

APOLO

Diseño de fotobiorreactores para el cultivo de microorganismos a partir de estímulos
lumínicos

Daniela Morales Pirajan

Trabajo de grado para optar al título de diseñadora industrial

Asesores:

DI. Erick Hansen

M Ed. Beatriz Helena Rolón Domínguez

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Facultad de Artes y Diseño

Programa de Diseño Industrial

Bogotá

2018

AGRADECIMIENTOS

Con la satisfacción de haber culminado exitosamente esta etapa de mi vida y proceso académico quiero agradecer a mi familia, pilares fundamentales en mi vida, gracias por su ejemplo, dedicación, por enseñarme que a pesar de las adversidades quien persiste lo logra y que los límites son impuestos por nosotros mismos, por ser un apoyo incondicional, siempre dando lo mejor en cada una de mis etapas y por depositar en mí su entera confianza en cada reto que se me presenta.

A mis amigos Ana María Conrado y Sandra Parra, pieza esencial en este proceso, gracias por su apoyo personal y humano que lograron no solo facilitarme este proceso sino también enriquecieron mi vida tanto a nivel profesional como personal y por ser mi apoyo en momentos de quiebre.

A mis profesores tutores de tesis Erick Hansen y Beatriz Rolón por el apoyo y dedicación brindada, por el respeto al desarrollo de este proyecto y rigor en las exigencias, que facilitaron concluirlo con los mejores resultados.

Agradezco a mis compañeros de Ingeniería Química, Sonia Botero y Sebastián Rodríguez, por compartir parte de sus conocimientos, indispensables en la creación y avance de este proyecto de investigación.

A la profesora Yineth Piñeros, por permitirme, en un inicio hacer parte del grupo de investigación que fue punto esencial para la creación del proyecto.

Al profesor y diseñador industrial Javier Enrique Jiménez Hurtado, por enseñarme a amar la profesión, por generar en mi la necesidad de incursionar en áreas poco convencionales desde el Diseño Industrial, y por permitirme trabajar en relación a su proyecto doctoral de investigación.

A todos, muchas gracias

RESUMEN

A partir de la Revolución Industrial (S. XVIII) el consumo energético en el planeta sufrió un aumento considerable, generando así la necesidad de implementar diferentes tipos de energía como, por ejemplo, la energía no renovable (petróleo, carbón, gas natural y uranio) que representa un riesgo para la conservación y el cuidado ambiental.

El uso de este tipo de energías genera diferentes problemáticas, como la creación de gases contaminantes a causa de los desechos expulsados por los procesos de transformación, cuya concentración en la atmósfera provoca diversos aspectos negativos en el medio ambiente (formación de lluvia ácida, smog fotoquímico, aumento efecto invernadero y concentraciones de ozono troposférico (escuelapedia, s.f.)) a su vez, deja como resultado la presencia de residuos nucleares radioactivos que al emitir radiación alfa, beta y gamma generan un aumento en la temperatura global, causando a su vez destrucción de los diferentes ecosistemas naturales existentes.

Al ser recursos limitados, su uso y desperdicio, traerá escases y agotamiento, que en un futuro significarán la necesidad de dependencia económica global en relación a países con mejor oportunidad de explotación.

Evidenciando las problemáticas ambientales presentadas por la implementación de fuentes no renovables, se plantea el uso de energías limpias (biomasa) que las sustituyan, optimizando sus funciones en busca de soluciones ambientales.

La generación de energía (biomasa) a partir de organismos biológicos existentes (microalgas) representan una oportunidad de inserción en este campo, buscando a partir

del diseño, la creación de un medio de cultivo (Fotobiorreactor), en donde la exploración formal a partir de conceptos de diseño, geometría sagrada y lógica matemática permitan identificar la forma ideal y acompañado de un componente tecnológico estimular las microalgas mediante una interfaz lumínica comprendiendo intensidades y fotoperiodos, con el fin de lograr un aumento en el índice de productividad de las microalgas y generación de biomasa.

PALABRAS CLAVE

Bioprocesos, Microalgas, Microcultivo, Fotobiorreactor, Fotosíntesis

Tabla de contenido

RESUMEN	1
PLANTEAMIENTO DE DISEÑO	18
JUSTIFICACIÓN	30
OBJETIVOS	31
General	31
Específicos	31
CRITERIOS DE EVALUACIÓN	33
MARCO TEÓRICO	34
Fuentes de energía	34
Consumo de energía primaria en el mundo	36
Problemáticas generadas por el uso de energía no renovable	39
MICROALGAS	42
Beneficios del cultivo de microalgas	44
Fotosíntesis en Microalgas	46

PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN MICROALGAS	48
Beneficios uso de biomasa	50
CULTIVO DE MICROALGAS	51
Parámetros fisicoquímicos	52
Sistema de cultivo: producción microalgas	56
Fotobiorreactores abiertos	57
Fotobiorreactores cerrados	58
Tipos de fotobiorreactores cerrados	59
Deficiencias de los fotobiorreactores existentes	61
Determinantes en el diseño de un fotobiorreactor	63
ILUMINACIÓN	63
Distribución de la luz	67
Trayectoria de la luz	68
Rutas luminosas	69
Intensidad de luz	69
Fotoperiodo	70

Mezclado	70
Temperatura	70
PH	71
Recomendaciones para el diseño de un FBR	71
CONCEPTOS TENIDOS EN CUENTA PARA LA EXPLORACIÓN FORMAL EN EL DISEÑO DE UN FOTOBIOREACTOR	73
Biomímesis	73
Geometría sagrada	73
Hexágono	74
Lógica matemática	75
Número áureo / número de oro	76
Rizoma (Gilles Deleuze y Félix Guattari)	76
MARCO METODOLÓGICO	78
FASE 1	78
Investigación	78
FASE 2	80

Fundamentación	80
FASE 3	81
Exploración	81
FASE 4	81
Construcción	81
FASE 5	82
Ensamble	82
FASE 6	82
Componente tecnológico	82
FASE 7	83
Montaje sistemas	83
FASE 9	84
Medio de cultivo	84
FASE 10	84

FASE 11	85
Registro de datos	85
FASE 12	85
FASE 13	85
Exploración	85
FASE 13	86
Construcción	86
FASE 6	87
Componente tecnológico	87
FASE 6	88
ESTADO DEL ARTE	89
Sistemas de cultivo de microalgas	89
1. FOTOBIORREACTOR TUBULAR	89
Especificaciones de diseño fotobiorreactor Acualgae (Lab Model 2016)	91
Funcional	91
Formal / Estructural	92

Aspectos lumínicos	93
Análisis formal / estructural / funcional	94
Ventajas del fotobiorreactor Acualgae	95
Deficiencias fotobiorreactor Acualgae	95
2. FOTOBIORREACTOR DE COLUMNA DE BURBUJEO	95
Especificaciones de diseño de fotobiorreactor	96
Funcional	96
Formal / Estructural	97
Análisis formal / estructural / funcional	97
Ventajas del fotobiorreactor de columna de burbujeo	98
Deficiencias fotobiorreactor de columna de burbujeo	98
3. FOTOBIORREACTOR DE COLUMNA CON DIODOS LED	99
Luces de diodo en columnas de burbujeo al servicio de la producción de microalgas	99
Ventajas del fotobiorreactor de columna de diodos led	101
4. FOTOBIORREACTOR AUTÓNOMO PARA CULTIVO DE MICROALGAS ..	

