m^2 ,

σ = es la constante de Stefan-Boltzmann, $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{k}^4$,

A_s = área superficial del cuerpo en m^2 ,

T = es la temperatura de la superficie del cuerpo negro en $^\circ\text{k}$,

ε = es la emisividad del cultivo, $0 < \varepsilon < 1$.

Tenemos entonces que la pérdida de calor en la fotocelda con respecto al tiempo puede determinarse al realizar la suma de la energía calorífica disipada por los tres mecanismos de transferencia de calor que son conducción, convección más la energía calorífica disipada por radiación, ecuación (19).

$$\frac{dQ}{dt} = kA_s\Delta T + hA_s\Delta T + \varepsilon\sigma A\Delta T^4 \quad (19)$$

Si consideramos que el flujo de calor (dQ) desde la fotocelda equivale a

$$dQ = mC_p dT \quad (20)$$

Y sustituimos en la ecuación (19), obtenemos que

$$\frac{mC_p dT}{dt} = kA_s\Delta T + hA_s\Delta T + \varepsilon\sigma A\Delta T^4 \quad (21)$$

Al realizar algunas operaciones se obtiene la siguiente ecuación (ver desarrollo completo en anexo D)

$$\ln T = -\frac{A_s(k + h + \varepsilon\sigma)}{mC_p} \cdot t + \ln T_0 \quad (22)$$

La ecuación (22) que se obtiene involucra los tres fenómenos de transferencia de calor y se encuentra en la forma $y=mx+b$, lo que corresponde a la ecuación de una recta con pendiente $m = -(A_s(k+h+\varepsilon\sigma))/mC_p$ y ordenada al origen $\ln(T_0)$.

Los valores utilizados para realizar la solución de la ecuación (22) son los enlistados en la siguiente tabla:

emisividad del cultivo (ε)	0.95	
Estefan-Boltzmann (σ)	5.7E-08	W/m ² °k ⁴
m	7.50	kg
C _p	4186	J/kg°k
k (PMMA)	0.23	W/m°K
h	11.64	W/m ² *°k
A _s	0.2155	m ²

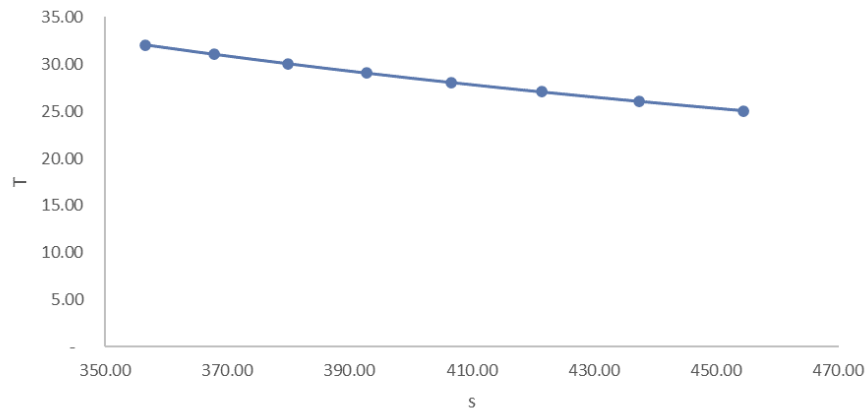
Tabla 10. Se muestran los valores obtenidos anteriormente y que se utilizan para la resolución de la ecuación (22).

Al aplicar la ecuación (22) y realizar los cálculos con ayuda de Excel, se obtiene la siguiente tabla de resultados. La temperatura inicial es de 32 °C y se muestra el tiempo que toma en descender 1°C y sucesivamente. La parte subrayada en color verde corresponde a los valores comprendidos entre 31 y 33 °C.

$e^{\ln T}$	$\ln T$	$-\frac{A_s(k+h+\epsilon\sigma)}{mc}$	t (s)	$\ln T_0$	Temp. °C
32.05	3.47	-8.17E-05	356.59	3.50	33
31.05	3.44	-8.17E-05	367.92	3.47	32
30.05	3.40	-8.17E-05	379.98	3.43	31
29.05	3.37	-8.17E-05	392.86	3.40	30
28.05	3.33	-8.17E-05	406.65	3.37	29
27.05	3.30	-8.17E-05	421.44	3.33	28
26.05	3.26	-8.17E-05	437.36	3.30	27
25.05	3.22	-8.17E-05	454.51	3.26	26

Tabla 11. Se muestran los valores obtenidos al resolver la ecuación (22). Se puede observar en la columna t(s) el tiempo en segundos que tarda en disiparse el calor y bajar la temperatura por cada grado, notándose que cada vez que la temperatura es más baja el tiempo en disiparse y bajar un grado menos, es mayor.

Se obtiene como resultado (tabla (11)) un total de 12.46 min el tiempo estimado que le tomaría a la fotocelda enfriarse de 32°C a 30°C con una temperatura ambiente promedio de 25 °C.



Gráfica 11. Gráfica resultante de la tabla 11 donde el eje Y corresponde a temperatura en grados centígrados y el eje X corresponde a el tiempo en segundos.

Se puede observar (gráfica (11)) que a la temperatura le toma más tiempo disminuir un grado conforme ésta va disminuyendo su valor debido a que la transferencia de calor disminuye su velocidad conforme el gradiente de temperatura se acorta.

Tiempo de calentamiento

Al inicio del análisis se realiza un cálculo con la ecuación (9) para estimar el tiempo que le tomará al medio en la fotocelda calentarse de 25°C a 32°C, este cálculo sirve como aproximación, sin embargo, se desea saber el tiempo que la resistencia se encontrará prendida durante las variaciones de la fotocelda entre 30 a 33 °C, además de que la ecuación (9) no toma en cuenta las pérdidas de calor hacia afuera de la fotocelda. Para realizar una estimación más acertada se deben considerar las pérdidas de calor a través de las paredes de la fotocelda y estimar como afectan éstas al tiempo de calentamiento.

Se utiliza la ecuación (23) para realizar este cálculo:

$$T = T_0 + \left(\frac{Q_r}{\rho V C_p} - \frac{U A \Delta T \log}{\rho V C_p} \right) t \quad (23)$$

Donde:

T = temperatura final en el interior de la fotocelda,

T₀ = temperatura inicial al interior de la fotocelda,

Q_r = calor generado por la resistencia,

α y β = términos para simplificar la ecuación,

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor,

A = área superficial,

T_{log} = Temperatura Media Logarítmica.

En el caso del Coeficiente Global de transferencia de calor (U), se utiliza la siguiente ecuación (24) para realizar su estimación.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{2\pi r_1 L h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_o} \right)} \quad (24)$$

Para lo cual se requiere de realizar el cálculo de cada una de las resistencias para los fenómenos de convección forzada (liquido-superficie interna de la fotocelda) con un valor promedio de 3150 W/m²*k; para conducción (transferencia de calor a través del material de la fotocelda) la cual se estima empleado $\ln(r2/r1)/(2\pi Lk)$ y de convección natural (superficie externa de la fotocelda-aire circundante) (ecuaciones (25) y (26)).

$$\alpha = \rho V C_p \quad (25)$$

$$\beta = \frac{UA\Delta T \log}{\rho V C_p} \quad (26)$$

Empleando el valor obtenido en la ecuación (24), reemplazando los térmicos de las ecuaciones (25) y (26) para simplificar la ecuación (23) y despejando “t” se obtiene ⁽¹²⁵⁾:

$$t = \frac{T - T_0}{\left(\frac{Q_r}{\alpha} - \beta\right)} \quad (27)$$

A partir de la resolución de la ecuación (27) se obtiene que la celda pasará de 30°C a 32°C en aproximadamente 17 min con una resistencia de 200W y una temperatura ambiente promedio de 25°C, tomando en cuenta la pérdida de calor emitido al exterior. Finalmente, se obtiene que la resistencia se encontrará prendida, aproximadamente, 13.6 hrs por día y se encontrará apagada 10.4 hrs.

El gasto energético que esto representa es de 2.72 kW/h/día para la resistencia de 200W, lo que para un mes (30 días) equivaldría aproximadamente a 84 kW/h/mes, este gasto energético es solo para el sistema de control de temperatura. Esta cifra se toma en cuenta para la energía total consumida por el sistema completa (ver capítulo siguiente).

4.6. Medición de Parámetros y Control

La medición de parámetros se realiza a través de sensores controlados por Arduino. Dichos datos incluyen información sobre evolución de temperaturas durante el día y noche, evolución de pH, y concentración de biomasa (figura 58). El sistema se encuentra compuesto de dos partes fundamentales, software y hardware. Como software se cuenta con interfaces de programación para Arduino e interfaces para la recolección y análisis de datos. En el hardware se encuentran los componentes físicos como los sensores (pH, turbidez, temperatura), microcontroladores y placas de conexiones. La tabla 12 muestra la lista de dichos sensores y sus características principales.

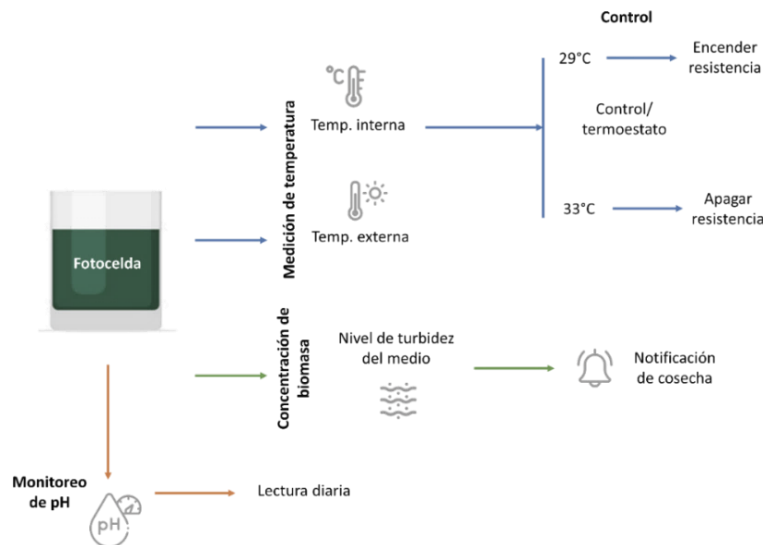


Figura 58. Se muestra el esquema general de medición de parámetros, evolución de la temperatura, concentración de biomasa y monitoreo de pH. Fuente: elaboración propia.

Para la medición de la concentración de biomasa se utiliza un sensor de turbidez, el cual mide el nivel de turbidez en el agua. Cuando el sensor detecta cierto valor de turbidez, este activa una notificación para el usuario indicando que es momento de realizar una cosecha. La calibración de dicho sensor puede hacerse a nivel laboratorio, generando una curva de calibración. Dicho sistema se puede calibrar para que un valor leído por el sensor equivalga a una concentración en g/L de *Espirulina*. Sin embargo, debido a que las experimentaciones con el prototipo construido se hacen en un ambiente doméstico debido a las restricciones actuales, las mediciones se hacen por medio de un disco de Secchi y el sensor de turbidez. Esto puede ayudar a dar una aproximación sobre la concentración del medio antes y después de la cosecha (ver capítulo 4.8. Alcances y Resultados).

La iluminación del contenedor se realiza por medio de una tira led de 12V dispuesta de forma vertical a largo del tubo de acrílico, entregando una cantidad de luz total de 2500 luxes hacia el centro del tubo.

Parámetro	Sensor	Características	Cantidad
Temperatura Interna de la fotocelda reactor	Sensor de temperatura DS18B20 (TO-92) encapsulado	<ul style="list-style-type: none"> DS18B20 puede medir temperaturas entre -55°C y 125°C. Sumergible en líquido 	1
Temperatura Ambiental	Sensor de temperatura LM75	<ul style="list-style-type: none"> Inmunidad al ruido Sensor Digital 	1
pH	pH Meter Kit SKU: SEN0169	<ul style="list-style-type: none"> Exactitud: ± 01 pH Tiempo de respuesta: ≤ 1min Potenciómetro de ajuste de ganancia 	1
Concentración de Biomasa	Sensor de turbidez de agua	<ul style="list-style-type: none"> Voltaje de alimentación: 5V DC Temp. de operación: 5 °C ~ 90 °C. Salida analógica(4.5V) y digital 	1

Tabla 12. Se muestran las características principales de los diferentes sensores utilizados en el sistema de monitoreo de parámetros.