Investigación en fotobiorreactores	103
2. Efecto de tres tipos de luz sobre el crecimiento de microalgas de Scenedesmus sp.	110
PROCESO DE DISEÑO	111
REQUERIMIENTOS / DETERMINANTES	111
ASPECTOS FORMALES, FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES	113
Referentes formales	113
Referentes funcionales	113
PROPUESTAS INICIALES	115
Formal / funcional / estructural	115
CONSTRUCCIÓN	121
ELABORACIÓN PROPUESTA NUMERO 7	121
Conclusiones a partir de problemáticas presentadas fotobiorreactores fase 1.....	126
A P O L O: Fotobiorreactor fase II	127
A. PROPUESTAS DISEÑO	127

B.	PROPUESTAS COMPONENTE FOTOBIORREACTOR.....	127
3.	PROPUESTA FOTOBIORREACTOR FASE II: ENSAMBLE	128
	PRUEBAS CONSTRUCCIÓN FOTOBIORREACTOR APOLO.....	129
	DISEÑO TESELADO: NÚMERO DE ORO	130
	CONSTRUCCIÓN FOTOBIORREACTOR APOLO FASE II	133
	Secuencia de uso	137
	COMPROBACIONES FOTOBIORREACTOR APOLO	138
	Conclusiones fotobiorreactor Apolo	139
	140	
5.	Se realizaron fotobiorreactores a una escala adecuada, con el fin de mejorar su productibilidad, durabilidad y reutilización.	140
	BIBLIOGRAFÍA	141

Tabla de ilustraciones

Figura 1.	Consumo de energía primaria en el mundo.....	38
Figura 2.	Diagrama esquemático de la fotosíntesis (Martin, 2010)	47

Figura 3. Rendimiento de la productividad de aceite en función de la superficie para diferentes cultivos	50
Figura 4. Fotobiorreactor abierto.	58
Figura 5. Fotobiorreactor de columna.	59
Figura 6. Fotobiorreactor plano	60
Figura 7. Fotobiorreactor tubular	60
Figura 8. Ilustración de la trayectoria de la luz y de los ciclos luz oscuridad (Contreras-Flores y col., 2003)	68
Figura 9. Fotobiorreactor Aqualgae	90
Figura 10. Fotobiorreactor Aqualgae	91
Figura 11. Forma y estructura fotobiorreactor Acualgae	92
Figura 12. Sistema de iluminación fotobiorreactores Acualgae	93
Figura 13. Análisis formal, estructural y funcional de fotobiorreactor Aqualgae.	94
Figura 14. Fotobiorreactor tipo columna de burbujeo	96
Figura 15. Análisis formal, estructural y funcional de fotobiorreactor de columna de burbujeo	98
<i>Figura 16. Equipo de la Universidad de Almería, responsable del estudio. Fundación Descubre responsable del fotobiorreactor con diodos led</i>	<i>99</i>

<i>Figura 17. Fotobiorreactor en columna de burbujeo con iluminación LED. Dispositivo utilizado en los ensayos. Fundación Descubre</i>	100
Figura 18. Fotobiorreactor autónomo para cultivo de algas	102
Figura 19. Características fotobiorreactor autónomo para cultivo de algas	103
Figura 20. Disposición formal fotobiorreactor de algas	105
Figura 21. Demanda en consumo del fotobiorreactor (W/día)	105
<i>Figura 22. Alturas para la medición de luz y volúmenes</i>	106
Figura 23. Vista superior del fotobiorreactor con la base metálica y los focos led. ..	107
Figura 24. Vista superior del fotobiorreactor con 10 LED	108
Figura 25. Tile Modular Lighting System. Distribución y Disposición especial de geometrías	113
Figura 26. Referentes de Sistemas de aire	113
Figura 27. Referentes sistemas de iluminación	114
Figura 28. Referentes estructurales	114
Figura 29. Bocetos propuesta 1	115

Figura 30. Bocetos propuesta 2	116
Figura 31. Bocetos propuesta 3	117
Figura 32. Bocetos propuesta 4	118
Figura 33. Bocetos propuesta 5	118
Figura 34. Boceto propuesta 6	119
Figura 35. Bocetos propuesta 7	119
Figura 36. Ubicación elementos necesarios para el diseño de un fotobiorreactor modular	120
Figura 37. Componentes propuesta final.....	120
Figura 38. Esquema de modularidad	121
Figura 39. Teselado a partir de patrones formales que responden a geometría sagrada y numero de oro	122

INTRODUCCIÓN

Desde la llegada de la revolución industrial, el descubrimiento y consumo energético mundial ha crecido de forma continua.

El planeta provee energía a partir de recursos naturales, energías no renovables (petróleo, carbón, gas y uranio), las cuales tardan miles de años en generarse y energías

renovables (agua, sol, viento, biomasa y calor interno de la tierra), a diferencia de las anteriores se conservarán sin agotarse en el medio, independiente del paso del tiempo.

El consumo energético y la implementación de fuentes no renovables a nivel mundial ha sufrido una aceleración, poniendo en amenaza la conservación del medio ambiente, afectando de forma directa e irreversible; generación de gases contaminantes, presencia de residuos nucleares radiactivos, destrucción de espacios naturales, escasez y agotamiento de los recursos, dependencia económica global y alteración de la línea de base ambiental (Protección del medio ambiente, s.f.) son algunas de las problemáticas generadas por el uso de este tipo de fuente energéticas no renovables.

Por el contrario los procesos de transformación de energías renovables, las que no generan gases que contribuyen al efecto invernadero, siendo catalogadas como una solución limpia y viable en la limitación de los efectos devastadores en relación con el efecto invernadero, al ser fuentes de energía inagotable cuentan con un alto potencial de aprovechamiento, dando lugar a crecientes competitivos, existe una reducción frente a la dependencia energética, lo que implica una ventaja diferencial para las economías locales y una iniciativa para la independencia energética.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto es acertado plantear el uso de organismos biológicos ya existentes con alto potencial en la producción de biomasa.

Las microalgas al ser organismos fotosintéticos que transforman la energía solar en energía química mediante la fotosíntesis (García, s.f.) producen materia orgánica llamada biomasa, “Una de las fuentes de energía renovable con más futuro a corto plazo. Se trata

de la materia orgánica, tanto de origen vegetal como animal, que puede aprovecharse con fines energéticos. El uso de la vegetal es el más extendido, podríamos decir que la energía que contiene la biomasa vegetal es, en realidad, energía solar y, en concreto, aquella que la planta almacenó en vida durante la fotosíntesis, que a su vez eliminó CO₂ de la atmósfera”. (Twenergy, 2012)

Estos organismos “Son la base de la cadena alimenticia de más del 70% de la biomasa mundial bajo una amplia variedad de condiciones medioambientales y a una velocidad de crecimiento mayor que cualquier otra fuente vegetal alternativa” (García, s.f.) y contribuyen de manera importante a la fijación de CO₂, colaborando en el control del efecto invernadero, lluvia ácida, entre otras consecuencias del uso de combustibles fósiles y a su vez son utilizadas en la producción de biocombustibles, tales como el biodiesel, bioetanol y biohidrógeno, y metabolitos secundarios con aplicación en la industria farmacéutica, acuicultura, cosmetológica.

Con el fin de potenciar el desarrollo y productividad de estos organismos, es necesario hacer uso de sistemas o dispositivos cerrados encargados de aislar el cultivo de agentes externos contaminantes (fotobiorreactores) y en conjunto con un monitoreo y controlado constante de variables como Ph, de turbulencia y mezclado, temperatura e iluminación generar un medio de cultivo adecuado, pero dichos sistemas actualmente cuentan con ciertas deficiencias y requerimientos que limitan su implementación.

Por esta razón, desde mi área de trabajo planteo una exploración formal que por medio de principios formales de diseño, haciendo referencia a la geometría sagrada como punto de partida en relación a la idealización y concepción lógica formal perfecta, y a su vez,

siendo consecuentes con el tema abordado, principios naturales, abordando conceptos como Biomímesis, proporción aurea, numero de oro, que desde un análisis lógico matemático permitan generar un fotobiorreactor que supla tanto las necesidades funcionales, como las formales, estructurales y en cuanto al componente tecnológico generar estímulos con luz, al ser una de las variables que afecta de forma directa el cultivo, y así lograr un aumento en su índice de productividad y generación de biomasa.

PLANTEAMIENTO DE DISEÑO

¿Cómo desde áreas del Diseño Industrial se pueden intervenir procesos biológicos de microorganismos, en busca de mejoras en sistemas de cultivo (Fotobiorreactor) de microalgas, con el fin de aumentar su índice de crecimiento y potencializar la producción de biomasa?

La llegada de la revolución industrial, representó en la historia un punto importante, el cual determinó el inicio en el uso y producción de energía, con el fin de suplir diferentes demandas de producción.

Según el foro económico mundial, a partir del año 2012, se presentó un aumento en el consumo energético, donde el 90 % de la energía comercial empleada en el mundo es (Gil, 2016) proveniente de fuentes no renovables, presentes en la naturaleza en cantidades limitadas.

Entre “los recursos no renovables se halla el petróleo, minerales, metales, gas natural, así como otros productos derivados de los combustibles fósiles, como la gasolina o el diésel” (Significados, s.f.), los cuales, a partir de procesos de transformación, son convertidos en energía comercial, siendo consumidos de manera más acelerada en comparación al tiempo de transformación natural, es decir, su proceso de formación puede tardar millones de años y su explotación da lugar al desaparecimiento de la fuente (Significados, s.f.).

Los recursos no renovables, en este sentido, no posibilitan una sustentabilidad (Significados, s.f.) ambiental adecuada, ya que son generadores de gases contaminantes a partir del empleo de combustibles fósiles y fisión nuclear, obteniendo gases nocivos como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de azufre (SO_2) (Gil, 2016), entre otros, causando “Una serie de graves cambios ambientales y cuya concentración en la atmósfera y la contaminación provocan la formación de lluvia ácida, smog fotoquímico, aumento del efecto invernadero del planeta y concentraciones eminentes de ozono troposférico” (escuelapedia, s.f.).

De manera adicional generan residuos nucleares radiactivos, los cuales, al ser emisores de rayos alfa, beta y gamma crean una alteración de la línea ambiental por el aumento

en la temperatura global, dando paso a la destrucción de ecosistemas naturales; por otro lado, al ser fuentes de energía finita crea una dependencia económica global en relación a países que pueden, en cualquier momento, cambiar sus políticas de la venta y producción de dichos recursos (Schmidt, 2016).

Además, como su nombre lo indica, no son renovables y se agotaran creando graves problemas si no existen otras fuentes alternas

Siendo conscientes del detrimento que han sufrido las condiciones ambientales, es importante y necesario implementar nuevas fuentes de energía amigables con el medio ambiente, que generen menos impacto ambiental y puedan servir para cubrir las demandas de la población mundial.

Los recursos renovables pueden regenerarse naturalmente a velocidades superiores que las de consumo, lo que significa en este sentido, una alternativa sostenible para el suministro de energía en el planeta (Significados, s.f.), siendo el sol, viento, agua (siempre y cuando se cuiden sus fuentes), energía geotérmica y los biocombustibles opciones de energía versátil, eficiente y potencial.

Lograr una sustentabilidad económica y ambiental requiere que el proceso de producción de biocombustibles no sólo sea renovable, sino que también contribuya al secuestro de CO₂ atmosférico, por ésta razón planteo el uso de microorganismos biológicos altamente eficientes (microalgas), ya que por cada 100 Ton de microalgas producidas, son consumidas 183 Ton de CO₂ (Álex Armando Sáez Vega, 2017).

Las microalgas son organismos fotosintéticos con una estructura simple lo que permite el rápido crecimiento celular (Li y Huang, 2009) (J. R. Benavente-Valdés, 2012) encargados de transformar la energía solar en energía química, siendo “base de la cadena alimenticia de más del 70% de la biomasa (García, s.f.)(materia orgánica obtenida de este proceso biológico, susceptible de ser transformada en energía útil) mundial bajo una amplia variedad de condiciones medioambientales, a una velocidad de crecimiento mayor que cualquier otra fuente vegetal alternativa” (García, s.f.).

El proceso de fotosíntesis tiene una eficiencia entre 4 - 8% (García, s.f.), frente a la de otros organismos que alcanzan un 2% (García, s.f.), contribuyendo de manera importante a la fijación de CO₂, colaborando en el control del efecto invernadero, lluvia ácida, entre otras consecuencias del uso de combustibles fósiles (García, s.f.); su tasa reproductiva es muy eficiente, duplicando la producción de biomasa cada 8 horas aproximadamente, 30 y 100 veces más, en promedio, respecto a la obtenida con otras materias primas vegetales (García, s.f.) lo que representa una oportunidad en producción de biocombustibles, tales como el biodiesel, bioetanol y biohidrógeno, y metabolitos secundarios con aplicación en la industria farmacéutica, acuicultura, cosmetológica (Olguín, s.f.).

A diferencia de las fuentes de energía usadas en la actualidad, las microalgas son de los pocos bionergéticos con un valor negativo en emisiones de gases contaminantes, es decir, no se produce CO₂ durante el ciclo de vida de producción.

Las microalgas son fácilmente obtenidas bajo cultivos con “condiciones controladas, pudiendo cultivarse en todas las épocas del año, no requieren áreas de gran tamaño para su producción, se estima que la producción de biodiésel a partir de microalgas se encuentra en el rango de 58700- 136900 litros por hectárea” (García, s.f.).

El reconocer los diferentes beneficios ofrecidos por las microalgas representa la posibilidad de incursionar en éste campo biológico, con el fin de aumentar su índice de crecimiento y producción de biomasa.

Reconocer las microalgas como fuente potencial de energía renovable incita la exploración en campos biológico encargados de analizar e investigar dichos organismos y sus sistemas de cultivo para aumentar su índice de crecimiento y la producción de biomasa.

“En la producción de organismos fotoautótrofos existen 2 diseños básicos (Borowitzka 1999, Contreras-Flores et al. 2003, Tredici 2004): cultivos abiertos, donde la biomasa está expuesta a las condiciones medioambientales; y cerrados, denominados fotobiorreactores o PBR (por sus siglas en inglés), con poco o ningún contacto con el medio externo” (Gil, 2016), a su vez permite un importante control de los parámetros (Martínez 2008, Posten 2009).

“Los diseños en fotobiorreactores son variados (Rawat et al. 2011): reactores planos o en placas agitados mediante burbujeo; reactores tubulares” (Gil, 2016), “verticales u horizontales con agitación por burbujeo u otro; y reactores anulares, una variante de los reactores tubulares con una fuente lumínica interna” (Gil, 2016)

“Los avances tecnológicos en el diseño de estos sistemas han permitido mejorar notablemente la densidad celular, la productividad y por ende la economía de los cultivos para distintos fines”. (J. R. Benavente-Valdés, 2012) (Flores, 2003) [2]

“Diferentes factores de cultivo influyen en el crecimiento de las microalgas y en la producción de metabolitos (luz, temperatura, pH, nutrimentos, transferencia gaseosa, turbulencia y mezclado), así como también los principales aspectos para el diseño de fotobiorreactores”. (J. R. Benavente-Valdés, 2012)

Existen ciertos parámetros fisicoquímicos a tener en cuenta:

Control y monitoreo de Ph, el cultivo es influenciado por dos fenómenos suministrados, CO₂ y radiación lumínica; el exceso en la contribución de ácido carbónico genera la disminución del ph, mientras que la radiación lumínica inestable genera un aumento gradual, afectando la polaridad de los compuestos del medio de cultivo y a su vez la disponibilidad de nutrientes, “el rango de pH para la mayoría de los cultivos de microalgas está entre 7 y 9, con un rango óptimo de 8.2 a 8.7” (J. R. Benavente-Valdés, 2012) [3]

Control y monitoreo de turbulencia y mezclado, se debe generar “con el fin de producir una dispersión uniforme de las microalgas en el medio de cultivo, eliminando así los gradientes de concentración de luz, nutrimentos (entre ellos CO₂) y temperatura” (J. R. Benavente-Valdés, 2012). Una agitación mecánica en exceso genera daño celular causado por el esfuerzo de corte, mientras que la agitación insuficiente provocará sedimentación y muerte celular (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

Control y monitoreo de temperatura, Los sistemas fotosintéticos siempre generan calor a causa del proceso de conversión de energía luminosa a energía química (Gil, 2016), “temperaturas menores a 16 °C disminuyen el crecimiento del cultivo, mientras que una temperatura mayor a los 35 °C resulta ser letal, temperatura óptima para el cultivo de microalgas se encuentra generalmente entre los 20 y 24 °C, no obstante, estas pueden variar dependiendo del medio de cultivo, la especie y la cepa utilizada” (J. R. BenaventeValdés, 2012). [4]

Control y monitoreo de iluminación, la “disponibilidad de luz determina la velocidad específica a la que se realiza la fotosíntesis y, como consecuencia, determina también la tasa específica de crecimiento. Sin embargo, en todos los sistemas de cultivo, las células más cercanas a la superficie iluminada impiden la penetración de la luz hacia el seno del medio de cultivo y producen un efecto de sombreado sobre las células más alejadas de la superficie” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

“Debido a que el medio de cultivo está en constante movimiento, las células solo son expuestas por breves instantes a la luz en ciclos que pueden durar desde milisegundos a unas cuantas décimas de segundo. En condiciones reales el factor que determina la actividad fotosintética es la cantidad de energía disponible para cada célula individual, más que la cantidad de energía luminosa incidente” (Lu y Vonshak, 1999; Fernández y col., 2010) (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