La aireación se mantiene encendida por periodos de treinta minutos, cumpliendo un total de 12 horas encendida y 12 horas apagada (figura 59). En control auxiliar se compone de un led que indica que el equipo se encuentra encendido, un interruptor de encendido y apagado general.

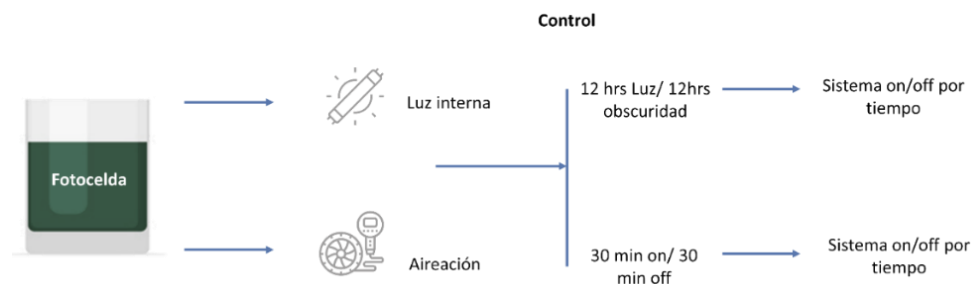


Figura 59. Diagrama esquemático que muestra los ciclos de encendido y apagado de la iluminación y aireación. Fuente elaboración propia.

Se evalúan los requerimientos de voltaje de cada uno de los componentes electrónicos con el fin de saber el consumo eléctrico total del sistema. (Tabla 18 Anexo E). La suma total teórica del consumo eléctrico del FBR, incluyendo el sistema de calentamiento es de aproximadamente 2.86 KWh/día. Lo cual podría suministrarse por medio de un equipo fotovoltaico para disminuir el impacto que podría tener elevar y mantener la temperatura a un valor mayor a la temperatura ambiente (se toma como valor promedio 25 °C). Por ejemplo, una celda fotovoltaica con capacidad de 270 W con 5 horas de incidencia solar daría aproximadamente 1350W/hr/día, lo que sumado a otra celda de la misma capacidad otorgarían 2,700 W/hr/día, lo que equivale aproximadamente al valor obtenido. Por otro lado, una celda fotovoltaica con capacidad de 350 W con 5 horas de incidencia solar daría aproximadamente 1,750W/hr/día, lo que sumado a otra celda de la misma capacidad otorgarían juntas aproximadamente 3,500 W/hr/día.

4.7. Medio de Cultivo

La cepa de *Arthrospira máxima* utilizada se mantiene a condiciones controladas de medio de cultivo cuya composición se muestra en la siguiente tabla (tabla 13). El cultivo madre se encuentra a una temperatura de 30°C, con aireación y luz cada 12h. Este medio de cultivo se compone principalmente de sales inorgánicas las cuales se diluyen en agua potable.

Medio para Espirulina para 1 L	
Nitrato de potasio (KNO ₃)	1 g
Bicarbonato de Sodio (NaHCO ₃)	4 g
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)	0.1 g
Fosfato Trisódico (Na ₃ PO ₄)	0.05 g
Sulfato Ferroso (FeSO ₄)	0.05 g

Tabla 13. Gramos de sales inorgánicas requeridas para preparar 1L de medio de cultivo.

Ya que el volumen del reactor propuesto es de 7 litros, se requieren 36.4 gr del medio de cultivo mezclado en polvo y se agrega en el reactor una vez después de cada cosecha.

Medio para Espirulina para 7 L	
Nitrato de potasio (KNO ₃)	7 g
Bicarbonato de Sodio (NaHCO ₃)	28 g
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)	0.7 g
Fosfato Trisódico (Na ₃ PO ₄)	0.35 g
Sulfato Ferroso (FeSO ₄)	0.35 g

Tabla 14. Gramos de sales inorgánicas requeridas para preparar 7L de medio de cultivo.

Tal medio de cultivo es seguro para el crecimiento de Espirulina y se han reportado rendimientos de hasta 4 g/L. El usuario debe realizar un enjuague a la pasta antes de consumirla, esto para eliminar el exceso de sales contenidas en la misma. Este paso adicional puede realizarse después de la filtración y antes de retirar la Espirulina de la malla de filtración. (ver capítulo 4.2 Filtración). El usuario agrega el medio de cultivo cada vez que termina un ciclo de filtración. Dentro de las propuestas de diseño se contemplan los siguientes formatos de administración al cultivo, de acuerdo con una mayor o menor autonomía, independencia o usabilidad del equipo, por lo que el medio de cultivo puede administrarse de diversas maneras. La primera sería directamente en polvo, por medio de una cuchara con la medida necesaria para que el usuario no requiera pesar la cantidad cada vez que realiza este paso. Una segunda opción es que el medio se encuentre aglomerado en forma de pastilla, la cual el usuario deposita dentro de la fotocelda sin necesidad de algún paso adicional. Si se desea que el usuario no tenga participación en tal procedimiento, también se puede agregar de manera automática en forma de líquido concentrado dispensado por medio de una bomba y

midiendo la concentración del medio de cultivo en la fotocelda por medio de un sensor de electroconductividad para conocer la concentración de sales minerales disueltas en el medio.

Balance teórico de materia

Como ya revisamos anteriormente, diversos factores contribuyen a la producción de biomasa en el fotobiorreactor. Entre ellos se encuentran el medio de cultivo, la temperatura, el intercambio de gases influenciado por el régimen de agitación, la cantidad de luz, entre otros. Sin embargo, es posible realizar un balance de materia teórico, con base en la formulación del medio cultivo, suponiendo parámetros teóricos. Esto nos puede ayudar a tener una estimación de la cantidad de biomasa que se puede producir por el sistema.

Para la realización de dicho balance es necesario conocer la cantidad en moles o gramos de fuente de carbono, nitrógeno y fósforo que la cepa de microalga en cuestión es capaz de asimilar ⁽¹³⁵⁾. Debido a que las microalgas pueden crecer en diferentes regímenes de alimentación, por ejemplo, foto-autotróficamente (a través de fotosíntesis utilizando fuentes de luz y carbono inorgánico) o heterotróficamente utilizando compuestos orgánicos de carbono y energía ⁽¹³⁵⁾, es necesario conocer su metabolismo bajo ambas condiciones, sin embargo, el método más utilizado es cultivarlas con fuentes de luz haciendo uso de la fotosíntesis ⁽¹³⁵⁾.

Para la realización de dicho balance de materia se toma la metodología descrita por García-Rodríguez, Agustín, & Boffill-Rodríguez, Yanet, & Castellanos-Estupiñán, Jesús en “*Estimación preliminar de índices de producción de biomasa microalgal a partir de la reacción de fotosíntesis*” ⁽¹³⁵⁾ tomando como referencia la alternativa 5 descrita en dicha investigación.

Se obtiene entonces que los rendimientos teóricos podrían variar de acuerdo con la producción de biomasa obtenida. Con una concentración teórica de 4 g/L para un contenedor de 7 litros representarían 28 g de biomasa producidos. Lo que equivaldría a 51.24 g de CO₂ capturados equivalentes a 37.19 g de oxígeno liberados (aplicando la ecuación 4 del capítulo 3.3).

A partir de estos datos se puede realizar una estimación de la obtención de biomasa utilizable para el consumo, por ejemplo, si se filtra la mitad del sistema cada tres días se obtendrían 14 gramos, recordando que el consumo máximo recomendado por día de *Espirulina* es de 3 g. Lo que representaría 4.7 raciones de consumo cada tres días. Sin embargo, tales datos y cifras deben corroborarse de manera experimental, lo que arrojaría datos de mejora y optimización.

4.8. Alcances y Resultados

El diseño, construcción, armado, puesta en funcionamiento y validación del prototipo que aquí se presenta, así como los resultados obtenidos fueron realizados en un ambiente doméstico, debido a las restricciones durante la pandemia del COVID-19.

Resultados de prototipaje

La primera pieza del disco inferior que se fabricó se imprimió en ácido poliláctico (PLA) con un porcentaje de relleno del 70% (figura 60) el cual contemplaba dos orificios para las entradas de aire y un orificio central para la salida de flujo de ½ pulgada. Se optó por PLA debido a que la impresora con la que se contaba no era útil para impresión en PETG. Esta pieza se revistió con resina marca XTC-3D (figura 60) siguiendo la metodología y las indicaciones presentes en el instructivo del fabricante. Tal resina es especial para el revestimiento de piezas 3D. Se realizó el mismo procedimiento con las demás piezas. La parte inferior constaba de dos piezas, un cople de sellado con diámetro un milímetro mayor al del tubo de 6 pulgadas y un disco inferior comprendido entre el extremo del tubo y el cople de sellado. La parte superior se componía de un cople de sellado igual al inferior y una tapa que contemplaba dos orificios para sensores y un orificio central para un calentador con resistencia.



Figura 60. Se muestran (izquierda) las primeras piezas del disco inferior y superior fabricadas para la primera versión del prototipo. Figura 61. Se muestra (derecha) la configuración inicial del disco inferior, con salida de ½ pulgada y flujo dividido para muestreo.

Con estos componentes se puso en marcha la primera versión del prototipo (figura 62). Se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema de mezclado con 4 difusores dispuestos de forma radial (figura 61) y 4 válvulas de retención, así como de fuga de agua y el sistema de calentamiento. Se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema de mezclado, agregando un deflector de flujo en la parte interna de la fotocelda. El deflector (figura 62) constaba de un tubo de 3 pulgadas de diámetro dispuesto de forma longitudinal, con aberturas en la parte superior e inferior que permitían el paso de flujo ascendente y descendente de acuerdo

con el diagrama de la figura 46. Tal componente genera un flujo ascendente de microalga en el radio externo de la fotocelda y un flujo descendente en el interior del deflector de flujo.



Figura 62. Se muestra evidencia fotográfica de la primera versión del prototipo.

Después de un tiempo en funcionamiento la resina se desgastó y el flujo de agua perforó el disco inferior generando una fuga de agua a través de las capas de la impresión (figura 63). Por lo cual se optó por realizar la impresión de las piezas en material PETG y sellar con una resina epóxica grado alimenticio especial para biorreactores (figura 63).



Figura 63. Se muestra evidencia fotográfica del desgaste ocurrido en el primer disco (izquierda), por lo que se optó por un recubrimiento con resina epóxica grado alimenticio a cada uno de los componentes del FBR (derecha).

De la experiencia acumulada con el deflector se puede extraer que este si contribuye a generar corrientes ascendentes y descendentes dentro del reactor, sin embargo, la microalga tiende a sedimentarse a los pocos días de haber iniciado el proceso de crecimiento (figura 64), lo cual se veía reducido al eliminar el deflector. Esto puede deberse a que la velocidad del flujo descendente que se genera con el deflector es alta, empujando el alga hacia la base y sedimentándola. A esto se le puede sumar que el sistema de aireación no

queda a ras de la base, sino que los difusores quedan a 3 cm de la base, lo que puede generar un espacio muerto sin movimiento sobre la base del disco inferior.



Figura 64. Se muestra evidencia fotográfica de la sedimentación ocasionada por el uso del deflector.

En una segunda iteración se modificó el diseño del disco inferior dividiendo la pieza en dos partes ensamblables por medio de una rosca, lo que facilita el desensamble y acceso al sistema de aireación en caso de una reparación, mantenimiento o intercambio de piezas. Se realizaron las primeras pruebas de crecimiento y filtración ajustando la bomba y midiendo las distancias permisibles de la manguera.



Figura 65. Se muestra evidencia fotográfica de las primeras pruebas del sistema FBR y el sistema de filtración. Tales pruebas se realizaron en un ambiente doméstico debido a las restricciones del momento.