“Los parámetros que pueden considerarse básicos para describir la disponibilidad de energía bajo una iluminación intermitente son dos, la relación de los periodos

luz/oscuridad (L/O) y la frecuencia de los ciclos L/O. Estos establecen en gran medida el régimen de iluminación, el cual es un indicador de la disponibilidad de luz para una célula individual” (Fernández y col., 2002) (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

“Para que la luz artificial sea de utilidad en el proceso fotosintético de las microalgas, los fotones generados deben encontrarse a una longitud de onda de entre los 600 y 700 nm. Al comparar distintas fuentes de luz artificial, incluyendo luz fría fluorescente, lámparas incandescentes, halógenas, AllnGap II (fosfuro de indio, galio y aluminio, con una longitud de onda de 643 nm) y diodos emisores de luz (light emitting diodes, LED), se encontró que el LED del tipo AllnGap II son la fuente de luz más eficiente y económica para el crecimiento de microalgas” (Kommareddy y Anderson, 2003) (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

“El crecimiento de las algas en un fotobiorreactor reduce el riesgo de contaminación, mejora la reproducibilidad de las condiciones de cultivo, brinda un mayor control de las condiciones hidrodinámicas y temperatura, además de permitir un diseño técnico apropiado” (Singh y Sharma, 2012) (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

Pero, también existen parámetros críticos que afectan al diseño de los fotobiorreactores:

- × El ensuciamiento de las superficies transparentes debido a bacterias y otros organismos (entre ellos, las propias microalgas) representa un riesgo, ya que se puede contaminar el medio de cultivo, alterando las microalgas.

- × Presentan dificultad para ser esterilizados, lo que limita la capacidad de reutilización.
- × Tanto la implementación de una infraestructura adecuada (aspectos tecnológicos) como la creación de fotobiorreactores representa un costo elevado
- × Los materiales para la elaboración de un fotobiorreactor deben responder a propiedades resistentes por daño a causa de Ph, capacidad de soportar altas temperaturas y salinidad.
- × La densidad de las microalgas no permite una adecuada penetración de las rutas lumínicas, generando sombra en el interior del fotobiorreactor.
- × Al estar las microalgas expuestas por un tiempo prolongado a la luz, se genera un estado de inhibición, alterando el proceso fotosintético.
- × El sistema de mezclado es inadecuado, dando lugar a un aumento del ensuciamiento y la concentración de oxígeno.
- × No cuenta con un sistema de monitoreo constante que permita saber el Ph, por lo que la alteración causa envejecimiento del cultivo.
- × Se genera un aumento de temperatura a causa de la luz artificial

El tener conocimiento de las deficiencias y problemáticas presentadas en los sistemas de microcultivo actuales permite incursionar en procesos biológicos naturales e intervenir formal y estructuralmente desde el diseño, con el fin de crear un fotobiorreactor,

vinculando conceptos en relación a lógica matemática (número de oro) y geometría sagrada, los cuales responden a parámetros lógicos, lo que permite establecer la forma perfecta.

En “la geometría el 6 transmite sentido de perfección, siendo el número creador por excelencia, el polígono de 6 lados se denomina hexágono y la longitud de los lados coincide de forma exacta con el radio del círculo que se traza alrededor de él” (Mercedes, 2017), según el matemático M. Schneider relaciona estructura, función y orden, irradiando con sus seis lados sentido de perfección, por esto el hexágono responde a normativas formales y estructurales en el diseño del fotobiorreactor.

Desde el componente tecnológico se generarán estímulos fotosintéticos a partir del uso de diodos led, que distribuidos en un área hexagonal y respondiendo al concepto filosófico de “Rizoma” desarrollado por *Gilles Deleuze* y *Félix Guattari* abarcará todo el área del fotobiorreactor y por medio de un teselado (concepto desarrollado por Escher) que respondiendo a lógicas matemáticas del número de oro, genera mediante procesos industriales una tensión superficial en el material, que permita aumentar los niveles de dispersión y proyección fótica, con el fin de estimular y ayudar en el proceso fotosintético de las microalgas.

JUSTIFICACIÓN

Este Proyecto de investigación se enfocará en el desarrollo de un sistema de cultivo de microalgas, el cual a partir de una exploración formal, creación de interfaz lumínica y control y monitoreo de PH, temperatura y radiación, se garantice y estimule el estado y comportamiento de las microalgas, con el fin de generar un aumento significativo en niveles de crecimiento y producción de biomasa, a que debido al aumento actual en el uso de energías no renovables se han presentado problemáticas ambientales que ponen en peligro la presentación de ecosistemas.

Por tal motivo se quiere generar una solución desde la implementación de energías renovables, que mitiguen y contribuyan a solventar problemas ambientales ya presentes.

OBJETIVOS

General

- ✓ Desarrollar un fbr (fotobiorreactor) que permita un aumento en el crecimiento de microalgas y producción de biomasa (materia orgánica que posteriormente puede ser transformada en energía útil) por medio de un sistema de cultivo que maneje parámetros perfectos a nivel formal, basado en conceptos de geometría sagrada (hexágono), lógica matemática (proporción aurea y numero de oro) y Biomímesis.

Específicos

- ✓ Intervenir desde el Diseño Industrial los fotobiorreactores convencionales, con el fin de estimular, aumentar y evaluar variables de comportamiento en relación a la tasa de crecimiento, obtención de biomasa de microalgas y porcentaje de lípidos.
- ✓ Construir una interfaz lumínica a partir de una distribución de diodos led (lightemitting diode) que responda al concepto filosófico de “Rizoma”, aumentando el nivel de dispersión y propagación de fotones lumínicos en el material tratado del fotobiorreactor.

- ✓ Generar un sistema de programación, que por medio de fotoperiodos (12 h Luz/ 12 h Oscuridad) estimule las microalgas y permita un estado óptimo para su crecimiento y producción de biomasa.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

- ✓ Se evidencia la intervención de procesos biológicos en el cultivo de microalgas, desde áreas poco convencionales (Diseño Industrial) permitiendo un aumento en el crecimiento y producción de biomasa.
- ✓ Se brinda, desde el diseño, una solución a problemáticas presentes, en relación a infraestructura, manipulación, resiliencia, cuidado y producción en los fotobiorreactores convencionales.
- ✓ Se estimula fotosintéticamente la microalga *Scenedesmus*, a partir de una secuencia de luces (interfaz lumínica) que responde a una organización rizomática basada en patrones formales.
- ✓ Se Impulsa el cultivo y producción de microalgas con el fin de solventar problemáticas ambientales presentes actualmente a causa del uso de energías no renovables.
- ✓ Se evidencia un aporte y una contribución desde el Diseño Industrial para la mitigación de problemáticas ambientales a partir del uso de microorganismos.

MARCO TEÓRICO

En la actualidad, la tendencia mundial se enfoca en el consumo energético, proveyendo energía a partir de recursos naturales contenidos en combustibles crudos, energía solar, eólica, geotérmica y otras formas, que constituyen una entrada al sistema; en su mayoría no son directamente utilizables, sino que han de ser transformadas, física o químicamente, para su uso final (Twenergy, 2012).

Fuentes de energía

Existen diferentes fuentes de energía disponible en la naturaleza, antes de ser convertida o transformada (Twenergy, 2012) [5] y la cual se clasifica en dos grupos:

“Energías no renovables, también conocidos como recursos agotables, son aquellos que existen en cantidades limitadas en la naturaleza. Algunos ejemplos de los recursos no renovables son el petróleo, los minerales, los metales, el gas natural, así como otros

productos derivados de los combustibles fósiles, como la gasolina o el diésel [6], estos recursos no pueden ser regenerados o producidos a velocidad superior que la de su consumo, debido a que la naturaleza no los puede regenerar tan rápido como su alta demanda por el ser humano, en este sentido, no posibilitan su sustentabilidad” (Significados, s.f.) [7].

Energías renovables que “puede regenerarse naturalmente a velocidades superiores a las de su consumo por parte del ser humano, en este sentido, pueden considerarse como recursos renovables la radiación del Sol, el viento o el movimiento de las aguas, pues son recursos sobre los que no pesa, de momento, el riesgo de agotarse a corto plazo” (Significados, s.f.) [8], siendo alternativas sostenibles para el suministro de energía en el planeta (Significados, s.f.).