El monitoreo de parámetros (temperatura, pH y turbidez) se realizó con un proceso de prototipado y mejora electrónica basada en plataforma Arduino. Se comenzó en placas de prototipado y posteriormente en placa perforada (figura 66). Los datos se almacenan de manera automática en el módulo microSD para su

posterior lectura y procesamiento en Excel. Además, se incluye un módulo RTC para el registro de la hora y fecha de cada lectura.

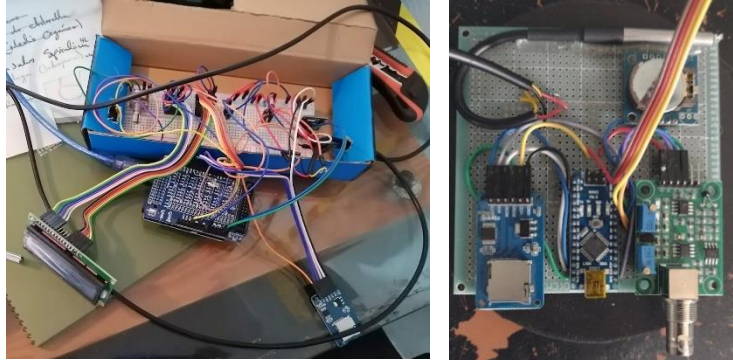


Figura 66. Se muestra (izquierda) la primera fase de prototipado del sistema de control y monitoreo. Se muestra (derecha) la placa de microcontroladores en placa perforada.

La tercera fase de prototipado consistió en la integración de los diferentes sistemas en una sola pieza funcional. La base o armazón del artefacto integra la fotocelda y el sistema de aireación al frente mientras que el sistema de filtración se encuentra en la parte posterior de acuerdo con la figura 29. El sistema de monitoreo se encuentra en la parte posterior superior del prototipo (figura 68).



Figura 67. Se muestra evidencia fotográfica del prototipo desarrollado para la realización de las pruebas.

Una vez llegado a esta etapa se realizaron las pruebas de crecimiento correspondientes para conocer el crecimiento de la microalga en el sistema. La totalidad del prototipo se construyó en un ambiente doméstico con herramientas de corte básicas.

Resultados de crecimiento

Existen diversos métodos para la cuantificación de la concentración de biomasa en los medios de cultivo. Entre ellos existen métodos directos como contadores automáticos de células y recuento directo al microscopio, o métodos indirectos como son la medición de los cambios de densidad óptica en el cultivo por medio de espectrofotometría y la cuantificación de biomasa a través de su medición en peso seco ⁽¹³⁴⁾, para lo que se necesita extraer la biomasa y disecarla de manera controlada en condiciones de laboratorio para después pesarla y obtener una curva de crecimiento en g/L.

De estos métodos, uno de los más utilizados es el recuento directo de células al microscopio. Esta metodología emplea una cámara de Neubauer o hematocitómetro de volumen conocido (0.1 mm de profundidad) la cual contiene en su superficie una rejilla grabada que divide el espacio en 9 secciones con lados de 1mm lo que corresponde a un volumen de 0.1 μ L por sección ⁽¹³⁴⁾. Para cultivos de células mayores a 6 μ m se recomienda utilizar las cuatro secciones mayores (A, B, C y D) de la cámara (figura 66).

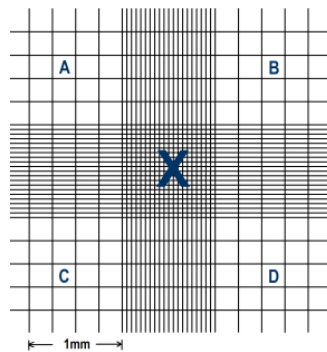


Figura 66. Reglilla de Neubauer de 9 mm². Fuente: (134)

Se realizó una colaboración con el laboratorio de ficología aplicada de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa (UAM-I) división de Ciencias Biológicas y de la Salud, para realizar un análisis de crecimiento celular en el prototipo, con el fin de conocer las curvas de crecimiento de la microalga *Espirulina* en el dispositivo. Tales evaluaciones fueron realizadas por el maestro Mario Alberto Hernández Vázquez y supervisadas por la Dra. Mónica Rodríguez Palacio.

Se empleó la cianobacteria *Arthrospira* máxima adquirida del banco de microalgas de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa (UAM-I) división de Ciencias Biológicas y de la Salud.

Para la preparación del medio de cultivo salino se utilizó la formulación del medio de crecimiento Jourdan modificado a base de Nitrato de potasio (KNO₃), Bicarbonato de Sodio (NaHCO₃), Sulfato de magnesio

(MgSO₄), Fosfato Trisódico (Na₃PO₄), Sulfato Ferroso (FeSO₄) presentado en detalle en la tabla 13 del capítulo 4.7.

El recuento celular se llevó a cabo por medio de cámara o Hematocitómetro (Neubauer) utilizando la metodología descrita en el capítulo 2 de CONCENTRACIÓN, RECUESTO CELULAR Y TASA DE CRECIMIENTO por BERTHA OLIVIA ARREDONDO VEGA ⁽¹³⁴⁾.

Los parámetros de luz, temperatura, fotoperiodo y caudal de aire se fijaron de acuerdo con los parámetros de operación establecidos en los capítulos anteriores (4.3. Descripción técnica):

- **Fotoperiodo:** 12 horas luz / 12 horas oscuridad,
- **Intensidad luminosa:** 2500 luxes
- **Caudal de aire:** 3.2 l/min
- **Temperatura:** 31 - 33°C

La versión del prototipo al cual se realizaron las pruebas incluía el diseño final del disco inferior y el disco superior cubiertas con resina epoxica grado alimenticio. La fotocelda se colocó en un lugar oscuro para evitar la influencia de luz externa.



Figura 67. Se muestra evidencia fotográfica del prototipo en el sitio de realización de las pruebas en el laboratorio de Ficología Aplicada en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa (UAM-I).

Las tomas de muestra y de conteo celular se realizaron diariamente por triplicado en tubos de ensaye de 10 ml durante 15 días. Para el conteo celular se utilizó una cámara de Neubauer marca MARIENFIELD con profundidad de 0.100 mm y área de 9 mm². Las muestras se fijaron con Lugol para que la cianobacteria no siguiera su reproducción lo que puede alterar los resultados.



*Figura 68. Se muestra evidencia fotográfica de las muestras tomadas en los tubos de ensaye de 10 ml y fijadas con Lugol.
Fuente: Ing. Alberto Vázquez, laboratorio T-166, área de Ing. Química UAM-I.*

Se realizó el conteo de todas las células presentes en las cuatro secciones (A, B, C y D) de la cámara (figura 66). La concentración celular se calcula utilizando la ecuación (27) ⁽¹³⁴⁾:

$$C = N \cdot 10^4 \cdot dil \quad (27)$$

Donde ⁽¹³⁴⁾:

C: cél/ml,

N: promedio de células presentes en 1 mm² (0.1 µl),

dil: factor de dilución,

10⁴: factor de conversión de 0.1 µl a 1 ml.

El factor de dilución (dil) se considera en las ocasiones en que el cultivo se encuentra muy concentrado, lo que dificulta su lectura y conteo bajo el microscopio, se realiza una dilución a escala conocida y se corrige agregando y multiplicando la relación de dilución dentro de la ecuación. La tabla 15, muestra los resultados obtenidos para cada uno de los conteos en las secciones A, B, C y D de la cámara y realizados durante 14 días de experimento. Se muestra además el promedio (última columna) para cada día de conteo.

Días Muestra	Conteo Cuadrante 1	Conteo Cuadrante 2	Conteo Cuadrante 3	Conteo Cuadrante 4	Promedio
1	10	11	8	12	10.25
2	15	8	6	13	10.5
3	12	7	10	16	11.25
4	15	18	18	15	16.5
5	10	23	21	18	18
6	18	11	13	30	18

7	17	24	24	21	21.5
8	29	30	27	37	30.75
9	46	47	45	46	46
10	64	62	54	49	57.25
11	69	78	77	65	72.25
12	67	75	74	78	73.5
13	68	72	72	80	73
14	74	75	68	76	73.25

Tabla 15. Se muestran los resultados de los conteos realizados en los cuadrantes A,B,C y D de la cámara de Neubauer durante 14 días consecutivos.

Una vez obtenidos los valores promedio, se multiplican por el factor de conversión (10^4) anterior para obtener la concentración (N) de células por ml (cél/ml) (Tabla 16). Este valor se utiliza para la determinación de la tasa de crecimiento por medio de la ecuación (28) ⁽¹³⁴⁾.

$$\mu_2 = \frac{\left[\frac{\ln\left(\frac{X_2}{X_1}\right)}{\ln 2} \right]}{(t_2 - t_1)} \quad (28)$$

Donde ⁽¹³⁴⁾:

μ_2 : tasa de crecimiento

X_2 , X_1 son la concentración determinada en los tiempos t_2 , t_1

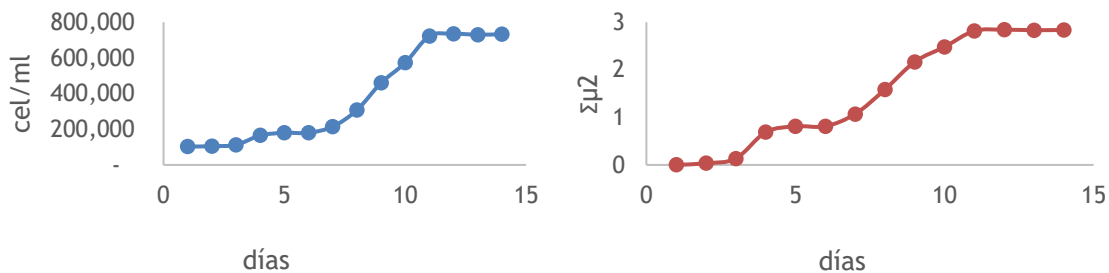
Se determina la tasa de crecimiento (μ_2) utilizando la ecuación (28) y se realiza la sumatoria progresiva ($\sum\mu_2$) de las tasas de crecimiento diarias (como se sugiere en (134)) con el fin de facilitar la identificación del comienzo y término de cada fase de crecimiento (tabla 16).

Tiempo	Promedio	N (Cel/ml)	Ln N	μ_2	$\sum\mu_2$
1	10.25	102,500	11.538	-	-
2	10.5	105,000	11.562	0.035	0.035
3	11.25	112,500	11.631	0.100	0.134
4	16.5	165,000	12.014	0.553	0.687
5	18	180,000	12.101	0.126	0.812
6	18	180,000	12.101	0	0.812
7	21.5	215,000	12.278	0.256	1.069

8	30.75	307,500	12.636	0.516	1.585
9	46	460,000	13.039	0.581	2.166
10	57.25	572,500	13.258	0.316	2.482
11	72.25	722,500	13.490	0.336	2.817
12	73.5	735,000	13.508	0.025	2.842
13	73	730,000	13.501	-0.010	2.832
14	73.25	732,500	13.504	0.005	2.837

Tabla 16. Se muestran los resultados de los cálculos realizados para la obtención de la tasa de crecimiento (μ_2) y la tasa de crecimiento acumulada ($\Sigma\mu_2$)

Las gráficas de dispersión 11 y 12, muestran los datos obtenidos en la tabla 16. La gráfica 11 (izquierda) muestra los resultados obtenidos del crecimiento en cel/ml. Se pueden observar las fases de crecimiento de la microalga. Comenzando por un periodo de latencia los primeros 3 días, en los que probablemente la microalga se encuentra en adaptación al medio. A partir del día 4 se observa un ligero crecimiento, seguido de un periodo de latencia nuevamente. La gráfica 12 (derecha) muestra los resultados graficando la sumatoria progresiva ($\Sigma\mu_2$) de las tasas de crecimiento diarias. Tal gráfica presenta el mismo comportamiento al inicio, presentando los cambios en las pendientes de una manera más clara.