“La mayoría de las veces estos recursos no son directamente utilizables, sino que han de ser transformados, física o químicamente, para su uso final. La energía disponible en la naturaleza, antes de ser convertida o transformada, es lo que se denomina” (Twenergy, 2012) “energía primaria” [9], y la energía secundaria se da a partir de procesos de transformación y aprovechamiento de la energía primaria convirtiéndola en energía útil, obteniendo finalmente energía eléctrica para el consumo humano.

“Inicialmente tiene lugar la producción de energía primaria, considerando su extracción o captación del recurso del medio. Posteriormente, convertiremos esta energía a secundaria, la cual será transportada, almacenada y transformada hasta poder ser utilizable en puntos de consumo tales como hogares, industrias, etc. El proceso de

transformación de la energía primaria en secundaria conlleva además un sobrecoste económico, los denominados costes de transformación de la electricidad” (Twenergy, 2012).

Entre las principales fuentes de energía usadas a nivel mundial se encuentran, el petróleo, gas natural, carbón, energía nuclear e hidroeléctrica y finalmente las energías renovables.

A partir del año 2012, de acuerdo con el Foro Económico Mundial se presentó un aumento en el consumo energético, debido sobre todo a los países emergentes, cuyo desarrollo se funda sobre todo en la energía. [10]

Los mayores consumidores de energía en el mundo están consumiendo cada vez más. De acuerdo con el informe del WEF, el consumo de energía de países como China, India, Japón, Rusia y Estados Unidos rebasa por mucho el consumo de las 20 naciones con la mejor arquitectura energética. Entre los países de mayor consumo, China se encuentra a la zaga de las demás potencias mundiales, debido a un consumo intenso de la energía y a las altas emisiones de CO₂ que despide su industria. [11]

El 90% de la energía comercial empleada en el mundo es resultado de energías no renovables, siendo los combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural los grandes protagonistas del impulso industrial (Fuentes de energía no renovables, s.f.) [12]

Consumo de energía primaria en el mundo

“El boletín estadístico de 2014 indica que, aunque las tendencias están cambiando significativamente, las fuentes de energía primaria no renovables todavía son las más utilizadas. Así, el año pasado se utilizaron 50.740 ktep de petróleo, 23.664 ktep de gas natural, alrededor de 15.000 ktep de energía nuclear y casi 12.000 ktep de carbón. En cambio, el consumo total de energía procedente de fuentes renovables no suma los 18.000 ktep” (Twenergy, 2012). [13]

Según el último informe del año 2015 obtenido por BP Statistical Review of World Energy el consumo energético mundial sufrió una aceleración del 1% respecto al año 1992. evidenciando un alza en el uso de energías no renovables como el “petróleo (32,9%), carbón (29,2%), gas natural (23,8%), energía hidroeléctrica (6,8%), nuclear (4,4%) y renovables (2,8%). Es destacable el crecimiento del consumo de energías renovables (eólica, solar y biocombustibles) en 2015 que experimentó un incremento del 15,2% respecto al año anterior”. (BP Statistical Review of World Energy 2016, 2016)[14]

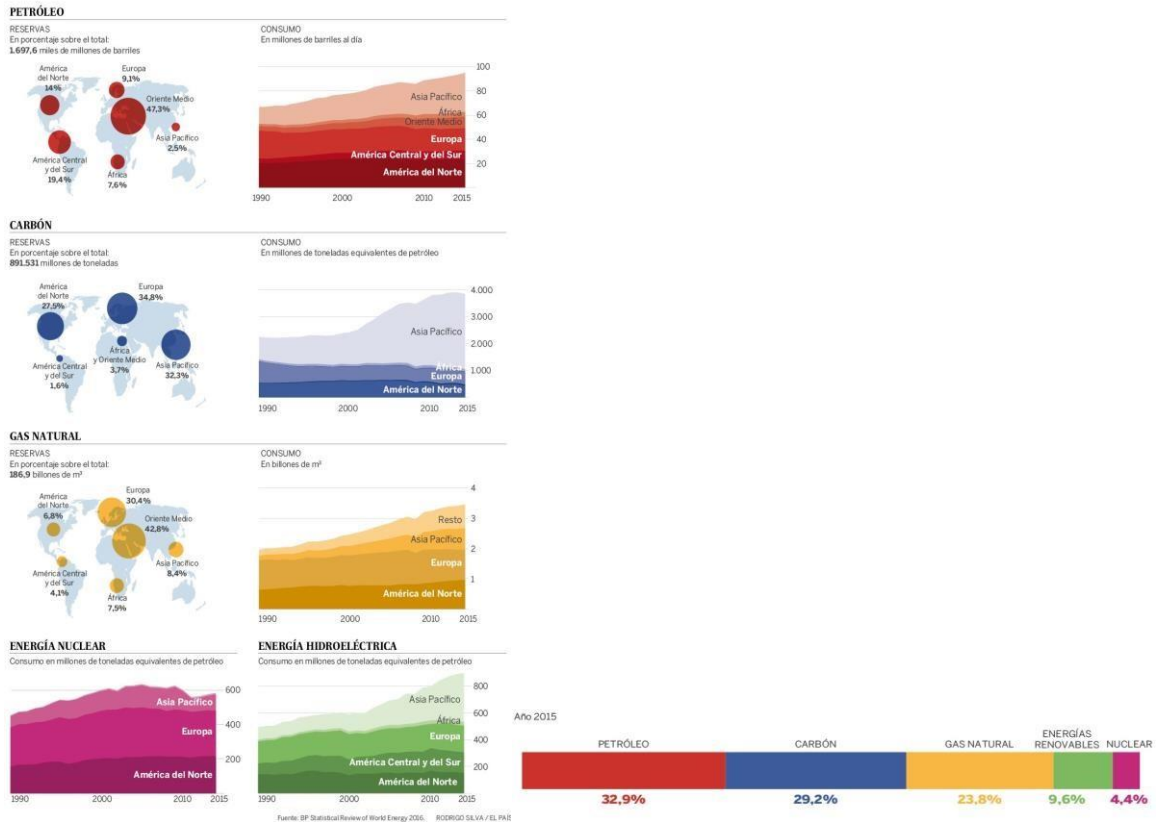


Figura 1. Consumo de energía primaria en el mundo

Las implementaciones de sistemas de energía no renovable siguen en crecimiento, poniendo en amenaza la conservación del medio ambiente afectando de forma directa e irreversible.

Problemáticas generadas por el uso de energía no renovable

× Emisión de gases contaminantes

“La combustión de los combustibles fósiles y la fisión nuclear generan gases nocivos para la vida en la Tierra. Estos gases son Dióxido de carbono, Monóxido de carbono y

Monóxido de nitrógeno, entre otros, y dan lugar al Efecto invernadero” (Protección del medio ambiente, s.f.).

“Los productos de desechos gaseosos expulsados en las refinerías ocasionan la alteración, no sólo de la atmósfera, sino también de las aguas, tierra, vegetación, aves y otros animales. Uno de los contaminantes gaseosos más nocivo es el dióxido de azufre” (Protección del medio ambiente, s.f.).

× Generación de efecto invernadero

Fenómeno por el cual determinados gases, que son componentes de la atmósfera terrestre, retienen parte de la energía que la superficie planetaria emite por haber sido calentada por la radiación solar.

El efecto invernadero se produce gracias a un fenómeno atmosférico natural que permite mantener una temperatura agradable en el planeta, al retener parte de la energía que proviene del sol. El aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) proveniente del uso de combustibles fósiles ha provocado la intensificación del fenómeno invernadero. Las consecuencias del efecto invernadero son:

El deshielo de los casquetes polares lo que provocaría el aumento del nivel del mar. Las temperaturas regionales y los regímenes de lluvia también sufren alteraciones, lo que afecta negativamente a la agricultura (Protección del medio ambiente, s.f.).

Aumento de la desertificación.

Cambios en las estaciones, lo que afectará a la migración de las aves, a la reproducción de los seres vivos etc.

× Presencia de Residuos radiactivos

“Los residuos nucleares, cuyo aspecto es igual al del combustible nuevo, emiten radiación alfa, beta y gamma, además de generar calor como consecuencia de la desintegración radiactiva. Además, contienen diferentes sustancias que desarrollan su radiactividad independientemente, lo que dificulta el tratamiento de los residuos; por ejemplo, aunque el principal elemento sea el uranio (95% de los residuos), son los productos de fisión del combustible (2% de los residuos) los que mantienen mayor actividad durante los primeros 150-200 años. Entre estos residuos se encuentran también el plutonio 240, que tiene un período de semidesintegración de aproximadamente 6600 años; y el neptunio 237, con un período de 2.130.000 años” (Protección del medio ambiente, s.f.).