Gráfica 11 y 12. (11- Izquierda) Se muestra gráfica de dispersión de la concentración celular (cél/ml) vs tiempo a partir de los datos de la tabla 16. (12-Derecha) Se muestra gráfica de dispersión de la suma progresiva de la concentración microalgal vs tiempo, a partir de los datos de la tabla 16.

Se puede observar que la fase de crecimiento exponencial sostenida comienza a partir del sexto día, tendencia que se mantiene hasta el noveno día, donde se puede apreciar un cambio de pendiente, es decir, una disminución en la velocidad de crecimiento.

Resultados de Biomasa Producida

Se presentan los resultados de las experimentaciones de biomasa obtenida durante el proceso de filtración.

Día	pH	Secchi	Turbidez
0	9.25	5+	3.10
1	9.40	5+	3.54
2	9.60	5+	3.25
3	9.75	5+	3.05
4	9.73	5+	2.96
5	9.80	5+	2.87
6	9.90	5	2.80
7	9.98	4.5	2.69
8	9.98	4	2.58
9	9.90	3.5	2.52
10	10.00	3.2	2.48
11	10.01	3	2.44
12	10.06	2.5	2.34
13	10.04	2.5	2.36
14	10.05	2.5	2.30

Tabla 17. Se muestran los resultados obtenidos de biomasa producida.

La experimentación se llevó a cabo por 15 días durante los cuales se realizaron mediciones de pH y concentración de biomasa por medio de un disco de Secchi y un sensor de turbidez programado con Arduino. Sin embargo, tales experimentaciones se vieron limitadas debido a la falta de herramientas y acceso a laboratorios especializados en el ámbito biotecnológico. Lo que abre una puerta a mejoras futuras en cuanto a optimización del proceso de crecimiento microalgal y calibración del sistema de monitoreo de concentración de biomasa que se utiliza para dar notificación al usuario sobre el momento de realizar una cosecha.

Discusión

La naturaleza multidisciplinaria de esta investigación requiere de una cantidad de pruebas experimentales de diferente orden y dimensión. Comenzando con las pruebas técnicas en materia de fotobiorreactores que den pie a la mejora del reactor. En este respecto, esta investigación se encontró con ciertas limitaciones experimentales debido al acceso restringido a laboratorios durante la elaboración de este proyecto, y son una limitante importante, ya que la falta de datos experimentales hace que se tenga una caja negra sin oportunidad clara de optimización. En este respecto, los profesionales que decidan emprender algún mejoramiento deberán tener acceso a laboratorios del área biotecnológica y estar indudablemente familiarizados con las técnicas experimentales a nivel laboratorio. El estudio actual puede complementarse al realizar un monitoreo de los rendimientos de biomasa producida en g/l, obtención de curva de crecimiento poblacional microalgal, medición de la concentración inicial y final de nutrientes, monitoreo cuantitativo de la disminución progresiva de nutrientes y establecer su relación inversa al crecimiento celular; así como una medición de la concentración de metabolitos secundarios y de contaminantes presentes en el medio.

Aunado a esto, se debe realizar un monitoreo de los niveles de CO₂ en el medio a través de la medición progresiva de oxígeno disuelto para conocer la dinámica de transferencia de masa del reactor, como dato fundamental para el mejoramiento de la agitación y transferencia de gases. Ya que estos factores inciden directamente en el rendimiento de producción de biomasa, así como servir de referencia para la mejora de aspectos relacionados con la geometría del tanque del fotobiorreactor.

En tanto se puedan obtener estos datos cuantificables se tendrá una base para la mejora de los procesos. Esto es de suma importancia ya que, el hecho de que el sistema se encuentre diseñado para un ambiente doméstico reduce su capacidad de producción a una baja escala, y es por esto por lo que, su funcionamiento debe ser lo óptimo posible en la obtención de la mayor cantidad de biomasa por litro.

Una de las cuestiones de seguridad más relevantes a mi parecer deviene de la pregunta ¿cómo asegurar la inocuidad alimentaria? Es decir, debido al lugar de uso de dicho sistema que es principalmente doméstico, se debe determinar la incidencia de ciertos factores como, una mala limpieza o un ambiente contaminado, en el crecimiento de poblaciones bacterianas en el medio de cultivo para saber si se compromete la seguridad del usuario. En lo que en ese respecto otra interrogante relevante es:

¿Existe la posibilidad de que en una mala gestión de procesos se ocasione que la microalga cambie su estado metabólico a uno donde se incentive la producción de metabolitos secundarios tóxicos para el usuario?

Estas preguntas de seguridad toxicológica pueden responderse a través de la aplicación de metodologías de laboratorio que monitoreen los niveles de toxicidad ocasionados por metabolitos secundarios y/o un incremento en la concentración de sales y minerales no previsto. Así como, monitoreo del crecimiento poblacional bacteriano, y en su caso, realizar la identificación de especies, conocer su metabolismo, medir y caracterizar su crecimiento, y describir los efectos adversos en el cultivo y crecimiento microalgal, así como los posibles efectos negativos en la salud del usuario.

En cuanto a los sensores de software libre basados en Arduino utilizados para realizar las mediciones en el equipo, sus lecturas deberán compararse y cotejarse con equipo de laboratorio especializado. La plataforma Arduino es una excelente y poderosa herramienta auxiliar en el proceso de prototipado, entre las ventajas percibidas en su aplicación durante la elaboración de este proyecto destacan: disminución sustancial en los costos y tiempo de prototipado, obtención de datos experimentales inmediatos, gran versatilidad en sensores y modos de medición de parámetros. Sin embargo, pueden existir variaciones en las lecturas por parte de ciertos sensores debido a su baja calidad o un exceso de “ruido” en las lecturas como resultado de errores de código, conexiones flojas o de soldadura deficiente.

Se hace hincapié en el aporte del diseño centrado en el usuario, pues como ya se comentó este permite pasar del pensamiento tradicional de diseño que se concentra en la funcionalidad o la forma de los objetos, a uno donde se coloca al usuario y su experiencia con el objeto como centro en el proceso de diseño. Lo que permite recabar datos invaluable para la mejora en la usabilidad del producto y determinar la calidad, pertinencia y coherencia de las soluciones de diseño. Un buen ejemplo de esto, son las posibles mejoras de diseño en el filtro de biomasa. Entre las principales se encuentran la adición de indicadores visuales y texturas que indiquen la dirección de ciertas actividades como el desenroscamiento de las tapas y el seguro del cartucho a la manguera. Además, un análisis más exhaustivo puede permitir la reducción de tamaños de ciertos componentes, lo que podría contribuir a una reducción de la cantidad de material utilizado, así como una reducción en el tamaño del sistema en general.

En este respecto, haría falta complementar tal análisis con estudios de evaluación del diseño, que permitan ajustar las dimensiones de ciertos elementos. Además, un análisis de posturas durante la realización de las tareas por parte de los usuarios, así como un análisis de fuerzas y ángulos, permitirían conocer si existen afectaciones en articulaciones por malas posturas o movimientos “en falso” en las extremidades de los usuarios. En complemento, se podría realizar un análisis de materiales para determinar cuáles poseen un mayor ciclo de vida, durabilidad, así como, un análisis de texturas, sensaciones, rigidez, facilidad de limpieza y colores, lo que podría mejorar la calidad de la experiencia.

En cuanto a componentes funcionales, como es el caso de bombas de aire y flujo de agua, y sistema de iluminación, es importante tener en cuenta su vida útil. Se pone como ejemplo que la bomba de aire utilizada en este caso para suministrar aire al interior de la fotocelda comenzó a fallar después de las 100 horas de uso por lo que se requirió de una reposición. Se hace evidente entonces un análisis de probabilidades de falla y durabilidad de los componentes, lo que permitiría conocer y tener previsto posibles fallas y periodicidad de reemplazo en el corto, mediano y largo plazo. Dando prioridad por su puesto a componentes cuya vida útil es la mayor posible.

Una cuestión adicional que es pertinente mencionar va con respecto al proceso de filtración de biomasa. Dicha operación se debe medir cuantitativamente, caracterizando los niveles de concentración de biomasa antes y después del proceso de filtración. Sin embargo, es menester tener en cuenta los niveles de concentración de metabolitos secundarios, contaminantes y demás residuos presentes en el agua postfiltrado de biomasa. Sobre todo, si se le quiere dar una reutilización a dicho efluente como medio de crecimiento en el ciclo de concentración celular posterior. Esta reutilización de agua debe ser prioridad, ya que disminuye sustancialmente la cantidad de agua utilizada por gramo de biomasa producida. En el presente trabajo se propone una filtración secundaria de remoción de contaminantes y residuos presentes en este efluente, lo que invariablemente conlleva la utilización de componentes de filtrado adicionales y debe analizarse su incidencia en el diseño, cantidad de agua utilizada y porcentaje de remoción de residuos.

Además, esta operación puede llegar a tener una incidencia en el proceso de adición de nutrientes por parte del usuario. Ya que, la presencia de nutrientes residuales puede aumentar la concentración de estos paulatinamente conduciendo a una posible sobresaturación de nutrientes en el medio.

Asimismo, se le debe dar la importancia necesaria al enjuague de la biomasa obtenida después del proceso de filtración primario. Debido a que dicha biomasa puede aún contener muchos elementos residuales, minerales y sales, utilizados como parte del medio de cultivo, de los cuales se debe estudiar y analizar su permanencia en la biomasa. Así como tener en cuenta las posibles afectaciones que dichos elementos pueden llegar a tener en la salud de los usuarios de no llevarse a cabo dicho enjuague.

Finalmente, hago hincapié en la importancia de las herramientas de manufactura digital en el proceso de diseño y su incidencia en la rapidez del proceso de prototipado. Tales herramientas son perfectamente aplicables en el mejoramiento de los sistemas de producción de biomasa. Ya que disminuyen sustancialmente el tiempo en el proceso de prototipado.

Conclusiones

En esta investigación se realiza una integración entre diversas disciplinas, la biotecnología de microalgas, la ingeniería y metodologías de diseño para obtener un sistema tecnológico capaz de generar alimento de alta proteína en un ambiente doméstico. Tal sistema tiene la capacidad de capturar CO₂ en el proceso y generar oxígeno limpio durante el proceso de generación de dicho alimento, lo que se contrapone con el orden actual de producción de alimentos de alta proteína en el que se emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Como biotecnólogo, una de las razones principales para incursionar en el Diseño Industrial, fue el descubrimiento del enorme potencial que tienen las metodologías y posturas de diseño para potenciar la realización práctica de los proyectos, con una visión de innovación, generar nuevos productos y servicios, y desde luego, el gran bagaje de herramientas que los diseñadores poseen para materializar cualquier objeto, desde la concepción de una idea, hasta su manufactura e implementación. Al mismo tiempo, es de mi atención el enorme potencial que posee la biotecnología de microalgas como posible solución a muchas de las problemáticas que vivimos actualmente como humanidad, desde el exceso de CO₂ atmosférico hasta la eminente crisis alimentaria, agravada por los problemas sociales actuales. Esto genera en mí una gran inquietud por expandir su aplicabilidad fuera del campo tradicional de aplicación de la biotecnología de microalgas. Así, se inicia este proyecto con una visión de complementariedad entre las herramientas, conocimientos y metodologías de ambas disciplinas.

Llegado a este punto, se puede observar que las metodologías y posturas de diseño, y prototipado de producto, tienen un enorme impacto en la mejora de dichos sistemas de producción. El diseño industrial es capaz de moldear el conocimiento biotecnológico en pro del mejoramiento de sus sistemas técnicos, parte importante del quehacer científico, siempre y cuando se tomen en cuenta los aspectos tecnocientíficos relacionados a la tecnología. Este es un camino que comienza desde la conceptualización hasta su socialización, pasando por estrategias de diseño, optimización de procesos y prolongación de la vida útil. Desde mi postura, esta es una fusión que permite el mejoramiento retroactivo de ambas disciplinas pues genera conocimiento práctico que podría aplicarse no solo en este proyecto, sino queda como prueba la complementariedad entre dichas disciplinas aplicable en otros campos de acción o proyectos futuros.

Se demuestra que la manufactura de un fotobiorreactor microalgal a través de herramientas y metodologías del diseño es plausible considerando los aspectos científicos y tecnológicos involucrados en el diseño de

sistemas cerrados de cultivo de microalgas (fotobiorreactores), directamente relacionados con la optimización en la producción y su funcionamiento. Del prototipo construido, se habría deseado llegar a un desarrollo más detallado, sobre todo lo relacionado a la validación del sistema microalgal, sin embargo, considerando los recursos disponibles y entorno de desarrollo se considera que los resultados y cualidades de la fotocelda aquí desarrollada poseen un gran valor de aportación a ambas disciplinas.

Tal tecnología tiene el potencial de suministrar una fuente de proteína de gran calidad a los usuarios, aportando mucho a la producción personalizada de alimentos mientras se captura CO₂ en el proceso, lo cual es un cambio total de paradigma comparado con el actual. Sin embargo, los problemas que nos aquejan no se pueden solucionar solo con tecnología, y en ese respecto, tal aplicación aquí presentada no se puede plantear como única y verdadera solución al problema del abastecimiento alimenticio ni al exceso de CO₂ en la atmósfera. Se debe recordar que estas problemáticas son producto de un orden sistémico que tiene que ver con la manera en la que fabricamos, consumimos y desechamos los productos.

Además debo decir que, la apropiación de las herramientas y metodologías de diseño por parte de los profesionales de la biotecnología y en sentido contrario, es decir, la apropiación del conocimiento biotecnológico por parte de los profesionales del diseño; ambos escenarios, dirigidos por un compromiso social y de sostenibilidad, abren la posibilidad de creación de una nueva generación de tecnología, la cual integra en sus bases los procesos básicos de la naturaleza, dirigiéndose así, a la creación de dos mundos simbióticamente complementados.

Solo queda por mencionar que, dicha investigación tiene una gran aplicabilidad y muchas oportunidades mejora en el futuro. Esto debido a la gran versatilidad que posee la tecnología de microalgas para producir diferentes sustancias útiles para el ser humano, que generadas en un ambiente doméstico podrían servir como alimento, fertilizantes naturales, descontaminantes ambientales y/o agentes cosméticos. Para lo cual siempre serán necesarias las metodologías del diseño en la socialización de dichos sistemas.

Referencias

- (1) Thackara, J., Suárez Correa, J., & Féher de la Torre, G. (2013). *Diseñando para un mundo complejo* (1st ed.). México, DF: Diseño.
- (2) Manzini, E., & Vezzoli, C. (2015). *Diseño de productos ambientalmente sustentables* (1o ed.). Editorial Diseño / Libros de diseño.
- (3) Carpenter, K. (1998). *Proteins*. Biblioteca Digital - Acceso Remoto. Consultado el 14 de julio 2020, en <https://www-britannica-com.pbidi.unam.mx:2443/science/human-nutrition/Proteins>
- (4) Climático, I. (2019). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. [online] gob.mx. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero> [Consultado el 2 Nov. 2019].
- (5) Piccolo, A. (2012). *Spirulina: a livelihood and a business venture*. Consultado el 8 Julio 2021, en <http://www.fao.org/documents/card/en/c/fcfbb587-ac0a-4ceb-9a37-6ab2f79bd5c3/>
- (6) C.M. Godde, D. Mason-D'Croz, D.E. Mayberry, P.K. Thornton, M. Herrero, *Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence*, Global Food Security, Volumen 28, 2021, 100488, ISSN 2211-9124, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488>. [Consultado el 24 Julio. 2021].
- (7) Stansby, M.E. (1962). *Proximate composition of fish*. In: E. Heen and R. Kreuzer (ed.) Fish in nutrition, Fishing News Books Ltd., London, 55-60. Retomada de <http://www.fao.org/3/v7180s/v7180s05.htm#4.1%20principales%20constituyentes>
- (8) *Conoce las graves consecuencias ambientales del consumo de carne*. (2017). Consultado el 3 de enero 2021, en <https://www.ecoticias.com/co2/133018/Conoce-graves-consecuencias-ambientales-consumo-carne>
- (9) Salinas Flores, O. (2009). *Historia del diseño industrial* (1st ed., pp. 22-80). México: Trillas.
- (10) Olmos, A. (2014). *Sobre Técnica y civilización de Lewis Mumford* | Seminario Tecnologías Filosóficas. Consultado el 8 March 2020, en <http://stf.filos.unam.mx/2014/05/sobre-tecnica-y-civilizacion-de-lewis-mumford/>
- (11) Buchanan, R. (1985). *Declaración por diseño: retórica, argumento y demostración en la práctica del diseño*. Design Issue, 2, 4-22.
- (12) Rodríguez Morales, L. 2015. *Interdisciplina en Diseño: antecedentes y prospectiva*. Trans e Interdisciplina. Ejes para una formación integral de los Diseñadores (Libro) (1st ed., pp. 15-25). México: UAM, Unidad Azcapotzalco
- (13) Ortiz Leroux, J. *Consideraciones sobre la transdisciplina y Diseño*. Trans e Interdisciplina. Ejes para una formación integral de los Diseñadores (Libro) (1st ed., pp. 27-36). México: UAM, Unidad Azcapotzalco
- (14) Pérez Matos NE, JA, Setién Quesada E. *La interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad en las ciencias. Una mirada a la teoría bibliológico-informativa*. Acimed. 2008;18(4). Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352008001000003 [consultado: 08/06/2021].
- (15) Cerda, E., & Khalilova, A. (2016). *Economía Circular. Estrategia y competitividad empresarial*. Revista de economía industrial, 401. Recuperado de <http://www.minetad.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/401/CERD%C3%81%20y%20KHALILOVA.pdf>
- (16) Manzini, E., & Jarauta, F. (1996). *Artefactos. Hacia una nueva ecología del ambiente artificial*. (1st ed., pp. 89-102). Madrid: Celeste Ediciones.
- (17) Zec, Peter, editor (2007). Hall of Fame. *Design for a Better Quality of Life* Vol. 2. Red Dot Edition. Singapur.
- (18) García Parra, B. (2008). *Ecodiseño: nueva herramienta para la sustentabilidad*. (Primera Edición). México: Editorial Diseño.
- (19) Ceschin, F., & Gaziulusoy, İ. (2020). *Design for Sustainability: A Multi-level Framework in Products to Socio-technical Systems* (Routledge Focus on Environment and Sustainability) (English Edition) (1.a ed.). Routledge.
- (20) S. Barbero (2010), *Local Bio-Energy Promotes Distributed Economy for Sustainable Development: Systemic Design Approach and Case-Studies*. Design Principles and Practices: An International Journal, 2010, vol. 4, pág.21-30.
- (21) Rodríguez Morales, L., Bedoya Pereda, D., Morales Zaragoza, N., López Ornela, E., Martínez de la Peña, G., Gamboa Rodríguez, F. and Peñalosa Castro, E., n.d. *Diseño centrado en el usuario*. 1st ed. México: Editorial Diseño.
- (22) Ryan, Alex. (2014). *A Framework for Systemic Design*. FORMakademisk. 7. 10.7577/formakademisk.787. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/284488565_A_Framework_for_Systemic_Design
- (23) Battistoni, C., Nohra, C.G., & Barbero, S. (2019). *A Systemic Design Method to Approach Future Complex Scenarios and Research Towards Sustainability: A Holistic Diagnosis Tool*. Sustainability, 11, 4458.
- (24) Leo Alting. *Life Cycle Engineering and Design*. CIRP Annals, volumen 44, Edición 2, 1995, Páginas 569-580, ISSN 0007-8506, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60504-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60504-6). (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607605046>)
- (25) Boquera Tovar, P. (2019, 26 noviembre). *El potencial de los Sistemas Producto-Servicio para la transición a un modelo de Economía Circular*. Guía realizada por AIDIMME. Actualidad AIDIMME. <https://actualidad.aidimme.es/2018/01/11/potencial-los-sistemas-producto-servicio-la-transicion-modelo-economia-circular-guia-realizada-aidimme/>
- (26) Hwai-En Tseng, Chien-Chen Chang, Jia-Diann Li, *Modular design to support green life-cycle engineering*. Expert Systems with Applications, Volumen 34, Edición 4, 2008, Páginas 2524-2537, ISSN 0957-4174, de <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.04.018>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417407001443>)

- (27) Sánchez, J., 2011. *En busca del Diseño Centrado en el Usuario (DCU): definiciones, técnicas y una propuesta*. [online] Nosolousabilidad.com. Disponible en: <http://www.nosolousabilidad.com/articulos/dcu.htm?utm_source=iNeZha.com&utm_medium=im_robot&utm_campaign=iNezha#bi> [Consultado el 7 February 2021].
- (28) Rodríguez Morales, Luis. (2014). *Hacia el diseño centrado en el usuario*. Universidad Autónoma Metropolitana unidad Cuajimalpa, Departamento de Teoría y Procesos del Diseño.
- (29) Gómez Luna, Lilitana M. *Microalgas: Aspectos Ecológicos Y Biotecnológicos*. Revista Cubana de Química, vol. XIX, núm. 2, 2007, pp. 3-20 Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543707001>
- (30) Cubas, P. (2008). *Algas Eucariotas*. Consultado el 9 septiembre 2020, Disponible en: Aula2punto.net, <https://www.aulados.net/>
- (31) M. Grubišić et al., *Potential of Microalgae for the Production of Different Biotechnological Products*. Chem. Biochem. Eng. Q., 33 (2) 161–181 (2019). Disponible en: <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2019.1657>
- (32) Peter Neofotis, Andy Huang, Kiran Sury, William Chang, Florenal Joseph, Arwa Gabr, Scott Twary, Weigang Qiu, Omar Holguin, Jürgen E.W. Polle, *Characterization and classification of highly productive microalgae strains discovered for biofuel and bioproduct generation*, Algal Research, Volumen 15, 2016, Páginas 164-178, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.01.007>.
- (33) Bankoff, G. (1999). *Societies in Conflict: Algae and Humanity in the Philippines. Environment and History*, 5(1), 97-123. Consultado el septiembre 10, 2020, Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/20723093>
- (34) Montañez2, B. (2012). *Tecnología De Cultivo De Microalgas En Fotobiorreactores*. 2012 volumen 4, No. 7. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila.
- (35) Henrikson, R., & Edwards, M. (2012). *Imagine our Algae Future* (1st ed., pp. 5-10). Richmond, Calif.: Ronore Enterprises.
- (36) Barra Galárraga, R. (2010). *Diseño de un Fotobiorreactor Industrial para Cultivo de Spirulina (Arthrospira platensis)*. Guayaquil – Ecuador: Escuela Superior Politécnica Del Litoral.
- (37) Adameczyk, M., Lasek, J. and Skawińska, A. (2016). *CO₂ Biofixation and Growth Kinetics of Chlorella vulgaris and Nanochloropsis gaditana*. Applied Biochemistry and Biotechnology, [online] 179 (7), pp.1248-1261. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4978769/>
- (38) de Moraes MG, Costa JA. *Biofixation of carbon dioxide by Spirulina sp. and Scenedesmus obliquus cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor*. Biotechnol. 2007 May 1;129(3):439-45. doi: 10.1016/j.jbiotec.2007.01.009. Epub 2007 Enero 23. PMID: 17320994.
- (39) Kanhaiya Kumar, Chitralakha Nag Dasgupta, Bikram Nayak, Peter Lindblad, Debabrata Das, *Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria*, Bioresource Technology, Volumen 102, Edición 8, 2011, Páginas 4945-4953, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.054>.
- (40) Baky, H. H. A. E., El-Baroty, G. S., & Bouaid, A. (2014). *Lipid induction in Dunaliella salina culture aerated with various levels CO₂ and its biodiesel production*. Journal of Aquaculture Research and Development, 5(3).
- (41) Hu, C. W., Chuang, L. T., Yu, P. C., & Chen, C. N. N. (2013). *Pigment production by a new thermotolerant microalga Coelastrrella sp. F50*. Food chemistry, 138(4), 2071-2078.
- (42) Elankovan, R., & Premalatha, M. (2019). *Utilization of unfiltered LPG-burner exhaust-gas emission using microalga Coelastrrella sp.* Journal of CO₂ Utilization, 29, páginas 283-295.
- (43) Robin J. Marles, Marilyn L. Barrett, Joanne Barnes, Mary L. Chavez, Paula Gardiner, Richard Ko, Gail B. Mahady, Tieraona Low Dog, Nandakumara D. Sarma, Gabriel I. Giancaspro, Maged Sharaf & James Griffiths (2011) *United States Pharmacopeia Safety Evaluation of Spirulina*, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 51:7, paginas 593-604, DOI: 10.1080/10408391003721719
- (44) López, F. and Morales, E., 2006. *Prototipo de un Fotobiorreactor*. México, D. F. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL. Prototipo de un fotobiorreactor.pdf – IPN <https://tesis.ipn.mx>
- (45) Ruma Arora Soni, K. Sudhakar, R.S. Rana, *Spirulina – En growth to nutritional product: A review*, Trends in Food Science & Technology, Volumen 69, Parte A, año 2017, Páginas 157-171, ISSN 0924-2244, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.09.010>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224417302182>)
- (46) Sara P. Cuellar-Bermudez, Jonathan S. Garcia-Perez, Bruce E. Rittmann, Roberto Parra-Saldivar, *Photosynthetic bioenergy utilizing CO₂: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels*, Journal of Cleaner Production, Volumen 98, año 2015, Páginas 53-65, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.034>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614002558>)
- (47) Barra Galárraga, R. (2010). *Diseño de un Fotobiorreactor Industrial para Cultivo de Spirulina (Arthrospira platensis)*. Guayaquil – Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- (48) E. Sierra, F.G. Ación, J.M. Fernández, J.L. García, C. González, E. Molina, *Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae*, Chemical Engineering Journal, Volumen 138, Ediciones 1–3, 2008, Páginas 136-147, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.06.004>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894707004068>)
- (49) Bojan Tamburic, Fessehay W. Zemichael, Paul Crudge, Geoffrey C. Maitland, Klaus Hellgardt, *Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production*, International Journal of Hydrogen Energy, Volumen 36, Edición 11, 2011, Páginas 6578-6591, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.091>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911004459>)
- (50) Akkerman I, Janssen M, Rocha J, Wijffels RH. *Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design*. Int J Hydrogen Energy 2002; 27:1195e208.