× Destrucción de espacios naturales

Un espacio natural es ante todo una fuente de vida, presente y futura. Cuando este sufre un impacto ambiental los seres que allí viven sufren las consecuencias (Protección del medio ambiente, s.f.).

× Escasez y agotamiento de los recursos

Tantos los combustibles fósiles como los nucleares son limitados y su mera utilización hace que disminuya su número (Protección del medio ambiente, s.f.).

× Dependencia económica

En relación a países que pueden, en cualquier momento, cambiar sus políticas para la venta y producción de petróleo (Schmidt, 2016).

Es preocupante y cuestionable el saber que independiente de las problemáticas ya mencionadas, se continúan implementando energías limitantes, no eficientes en su totalidad, cerrándose a la oportunidad de incursionar en otras áreas que pueden generar mayores niveles de utilidad, como lo son las energías renovables que representan mayores beneficios ambientales, estos son:

Son más respetuosas con el medio ambiente, no contaminan y representan la alternativa de energía más limpia hasta el momento (Erenovable, 2015).

“Son fáciles de desmantelar y no requieren custodiar sus residuos durante millones de años, como ocurre por ejemplo con las energías nucleares.

Hace que la región sea más autónoma, ya que desarrolla en la misma región donde se instala, la industria y la económica.

Son energías seguras ya que no contaminan, ni tampoco suponen un riesgo para la salud, y sus residuos además no crean ningún tipo de amenaza para nadie.

Se trata de energías de fuentes que son inagotables, como el sol o el agua, y además sus distintos orígenes permiten su aplicación en todo tipo de escenarios” (Rojas, 2014).

[16]

Existe una reducción frente a la dependencia energética, lo que implica una ventaja diferencial para las economías locales y una iniciativa para la independencia energética

Para lograr una sustentabilidad económica y ambiental, se requiere que el proceso de producción de biocombustibles no sólo sea renovable, sino que también contribuya al secuestro de CO₂ atmosférico (Olguín, s.f.), es por esta razón que planteo el uso de organismos biológicos como las microalgas, como una alternativa de energía, más limpia y natural.

MICROALGAS

“Las microalgas son organismos unicelulares que forman parte del fitoplancton marino. Se encuentran flotando tanto en aguas saladas como dulces, cerca de la superficie del agua donde hay abundancia de luz solar. Su importancia para el mantenimiento de la vida y la salud del planeta Tierra es esencial, ya que a través de la fotosíntesis nos proporcionan gran parte del oxígeno que necesitamos para respirar.

El fitoplancton y las microalgas que lo componen, son el primer eslabón de la cadena trófica en el medio acuático y desempeñan un papel vital en la estabilidad del ecosistema marino. Son además esenciales para indicarnos la salud de las aguas y del medio ambiente. Un cambio en la temperatura o en el pH del agua, o el aumento de la contaminación, todo ello puede afectar dramáticamente al fitoplancton marino y darnos la voz de alarma.

Como organismos unicelulares que son, tienen una capacidad de crecimiento y de generación de biomasa mucho mayor que las plantas superiores, ya que no necesitan arraigar o generar estructuras reproductoras, lo que les permite multiplicarse en cuestión

de horas. Su mecanismo es fascinante, capaces de generar biomasa a partir de CO₂ y luz (consumen hasta 2 Kg. de CO por Kg. de biomasa producida)” (Palma., 2016). [17]

Las microalgas son una fuente de múltiples beneficios para el hombre, extendiéndose su aplicación tanto a la alimentación funcional, la agricultura, la acuicultura, farmacología y la cosmética, entre otros. Asimismo, cada vez más estudios apuntan a que las microalgas pueden generar energía limpia y biocombustibles de segunda generación, contribuyendo con ello al desarrollo sostenible de la economía. [18]

Tienen importancia ecológica y económica debido a su gran diversidad taxonómica. Para su desarrollo requieren de CO₂, nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y otros nutrientes menores como metales, los cuales son esenciales porque actúan como cofactor de enzimas esenciales de su metabolismo (SIJONA, 2014) [19]

Las microalgas se clasifican por reino, división, clase, orden, familia, género y especie (Sevilla, 2014).

Beneficios del cultivo de microalgas

Como organismos unicelulares que son, “tienen una capacidad de crecimiento y de generación de biomasa mucho mayor que las plantas superiores, ya que no necesitan arraigar o generar estructuras reproductoras, lo que les permite duplicarse en cuestión de horas.

Las microalgas tienen una composición bioquímica compleja debida a la presencia del aparato fotosintético, que le da una gran riqueza en pigmentos y componentes como citocromos y ácidos poliinsaturados de cadena larga (PUFAs). Esto resulta en un elevado contenido en productos de alto valor, como los carotenoides luteína y astaxantina o los PUFAs DHA y EPA” (Sevilla, 2014). [20]

Es importante resaltar el potencial de estos organismos al ser excelentes captadores de CO₂. Por cada 100 ton de microalgas producidas, se consumen 183 ton de CO₂. [21]

Las microalgas cuenta con características en cuanto a "plasticidad metabólica", ya que “son capaces de ajustar su composición bioquímica a las condiciones de cultivo. Bajos niveles de N inducen la acumulación de grasas. Elevados niveles de luz aumentan la acumulación de algunos carotenoides y la adición de amonio incrementa el contenido en ficobiliproteínas en *Spirulina platensis*”. [22]

Se encuentran formando parte del plancton en los océanos, estimándose que el 90% de la fotosíntesis total de la Tierra es realizada por estos vegetales (SIJONA, 2014). [23]

Contribuyen de manera importante a la fijación de CO₂, colaborando en el control del efecto invernadero, lluvia ácida, entre otras consecuencias del uso de combustibles fósiles (García, s.f.) y a su vez son utilizadas en la producción de biocombustibles, tales como el biodiesel, bioetanol y biohidrógeno, y metabolitos secundarios con aplicación en la industria farmacéutica, acuicultura, cosmetológica.

A diferencia de las fuentes de energía usadas en la actualidad, las microalgas son de las pocas bioenergéticas con un valor negativo. Es decir, no se produce CO₂ durante el ciclo de vida de producción (Olguín, s.f.). [24]

“Se obtienen altos niveles de producción en condiciones controladas, pudiendo cultivarse en todas las épocas del año de forma” (García, s.f.)continua

“El proceso de fotosíntesis tiene una eficiencia entre 4-8%, frente a la de otros organismos que alcanzan un 2%” (García, s.f.). [25]

“Tiene una baja demanda de energía y agua para su producción ya que no requiere suelo fértil ni agua de calidad, pudiendo emplear incluso aguas residuales, suelos salinos o cultivarse en zonas áridas” (García, s.f.)

Por cada 9 toneladas de CO₂ que absorben las microalgas, éstas son capaces de generar una tonelada de biocombustible (Ingenieros.es, 2012). [26]

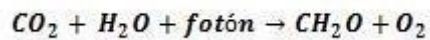
“Las microalgas ofrecen el gran atractivo de producir biomasa susceptible de ser convertida en combustibles como metano, etanol, biodiesel, bioqueroseno o hidrógeno además de otros bioproductos de amplia utilización en el sector farmacéutico y cosmético” (betacarotenos, omega-3, etc.) (Interempresas, 2010). [27]

Fotosíntesis en Microalgas

La fotosíntesis es un proceso que transforma la energía de la luz del sol en energía química, consiste, básicamente, en la elaboración de azúcares a partir de CO₂ (dióxido de carbono) minerales y agua con la ayuda de la luz solar (Botanical, s.f.). [28]

“La fotosíntesis es el proceso más importante en el metabolismo de las microalgas. Estas utilizan la energía solar para metabolizar el dióxido de carbono (CO₂) a metanol (CH₂O) liberando oxígeno molecular (O₂). Las moléculas de CH₂O constituyen los bloques responsables de la formación de moléculas de glucosa en las microalgas. La Ecuación 1 describe el proceso universal de la fotosíntesis” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

Ecuación 1



En este proceso de fotosíntesis el CO₂ se metaboliza a compuestos orgánicos como azúcares utilizando la energía solar. La Ecuación 2 representa este proceso de manera general (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

Ecuación 2



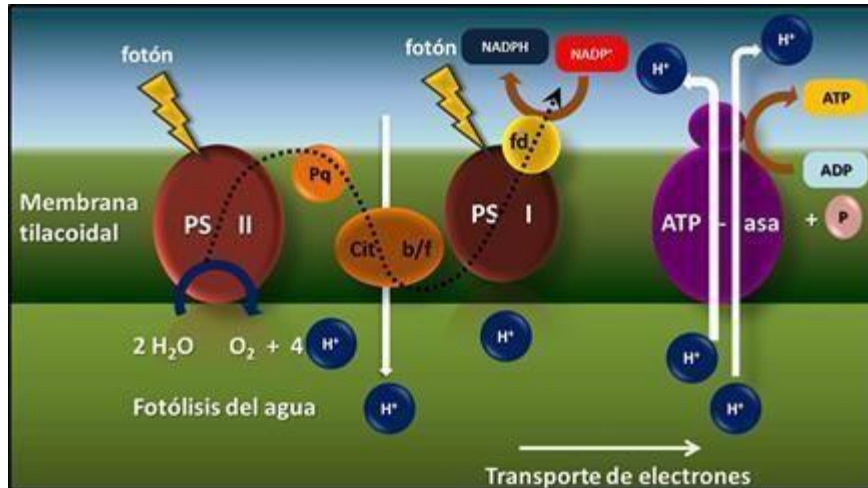


Figura 2. Diagrama esquemático de la fotosíntesis (Martín, 2010)

- ✓ La luz es primeramente absorbida por la antena de pigmentos del fotosistema (PS) I y II.
- ✓ La energía absorbida es transferida al centro de reacción de clorofilas: P680 en el fotosistema II y P700 en el fotosistema I.
- ✓ La absorción de un fotón de luz por el fotosistema II remueve un electrón del P680. Con la carga positiva resultante, el P680 es lo suficientemente electronegativo para remover un electrón de una molécula de agua. Cuando estos pasos ocurren cuatro veces, requieren de dos moléculas de agua, una molécula de oxígeno y cuatro protones (H+) los cuales son liberados.
- ✓ Los electrones son transferidos a través de la plastoquinona al complejo citocromo b6/f, donde se proporciona la energía para la quimiosíntesis.
- ✓ La activación del P700 en el fotosistema I permite recoger los electrones del complejo citocromo b6/f elevándolo a un alto potencial redox que, después de

pasar por la ferredoxina, es capaz de reducir el NADP⁺ a NADPH produciendo energía (Martin, 2010) (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN MICROALGAS

Desde el departamento de Bioenergía consideran que la biomasa algal es una buena candidata como materia prima, ya que se integra fácilmente en los actuales sistemas energéticos y es un recurso renovable. [29]

La biomasa es una fuente de energía renovable con más futuro a corto plazo. Se trata de la materia orgánica, tanto de origen vegetal como animal, que puede aprovecharse con fines energéticos (Twenergy, 2012). [30]

“Las microalgas ofrecen el gran atractivo de producir biomasa susceptible de ser convertida en combustibles como metano, etanol, biodiesel, bioqueroseno o hidrógeno además de otros bioproductos de amplia utilización en el sector farmacéutico y cosmético (betacarotenos, omega-3, etc.). Las productividades que pueden obtenerse por hectárea dependen del lugar, la especie de alga y la técnica de cultivo, pero existen diferentes métodos de cultivo masivo mediante el uso de grandes cultivos en baterías de fotobiorreactores o en estanques abiertos de escasa profundidad, donde podrían alcanzarse productividades hasta 100 toneladas de biomasa por hectárea y año, muy superiores a los cultivos de biomasa tradicional en medio terrestre” (Botanical, s.f.). [31]

La “biomasa cruda y procesada puede producir combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, y puede ser convertida en calor o electricidad (Best, s.f.).

El dióxido de carbono por sí solo es responsable del 50% de los gases del efecto invernadero que contribuye a las predicciones de calentamiento global. Los escenarios sin intervención de políticas para reducir las emisiones de dióxido de carbono en el futuro, especialmente para reducir el uso de petróleo y carbón en el sector de energía, indican un aumento en el calentamiento global y la lluvia ácida.

Las tasas futuras de emisiones de dióxido de carbono estarán gobernadas por políticas y las economías de las estrategias de reducción. El estímulo para aplicar medidas de conservación energética y para promover el uso de combustibles fósiles menos contaminantes y las energías renovables pueden en conjunto originar una reducción substancial en las emisiones de dióxido de carbono y, por lo tanto, ayudar a evitar los cambios climáticos globales pronosticados” (Best, s.f.).

“La biomasa de rápido crecimiento y altamente productiva, con un balance energético favorable, puede tener efecto neto cero sobre las emisiones de dióxido de carbono y es mucho más efectiva en términos de compensación de carbono que los bosques ya establecidos. Cultivar esa biomasa en forma sostenida y usarla en conjunto con residuos agrícolas como medio para el desarrollo lleva a un efecto más duradero para aminorar los gases del efecto invernadero y de contaminación transfronterera. Su conversión eficiente evitará asimismo las emisiones de dióxido de carbono resultantes de la quema

de combustibles fósiles y es económicamente atractiva en muchas circunstancias” (Best, s.f.). [32]

Beneficios uso de biomasa

- ✓ La productividad de biomasa se sitúa entre 30 y 100 veces, en promedio, respecto a la obtenida con otras materias primas vegetales (García, s.f.).
- ✓ Supera en la producción de aceites a otros recursos vegetales empleado.
- ✓ La “reproducción es muy rápida, duplicando la producción cada 8 horas aproximadamente, produciendo entre 15 y 300 veces más aceite para la obtención de biodiesel que los cultivos tradicionales en función de la superficie. Como puede observarse en la siguiente gráfica mucho mayor a otros tipos de materias primas” (García, s.f.). [33]

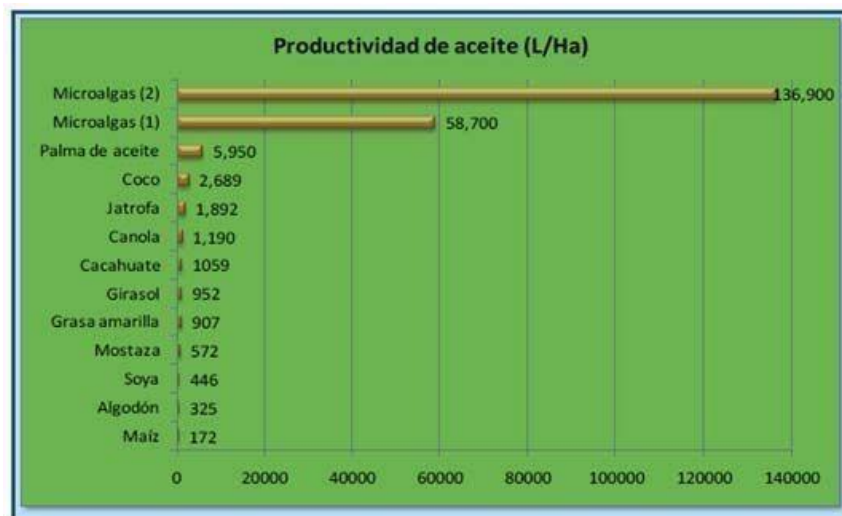


Figura 3. Rendimiento de la productividad de aceite en función de la superficie para diferentes cultivos

- ✓ Son capaces de producir una reserva de lípidos de hasta el 70% de su masa.

- ✓ Sus reservas de biomasa son de fácil acceso al reproducirse de forma exponencial y cultivarse en numerosos medios.
- ✓ La mayoría de las energías renovables sólo proporcionan calor o electricidad, en cambio a través de la biomasa se puede obtener una gran variedad de combustibles que satisfagan todas las necesidades energéticas (García, s.f.).
[34]
- ✓ Se generan “menos emisiones de azufre y partículas y emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX. En un momento como el actual, en el que más del 80% de nuestro abastecimiento energético proviene de energías fósiles, otro 13% de energía nuclear y únicamente el 6% de las energías renovables, este tipo de fuentes energéticas cobran vital importancia” (J. R. Benavente-Valdés, 2012). [35]
- ✓ Para lograr potenciar el desarrollo y productividad de estos organismos, es necesario generar medios de cultivo; el éxito de la producción de biomasa y compuestos químicos por las microalgas dependen de gran forma del diseño de los fotobiorreactores (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

CULTIVO DE MICROALGAS

“Para conseguir un cultivo de microalgas en crecimiento activo es necesario un inóculo viable, un suministro mínimo de nutrientes y micro elementos y adecuadas condiciones químicas y físicas: luz, aireación, temperatura, salinidad y energía” (Cañizares et al., 1994) (Gil, 2016).