- (51) Fernández-Sevilla J.M., Ación-Fernández F.G., Molina-Grima E. (2014) *Photobioreactors Design for Hydrogen Production*. In: Zannoni D., De Philippis R. (eds) *Microbial BioEnergy: Hydrogen Production. Advances in Photosynthesis and Respiration (Including Bioenergy and Related Processes)*, vol 38. Springer, Dordrecht. https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/978-94-017-8554-9_13
- (52) Vargas, Sandra & Gómez Pérez, César & Espinosa Oviedo, Jairo. (2017). *A method for the design of a continuous microalgae culture photobioreactor in series with recirculation system*. CT y F - Ciencia, Tecnología y Futuro. 7. 101-116. 10.29047/01225383.68.
- (53) Yusuf Chisti, *Biodiesel in microalgae*. *Biotechnology Advances*, Volumen 25, Edición 3, 2007, Páginas 294-306, ISSN 0734-9750, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975007000262>)
- (54) Duan, Yuhua & Shi, Fan. (2014). *Bioreactor design for algal growth as a sustainable energy source*. 10.1016/B978-0-444-59566-9.00002-8.
- (55) Sontaya Krichnavaruk, Worapannee Loataweesup, Sorawit Powtongsook, Prasert Pavasant, *Optimal growth conditions and the cultivation of Chaetoceros calcitrans in airlift photobioreactor*. *Chemical Engineering Journal*, Volumen 105, Edición 3, 2005, Páginas 91-98, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.10.002>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894704003304>)
- (56) Richard Sayre, *Microalgae: The Potential for Carbon Capture*. *BioScience*, Volumen 60, Edición 9, Octubre 2010, Páginas 722–727, <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.9>
- (57) Xiaoli Chai, Xin Zhao, *Enhanced removal of carbon dioxide and alleviation of dissolved oxygen accumulation in photobioreactor with bubble tank*, *Bioresource Technology*, Volumen 116, 2012, Páginas 360-365, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.105>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241200569X>)
- (58) Quirós Fournier, Jose, *Determinación de modelos para la predicción de los coeficientes volumétricos de transferencia de masa (kLa) oxígeno-medio de cultivo en biorreactores tipo tanque agitado*, Escuela de Ingeniería Química, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José, Costa Rica. 2014
- (59) Mirlisenna, G. (2016). *¿Qué es el método de elementos finitos y cómo es utilizado en la simulación?* Consultado el 2 febrero 2021, en <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- (60) Gao X, Kong B, Vigil RD. *Multiphysics simulation of algal growth in an airlift photobioreactor: Effects of fluid mixing and shear stress*. *Bioresour Technol*. 2018 Mar; 251:75-83. doi: 10.1016/j.biortech.2017.12.014. Epub 2017 Dec 13. PMID: 29272771.
- (61) Aslanbay Guler, Bahar & Deniz, Irem & Demirel, Zeliha & Imamoglu, Esra. (2019). *Computational fluid dynamics simulation in scaling-up of airlift photobioreactor for astaxanthin production*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 129. 10.1016/j.jbiosc.2019.06.010.
- (62) Calvo, F., Bula, A., Di Mare, L. et al. *CFD simulation of multiphase (liquid–solid–gas) flow in an airlift column photobioreactor*. *Acta Mech* 228, 2413–2427 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00707-017-1828-1>
- (63) Werner, Sören & Kaiser, Stephan & Kraume, Matthias & Eibl, Dieter. (2014). *Computational fluid dynamics as a modern tool for engineering characterization of bioreactors*. *Pharmaceutical Bioprocessing*. 2. 85-99. 10.4155/PBP.13.60.
- (64) *Navier–Stokes equations* - Wikipedia. (2021). Consultado el 7 de May 2021, de https://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes_equations
- (65) Vera Manjarrez, L., 2012. Página 6 - Semanario de la UAM Vol. XIX Núm. 1. [online] Uam.mx. Disponible en: <https://www.uam.mx/semanario/xix_01/files/assets/basic-html/page6.html> [Consultado el 4 de marzo 2021].
- (66) García Parra, Brenda. *Diseño de Estructuras con Microalgas. Explorando caminos Alternativos Hacia la Sustentabilidad en el Ámbito Urbano*. Memorias del segundo coloquio nacional en investigación para el diseño, Artistas del Diseño. Universidad Autónoma de Aguascalientes. (pág. 399-406) [Consultado el 4 March 2021].
- (67) Boletines UAM Número 220. *Instala la UAM Cultivo de Alga Espirulina en Chiquihuitlán, Oaxaca*. (2017). Consultado el 10 de marzo 2020, obtenido de <http://www.comunicacionsocial.uam.mx/boletinesuam/220-17.html>
- (68) Villanueva, A., 2019. *Estas torres con microalgas filtran el aire como lo harían 360 árboles*. [online] Tec.mx. Disponible en: <<https://tec.mx/es/noticias/nacional/emprendedores/estas-torres-con-microalgas-filtran-el-aire-como-lo-harian-360>> [Consultado el 2 de febrero 2020].
- (69) Aouf, R., 2019. *Spira countertop bioreactor allows users to grow their own algae for food*. [online] Dezeen. Disponible en: <<https://www.dezeen.com/2019/11/11/spira-bioreactor-algae-spirulina-food/>> [Consultado el 6 de febrero 2020].
- (70) iF WORLD DESIGN GUIDE. 2021. *Algae Bus Stop*. [online] Disponible en: <<https://ifworlddesignguide.com/entry/252092-algae-bus-stop>> [Consultado el 7 Junio 2021].
- (71) Guimapang, K. (2020). University of Florida. *Graduates Mani Karami and Drew Kauffman Create Photobioreactor Facade Systems for Algae Architecture*. Consultado el 8 de Enero 2021, de <https://archinect.com/features/article/150209394/university-of-florida-graduates-mani-karami-and-drew-kauffman-create-photobioreactor-facade-systems-for-algae-architecture>
- (72) Pasquero, C. and Poletto, M., 2019. *About photo.Synthetic*. [online] Photosynthetic.co.uk. Disponible en: <<https://www.photosynthetic.co.uk/about/>> [Consultado el 5 de febrero 2021].
- (73) Morris, A. (2017). *IKEA lab Space10 creates algae-producing pavilion in Copenhagen (Dezeen)* - MSD Magazine. Consultado el 8 octubre 2020, en <http://www.misosoupdesign.com/magazine/ikea-lab-space10-creates-algae-producing-pavilion-copenhagen-dezeen/>
- (74) Hitti, N. (2019). *Hyunseok An designs a sustainable algae micro-farm for the home*. Consultado el 7 de febrero 2020, disponible en <https://www.dezeen.com/2019/07/04/hyunseok-an-algae-the-coral-micro-farm/>
- (75) Vrenna, M.; Peruccio, P.P.; Liu, X.; Zhong, F.; Sun, Y. *Microalgae as Future Superfoods: Fostering Adoption through Practice-Based Design Research*. *Sustainability* 2021, 13, 2848. <https://doi.org/10.3390/su13052848>
- (76) **Biomitech** – Tecnología inspirada en la naturaleza. (2021). Consultado el 8 de octubre 2021, en <https://biomitech.org/>

- (77) Kim, K.H. (2014). *A Feasibility Study of an Algae Façade System*. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Feasibility-Study-of-an-Algae-Fa%C3%A7ade-System-Kim/2f7a6d33ba10cf1eda2a9ebc320cbe54543418b1>
- (78) Ghada Mohammad Elrayies, *Microalgae: Prospects for greener future buildings*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volumen 81, Parte 1, 2018, Páginas 1175-1191, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117311747>)
- (79) Bernard, M. (2011). *HOK/ Vanderweil Process Zero Concept Building: As Green As... Algae?* - Buildipedia. Consultado el 9 octubre 2021, en <http://buildipedia.com/aec-pros/featured-architecture/hok-vanderweil-process-zero-concept-building-as-green-asalgae>
- (80) Sara Wilkinson, Paul Stoller, Peter Ralph, Brenton Hamdorf, Laila Navarro Catana, Gabriela Santana Kuzava, *Exploring the Feasibility of Algae Building Technology in NSW*, Procedia Engineering, Volumen 180, 2017, Páginas 1121-1130, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.272>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817317794>)
- (81) Pruvost, Jeremy. " *SYMBIO2 project : Study and optimization of the solar culture of microalgae in building facades* ". Algosolis, 2017, <https://algosolis.com/en/projets-biomasse/study-and-optimization-of-the-solar-culture-of-microalgae-in-building-facades/>.
- (82) XTU Architects. (2016). *Biofacades, capteur solaire biologique de demain*. Consultado el 9 de octubre 2021, de https://issuu.com/xtu_architects/docs/dossier_de_presse_biofacades_symbio
- (83) Caffagni, D. E., Camargo, E., Casali, C. A., Lombardi, A. T., & Lima, M. I. S. (2015). *Coupling microalgal cultures with hydroponics: Prospection for clean biotechnology processes*. J. Algal. Biomass. Util, 6, 88-94.
- (84) Zhang, J., Wang, X., & Zhou, Q. (2017). *Co-cultivation of Chlorella spp and tomato in a hydroponic system*. Biomass and Bioenergy, 97, 132-138.
- (85) Barone, V., Puglisi, I., Fragalà, F., Piero, A. R. L., Giuffrida, F., & Baglieri, A. (2019). *Novel bioprocess for the cultivation of microalgae in hydroponic growing system of tomato plants*. Journal of Applied Phycology, 31(1), 465-470.
- (86) Huo, S., Liu, J., Addy, M., Chen, P., Necas, D., Cheng, P., ... & Ruan, R. (2020). *The influence of microalgae on vegetable production and nutrient removal in greenhouse hydroponics*. Journal of Cleaner Production, 243, 118563.
- (87) Supraja, K. V., Behera, B., & Balasubramanian, P. (2020). *Performance evaluation of hydroponic system for co-cultivation of microalgae and tomato plant*. Journal of Cleaner Production, 272, 122823.
- (88) Knowledge.schott.com. 2016. *Photobioreactor Design - Glass versus Polymer: How to choose the correct tubing material for photobioreactors* | SCHOTT AG. [online] Disponible en: https://knowledge.schott.com/art_resource.php?sid=jidh.9tisfq [Consultado 14 de mayo 2021].
- (89) Bellehumeur, C.; Li, L.; Sun, Q.; Gu, P. *Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process*. J. Manuf. Process. 2004, 6, 170-178. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612504700717>
- (90) Travieso-Rodríguez, J. A., Ramon Jerez-Mesa, Jordi Llumà, Oriol Traver-Ramos, Giovanni Gomez-Gras, and Joan J. Roa Rovira 2019. *"Mechanical Properties of 3D-Printing Polylactic Acid Parts subjected to Bending Stress and Fatigue Testing"* Materials 12, no. 23: 3859. <https://doi.org/10.3390/ma12233859>
- (91) Simplify3d.com. 2021. *Material Properties Table*. [online] Disponible en: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/?filas=abs,pla,petg> [Consultado el 7 de abril 2021].
- (92) Curbellplastics.com. 2021. *ABS Outstanding impact resistant low cost plastic*. [online] Disponible en: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Materials/ABS> [Consultado el 14 Octubre 2021].
- (93) Prusament.com. 2020. *Petg Technical Data Sheet*. [online] Disponible en: https://prusament.com/media/2020/01/PETG_TechSheet_ENG.pdf [Consultado el 14 de octubre de 2021].
- (94) MG Chemicals. 2021. *Petg- Technical Datasheet (TDS)*. [online] Disponible en: <https://www.mgchemicals.com/products/3d-printing-materials/3d-printer-filament/petg-filament/> [Consultado el 14 de octubre 2021].
- (95) SD3D.com. 2021. *Petg_ Technical Data Sheet (TDS)*. Consultado el 14 de octubre de 2021, Disponible en https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PETG_01.pdf
- (96) Polymerland-*Chemical Resistance Polycarbonate Sheets*. (2021). Consultado el 14 de octubre 2021, en https://www.polymerland.cl/contenido.php?id_articulo=87&id_categoria=0
- (97) Professional Plastics (2021). *Polycarbonate Data Sheet*. Consultado el 14 de octubre de 2021, en <https://www.professionalplastics.com/PolycarbTube>
- (98) Curbell Plastics. *Polycarbonate Transparent, strong and stiff thermoplastic with outstanding impact resistance (datasheet)*. (2021). Consultado el 14 de octubre 2021, en <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/>
- (99) CurbellPlastics. 2021. *Tuffak- Polycarbonate Data Sheet*. [online] Disponible en: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/> [Consultado el 14 de octubre 2021].
- (100) Polymerland - *Tubería de acrílico (PMMA)*. (2021). Consultado el 15 Octubre 2021, en https://www.polymerland.cl/contenido.php?id_articulo=166&id_categoria=37
- (101) Acrilux - *Propiedades Del Acrílico*. (2021). Consultado el 15 de octubre 2021, en <https://acrilux.com.ec/files/PROPIEDADES.pdf>
- (102) *Propiedades del acrílico*. (2021). Consultado el 15 octubre 2021, en <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html#transmisiondeluz>
- (103) *Acrylic Data Sheet*. (2021). Consultado el 15 octubre 2021, en <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Acrylic-Data-Sheet>
- (104) AMGARD *Acrylic Data Sheet*. (2021). Consultado el 15 octubre 2021, en <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/AMGARD-Acrylic-Sheet-Data-Sheet>

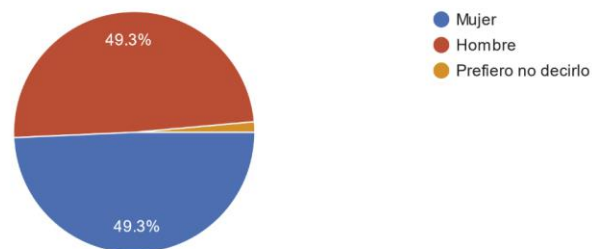
- (105) Euroglas. *Cristal Templado - Ficha Técnica*. (2021). Consultado el 15 octubre 2021, de <http://bus.euroglas.net/sites/bus.euroglas.net/files/descargas/fichaTEMPLADO3.pdf>
- (106) Adivita, T., 2021. Prototipado 3D, su Importancia Hoy en Día • TRIDI. [online] TRIDI. Disponible en: <<https://www.tridimx.com/blog/prototipado-3d-su-importancia-hoy-en-dia/>> [Consultado el 13 de noviembre de 2021].
- (107) Heizer, J. and Render, B., 2009. *Principios de Administración de Operaciones* (7a. ed.). 7th ed. Edo. de México: Pearson Educación, pp.253-275.
- (108) Tutoriales, G. (2015). *Estrategias de Procesos*. Consultado el 16 Diciembre, 2021, consultado: <https://www.gestiondeoperaciones.net/procesos/estrategias-de-procesos/>
- (109) CAIRPLAS. 2018. *¿Qué son los plásticos?* [online] Disponible en: <https://cairplas.org.ar/plasticos/> [Consultado el 18 de Diciembre, 2021].
- (110) Envaselia. *Tipos de plásticos: termoplásticos, termoestables y elastómeros*. (2021). Consultado el 18 diciembre, 2021, en <https://www.ensavelia.com/blog/tipos-de-plasticos-termoplasticos-termoestables-y-elastomeros-id14.htm>
- (111) Formlabs. *Guide to Manufacturing Processes for Plastics*. (2021). Consultado el 16 de diciembre, 2021, en <https://formlabs.com/blog/guide-to-manufacturing-processes-for-plastics/>
- (112) Autodesk. *CAD/CAM | Diseño y fabricación asistidos por ordenador* | Autodesk. (2020 Consultado el 18 de diciembre, 2021, en <https://www.autodesk.es/solutions/cad-cam>
- (113) García Huérfano, J., 2003. *Rotomoldeo: economía y versatilidad en una sola técnica*. [online] Plastico.com. Disponible en: <<https://www.plastico.com/temas/Rotomoldeo,-economia-y-versatilidad-en-una-sola-tecnica+3026522>> [Consultado el 18 de diciembre, 2021].
- (114) Formlabs. *Introducción al moldeo en vacío* | Formlabs. (2021). Consultado el 18 de diciembre, 2021, en <https://formlabs.com/es/blog/introduccion-moldeo-vacio/>
- (115) *Termoconformado* - Wikipedia, la enciclopedia libre. (2021). Consultado el 19 de diciembre, 2021, en <https://es.wikipedia.org/wiki/Termoconformado>
- (116) Protolabs. *Moldeo por inyección de plásticos*. (Consultado el 19 de diciembre, 2021, en <https://www.protolabs.es/servicios/moldeo-por-inyeccion/moldeo-por-inyeccion-de-plasticos/>
- (117) Flores García, A., 2021. *Extrusor de polímeros, ¿qué es y cómo funciona?*. [online] Anahuac.mx. Disponible en: <<https://www.anahuac.mx/mexico/noticias/Extrusor-de-polimeros-que-es-y-como-funciona>> [Consultado el 19 de diciembre, 2021].
- (118) Motan-Colortronic. 2021. *Moldeo por soplado*. [online] Disponible en: <<https://www.motan-colortronic.com/es/segmentos-del-mercado/moldeo-por-soplado.html>> [Consultado el 19 de diciembre, 2021].
- (119) Wang, X., 2021. *Personas in the User Interface Design*. University of Calgary, Alberta, Canada. [online] Pages.cpsc.ucalgary.ca Disponible en: <<http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~saul/wiki/uploads/CPSC681/topic-wan-personas.pdf>> [Consultado el 20 Noviembre 2021].
- (120) Tejada Mansir, A., Montesinos Cisneros, R., & Guzmán Zamudio, R. (2011). *Bioseparaciones* (2nd ed., pp. 67-109). Naucalpan de Juárez: Pearson Educación.
- (121) J. Masojidek, G. Torzillo, *Mass Cultivation of Freshwater Microalgae*, Editor(s): Sven Erik Jørgensen, Brian D. Fath, Encyclopedia of Ecology, Academic Press, 2008, Pages 2226-2235, ISBN 9780080454054, <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00830-2>.
- (122) Sili C., Torzillo G., Vonshak A. (2012) *Arthrospira (Spirulina)*. In: Whitton B. (eds) Ecology of Cyanobacteria II. Springer, Dordrecht. https://doi-org.pbid.unam.mx:2443/10.1007/978-94-007-3855-3_25
- (123) Çengel, Y., 2007. *Heat and mass transfer*. 3rd ed. Reno, Nevada: University of Nevada, Reno, pp.131-663.
- (124) Conor, N., 2022. *¿Qué es el número de Prandtl?* [online] Thermal-engineering.org. Disponible en: <<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-prandtl-definicion/>> [Revisado el 11 noviembre 2021].
- (125) Coaguila Gonzales, J. and Condori Pilares, E., 2014. *Diseño, cálculo y construcción de la chaqueta de un tanque agitado del laboratorio de diseño de reactores de la Escuela Profesional de Ingeniería Química*. [online] Repositorio.unsa.edu.pe. Disponible en: <<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3968>> [Revisado el 11 diciembre 2021].
- (126) Piedrahita, J., & Urbano, S. (2012). *Diseño del sistema de alimentación y control de temperatura en un fotobiorreactor para la producción de biomasa y ácidos grasos a partir del cultivo de la microalga Chlorella vulgaris*. Revisado el 11 diciembre 2021, Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6569/1/6122918-2017-2-iq.pdf>
- (127) Merchuk, José & CAMACHO, FRANCISCO & Molina-Grima, Emilio. (2007). *Photobioreactor Design and Fluid Dynamics*. Chemical & Biochemical Engineering Quarterly (cabeq@pbf.hr); Vol.21 No.4. 21.
- (128) Gaitero Álvarez, A. (2022). *Biofijación de CO2 Mediante el Cultivo de Algas. Diseño de un Prototipo de Fotobiorreactor para el Cultivo de "Spirulina Platensis."* Revisado el 13 diciembre 2021, disponible en <http://www.conama2012.conama.org/conama10/download/files/conama11/CT%202010/1896706028.pdf>
- (129) Fernández, Diego & Herrera, Jennifer & Fonseca, Steven & Sandoval, Juan Andrés. (2014). *Diseño de un fotobiorreactor Airlift a escala banco*. ELEMENTOS. 4. 10.15765/e.v4i4.520.
- (130) Morita M, Watanabe Y, Saiki H. *Evaluation of photobioreactor heat balance for predicting changes in culture medium temperature due to light irradiation*. Biotechnol Bioeng. 2001 Sep 20;74(6):466-75. doi: 10.1002/bit.1137. PMID: 11494213.
- (131) Rodríguez Morales, L., Bedoya Pereda, D., Morales Zaragoza, N., López Órnela, E., Martínez de la Peña, G., Gamboa Rodríguez, F. and Peñalosa Castro, E., n.d. *Diseño centrado en el usuario*. 1st ed. México: Designio.
- (132) Oilgae (n.d.). *Materials used in photobioreactor design*. Disponible en: http://www.oilgae.com/ref/downloads/materials_used_in_PBR_construction.pdf

- (133) Organización de las Naciones Unidas. (2021). *Hambre y Seguridad Alimentaria*. Consultado el 17 de noviembre de 2021, en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
- (134) Arredondo-Vega, Bertha & Voltolina, Domenico. (2007). *CONCENTRACIÓN, RECUENTO CELULAR Y TASA DE CRECIMIENTO*. Consultado el 10 de enero de 2022, en: www.researchgate.net/publication/253237563_CONCENTRACION_RECUENTO_CELULAR_Y_TASA_DE_CRECIMIENTO
- (135) García-Rodríguez, Agustín, & Boffill-Rodríguez, Yanet, & Castellanos-Estupiñán, Jesús (2012). ESTIMACIÓN CUANTITATIVA PRELIMINAR DE ÍNDICES DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA MICROALGAL A PARTIR DE LA REACCIÓN DE FOTOSÍNTESIS. *Tecnología Química*, XXXII(1),26-33.[fecha de Consulta 15 de Mayo de 2022]. ISSN: 0041-8420. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543775004>
- (136) BIOMASA | *Definition of BIOMASA* by Oxford Dictionary on Lexico.com also meaning of BIOMASA. (2022). Retrieved 18 May 2021, from <https://www.lexico.com/es/definicion/biomasa>
- (137) Tierra, L. (2022). *Ciclos biológicos* | Ciencia y Biología. Retrieved 18 May 2021, from <https://cienciaybiologia.com/ciclos-biologicos/>
- (138) Ortiz-Villota, M. T., Romero-Morales, M. A., & Meza-Rodríguez, L. D. (2018). *La biorremediación con microalgas (Spirulina máxima, Spirulina platensis y Chlorella vulgaris) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia*. *Rev.investig.desarro.innov*, 9 (1), 163-176.
- (139) Biomitech – *Tecnología inspirada en la naturaleza*. (2022). Retrieved 19 May 2021, from <http://biomitech.org/>

Anexo A

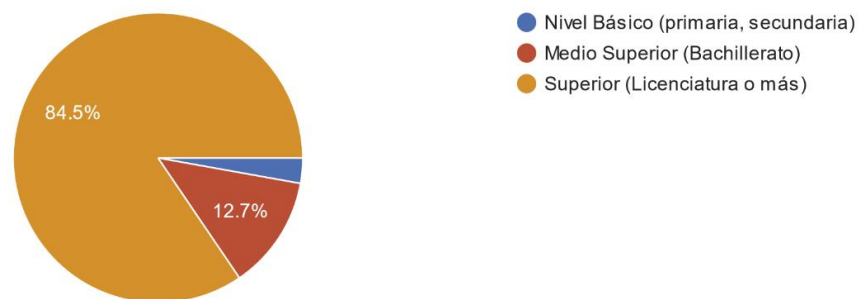
Definición de usuario (Capítulo 4.1): Se muestran las gráficas correspondientes al capítulo 4.1-Definición de usuario.

Por favor indicanos tu sexo
71 respuestas



Gráfica. Se muestran los resultados gráficos obtenidos y descritos en el ejercicio de definición de usuario en torno al género de cada participante.

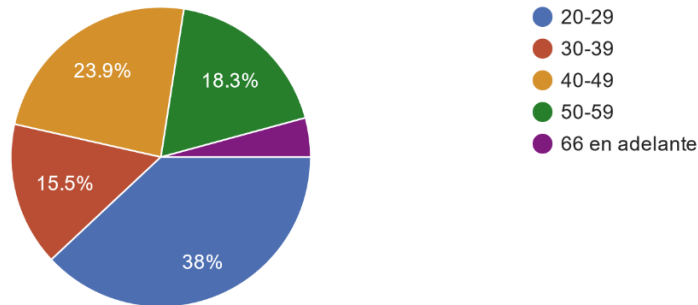
¿Qué nivel de escolaridad tienes?
71 respuestas



Gráfica. Se muestran los resultados gráficos obtenidos y descritos en el ejercicio de definición de usuario en torno al nivel de escolaridad de los participantes.

¿Qué edad tienes?

71 respuestas



Gráfica. Se muestran los resultados gráficos obtenidos y descritos en el ejercicio de definición de usuario en torno a la edad de los participantes.

Anexo B

Se muestran la diapositiva informática presentada a los participantes en el ejercicio de definición de usuario como parte de la homogeneización de conocimientos.

Alga Espirulina

El alga **Espirulina** es un alimento con alto valor nutricional, su nivel de proteínas de alta calidad equivale a alrededor del 60-70% de su peso seco, y contiene una dosis equilibrada de **carbohidratos (12-25%)**, **lípidos** y **aminoácidos esenciales (18%)**.

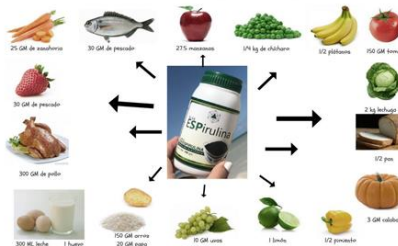
También es una rica fuente de **vitaminas (vitamina E, vitamina B12)** y **pigmentos (caratenoides, Clorofila, Ficocianina)**.

Sus presentaciones son variadas, en polvo, en **pasta fresca**, pastillas, en dulces, galletas, y platillos de alta cocina.



El alga **Espirulina** es un microorganismo acuático por lo que para su presentación en polvo es sometida a procesos de secado industrial...

Valor nutricional de 1 gramo de Espirulina



Por esto se recomienda consumir **espirulina fresca** para aprovechar al máximo sus beneficios



...esto ocasiona que muchos de sus **nutrientes** y **elementos antimicrobianos, antivíricos y antioxidantes** sufran un **proceso de oxidación**.

Anexo C

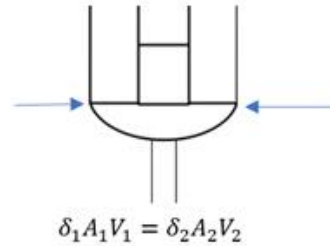
Se muestra el cálculo realizado para la obtención de la presión hidrostática al fondo del contenedor cilíndrico o fotocelda.

$P = \rho gh$ Presión hidrostática (presión al fondo)

Densidad	1000	kg/m ³
Gravedad	9.8	m/s ²
Altura	0.45	m

Área Peso total sobre la base	4,410.00	pascales
	0.640	psi
	0.045	kg/cm ²
	182.4151	cm ²
	8.20	kg

Presión de la columna de líquido sobre la base



Se muestra el cálculo realizado para la velocidad de flujo en la salida del orificio “sin bomba”.

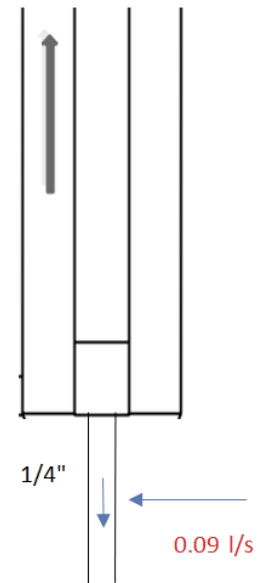
Velocidad de flujo en el orificio	2.970	m/s	$V = \sqrt{2gh}$
Caudal de flujo a la salida (fondo, orificio)			
Díametro (tubería)	0.00635	m	1/4"
área transversal	0.000032	m ²	
Caudal	0.000094	m ³ /s	$Q = \frac{\Delta Vol}{\Delta t} = \frac{A_{base} * h}{\Delta t} = A_{base} * vel$ $Q_1 = V_1 A_1$
	94.0530	cm ³ /s	
	0.0941	l/s	

Ley de Torricelli

$$v_1 = A_2 V_2 / A_1$$

Flujo másico	0.0941	kg/s
--------------	--------	------

$$\dot{m} = \rho A \vec{V}$$



Anexo D

Se muestra el cálculo realizado para la obtención del tiempo de calentamiento de un volumen de agua específico, sin tomar en cuenta las salidas de flujo de energía.

Calculo de Q en estado estacionario

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T \quad P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

vol del reactor=	0.0075 m ³	tiempo	0.46 h
densidad=	997 kg/m ³		27.82 min
m=	7.48 kg		1,669.38 seg
Cp	4186 J/kg ^o k		
T1	25 ^o C		
T2	33 ^o C		
ΔT	8 ^o C		
Q	250,406.52 J		
Wattaje del calentador	150 watts		

Se muestra el procedimiento algebraico de sustitución de la ecuación (20) en la ecuación (21) correspondientes al capítulo 4.5. Control de temperatura. Se muestra la ecuación resultante.

$$dQ = mC_p dT$$

$$\frac{mC_p dT}{dt} = -(kA_s \Delta T + hA_s \Delta T + \varepsilon \sigma A \Delta T^4)$$

$$\int_{T_0}^T \frac{dT}{T_0 - T_f} = - \int_0^t \frac{(kA_s + hA_s + \varepsilon \sigma A_s)}{mcp}$$

$$T(t) = T_0 e^{-\frac{kA_s t}{mC_p}} + T_0 e^{-\frac{hA_s t}{mC_p}} + T_0 e^{-\frac{\varepsilon \sigma A_s t}{mC_p}}$$

$$T(t) = T_0 \left(e^{-\frac{kA_s t}{mC_p}} + e^{-\frac{hA_s t}{mC_p}} + e^{-\frac{\varepsilon \sigma A_s t}{mC_p}} \right)$$

$$T(t) = T_0 \left(e^{-\frac{kA_s t}{mC_p}} - \frac{hA_s t}{mC_p} - \frac{\varepsilon \sigma A_s t}{mC_p} \right)$$

$$\ln T = \ln T_0 + \ln e^{-\frac{kA_s t}{mC_p} - \frac{hA_s t}{mC_p} - \frac{\varepsilon \sigma A_s t}{mC_p}}$$

$$\ln T = -\frac{A_s(k + h + \varepsilon \sigma)}{mC_p} \cdot t + \ln T_0$$

Anexo E

Se muestran los elementos y características principales de los elementos utilizados para la automatización y monitoreo de parámetros.

Sistema	Pieza	Foto	Especificaciones eléctricas	diagrama	Voltaje	Amperaje mA	Watts	Tiempo de uso (h)	Consumo Wh	
pH	Medidor de pH Kit SKU: SEN0169		Alimentación: 5VCC Corriente de trabajo: 5-10mA		5	40	mA	0.2	0.3	0.06
Temperatura interna del reactor (líquido)	Sensor de temperatura DS18B20 (TO-92) encapsulado para líquidos (waterproof)		Voltaje de alimentación 3V a 5,5V VDD voltaje de alimentación GND Tierra DQ		5.5	1.5	mA	0.00825	20	0.17
Placa madre	Microcontrolador Arduino mega		Voltaje Operativo: 5V Voltaje de Entrada: 7-12V Voltaje de Entrada(límites): 6-20V Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida: 40		12	50	mA	0.6	24	14
Sistema de automatización	Pantalla LCD 16x2		Voltaje de operación: 4.5 – 5.5V		5.5	18.5	mA	0.10175	10	1.02
Sistema de automatización	Módulo I2C para pantalla LCD 1602		Alimentación (GND y 5V)		5	100	µA	0.0005	20	0.01
Sistema de automatización	Relé		Módulo de 1 Relevador (5V-10A)		5	10	A	50	0.1	5.00
Flujo de salida del reactor	Sensor Switch De Nivel De Agua		Voltaje (max.): 0-100 V DC • Corriente (max.): 0.5A Potencia máxima: 10w Resistencia de contacto: 100 MΩ		100		10	0.3	3.00	
Flujo de salida del reactor	Mini Bomba De aire Dc 3v-9v Arduino		Voltaje de operación: 3v a 9v Corriente: 0.36A (sin carga)		9	0.36	A	3.24	24	77.76
Flujo de salida del reactor	Relé		Módulo de 1 Relevador (5V-10A)		5	10	A	50	0.5	25
Sistema de calentamiento	Termostato W1209		tensión de alimentación: 12 v		65	20	mA	1.3	12	15.60
Calentador	Calentador Termostato 30 A 200 Litros		120 volts a 60 Hz		110	300	mA	200	13.6	2,720
Encendido	Led de encendido		5v a 10mA		5	10	mA	0.05	24	1
Fecha y hora del sistema	RTC (real time clock)		3.3v		3.3	0.1	mA	0.00033	24	0.00792
Sistema de control	Bluetooth		5v		5	30	mA	0.15	24	3.6
Total									2.86	KWh/día