“Son varios los factores que afectan a la producción de microalgas. Para su desarrollo requieren de CO₂, nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y otros nutrientes menores como metales, los cuales son esenciales porque actúan como cofactor de enzimas esenciales del metabolismo de las microalgas. Otros factores importantes para la producción son la temperatura, intensidad luminosa, salinidad, nutrientes y pH óptimos, que varían ampliamente de una especie a otra” (Gil, 2016).

“Estos parámetros fisicoquímicos se deben determinar previamente en condiciones de laboratorio, para que nos ayuden a comprender las condiciones óptimas para el desarrollo de las diferentes especies en cultivo” (Gil, 2016).[36]

Parámetros fisicoquímicos

Temperatura: “La mayoría de las especies crecen entre 10 a 35 °C, con una temperatura óptima de 16-24 °C. En el cultivo de microalgas, y en general en el de cualquier microorganismo, hay tres temperaturas a considerar: una temperatura mínima, por debajo de la cual no es posible el crecimiento (aunque depende de cada especie y condiciones de cultivo, aproximadamente 16 °C), una temperatura óptima, entre 16 y 27 °C dependiendo de la microalga, a la que se produce el crecimiento más rápido, y una temperatura máxima, alrededor de 35 °C, por encima de la cual no es posible el crecimiento. Los cultivos de microalgas que crecen por debajo de la temperatura óptima generalmente son más sensibles a la fotoinhibición que aquellos que se mantienen en el

valor ideal. La temperatura de crecimiento también afecta a la composición bioquímica de las células” (Gil, 2016). [37]

Aireación / mezclado: “Factor importante para la homogeneización de los nutrientes y evitar la sedimentación de las microalgas. Un adecuado mezclado favorece una distribución homogénea de las células, de los metabolitos, el calor y la transferencia de gases a través de la interface gas-líquido” (Gil, 2016). “pero su función principal es permitir que todas las células puedan acceder a las zonas iluminadas en un fotobiorreactor” (Ogbonna y Tanaka, 2000; Ugwu y col., 2002) (J. R. Benavente-Valdés, 2012). Sin embargo, una agitación excesiva puede causar un estrés hidrodinámico llevando a una disminución en la tasa de crecimiento (Gil, 2016).

“La fragilidad celular es con frecuencia un factor que limita la intensidad de mezclado que puede aplicarse a un cultivo. En virtud de que la fragilidad celular y las características fotosintéticas, entre otros factores, pueden variar de cepa a cepa, los niveles óptimos de mezclado dependerán de cada cepa cultivada” (Contreras-Flores y col., 2003) (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

La tolerancia a la salinidad depende de la especie considerada (de agua dulce o salada) (Gil, 2016).

Inyección del gas: La introducción de CO₂ por medio del burbujeo según “estudios han demostrado que una aireación rica en CO₂ provee este gas en mayor cantidad a las microalgas, lo que desoxigena el medio y evita la fotooxidación. Sin embargo, desde un punto de vista económico, una velocidad de aireación mayor conlleva mayores costos de

producción, por lo cual hace costoso el escalamiento (Zhang y col., 2002). Por otra parte, se ha estudiado la concentración óptima de CO₂ para la producción de microalgas en fotobiorreactores, mostrando que el uso de aire enriquecido con 5 o 10 % (v/v) de CO₂ a una velocidad de 0.025 vvm (volumen de aire por volumen de trabajo por tiempo) es efectivo para el cultivo de biomasa. En reactores de superficie plana (flat panel), una velocidad de aireación de 0.05 vvm ha resultado suficiente para el mejoramiento del mezclado y la transferencia gaseosa” (Sierra y col., 2008) (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

“El *PH* del cultivo está influenciado por varios factores como la productividad algal, la respiración, la alcalinidad y composición iónica del medio de cultivo, la actividad microbiana autotrófica y heterotrófica y la eficiencia del sistema de adición de CO₂ (Martínez 2008, Park et al. 2011a). Como en los otros parámetros, cada especie necesita un rango determinado de pH que permita un crecimiento óptimo (Martínez 2008), siendo pH 8 el más indicado para especies dulceacuícolas (Park et al. 2011a). Por encima o debajo de éste, presentan un descenso en la productividad, que no solo afecta el crecimiento algal, sino también la capacidad de remover el nitrógeno en sistemas de tratamientos de aguas” (Park et al. 2011a). [38]

“La *iluminación* se divide en dos componentes: la irradiación, la cual se refiere al flujo de luz por unidad de área a la cual están expuestas las microalgas, y el fotoperiodo, el cual es el número de horas durante el día en las que las microalgas son sometidas a dicha irradiación. Las microalgas utilizan sólo la luz en el intervalo comprendido entre 300 a

700 nm, región del espectro conocida como la radiación fotosintéticamente activa” (PAR, por sus siglas en inglés) (Gil, 2016). [39]

“Dentro de los requerimientos químicos necesarios para un buen crecimiento de las microalgas en cultivo se encuentran, entre otras cosas, el balance entre los macronutrientes específicos y los micronutrientes. Los nutrientes fundamentales son el carbono, los nitratos y los fosfatos. La disminución de la fuente de nutrientes es un factor limitante en el cultivo, por lo que resulta necesario el control de la calidad nutricional en los cultivos masivos” (Gil, 2016).

“Hay algunas microalgas que, además de macro y micronutrientes, requieren otras sustancias para su desarrollo, como las vitaminas, ya que no son capaces de sintetizar todas las que necesitan y las tienen que asimilar a través del medio. Además, requieren otros elementos en pequeñas cantidades que son esenciales para su crecimiento: manganeso, zinc, cobalto, cadmio, cobre, molibdeno y níquel, los cuales forman parte de enzimas necesarias para el transporte de electrones, la fijación y transporte del CO₂, la transcripción del ADN, la fijación y transporte del nitrógeno, entre otras” (Gil, 2016).

“La tasa de O₂ y CO₂ suministrado al cultivo puede convertirse en un factor limitante. Mejorando la circulación o mediante la adición adecuada de CO₂ o bicarbonato de sodio puede provocarse la prolongación del crecimiento exponencial de las microalgas. El CO₂ y el bicarbonato de sodio afectan al pH del cultivo, el cual debe ser controlado y mantenido en condiciones óptimas. Cada microorganismo crece en un intervalo de pH particular y normalmente existe un pH óptimo bien definido; en el caso de las microalgas

el pH óptimo se encuentra apenas por encima de la neutralidad, por lo que son clasificados como microorganismos neutrófilos” (Gil, 2016).

“Además de los factores fisicoquímicos mencionados anteriormente, otro aspecto a considerar es la relación entre las microalgas con determinadas bacterias. Es difícil producir un cultivo de microalgas libre de bacterias y parece ser que muchas especies de microalgas crecen mejor en asociación con bacterias, siendo este concepto muy importante para utilizar las microalgas como depuradores de determinadas aguas, como aguas residuales, de minería, etc” (Gil, 2016).

“Todos estos factores son los que dirigen el comportamiento de las microalgas tanto en el medio natural como en los sistemas de cultivo” (Gil, 2016). [40]

Como se mencionó anteriormente, existen diversos factores que influyen ampliamente en el cultivo de microalgas y determinan el diseño del sistema de cultivo (J. R. BenaventeValdés, 2012).

Sistema de cultivo: producción microalgas

Se han desarrollado diferentes medios para el cultivo de microalgas (fotobiorreactores).

Los fotobiorreactores (FBRs) son dispositivos destinados al cultivo masivo de microalgas. Para ello, tienen que mantener un medio estable (temperatura, pH, baja

concentración de O₂) y proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento incluyendo la luz.

“El crecimiento de las algas en un fotobiorreactor reduce el riesgo de contaminación, mejora la reproducibilidad de las condiciones de cultivo, brinda un mayor control de las condiciones hidrodinámicas y temperatura, además de permitir un diseño técnico apropiado (Singh y Sharma, 2012). Este diseño puede ser plano o tubular y adoptar una gran variedad de configuraciones y modos de operación, además de ofrecer una mayor productividad y calidad de la biomasa generada. Sin embargo, a pesar de la viabilidad de los FBR, los cuales han estado bajo condiciones de desarrollo durante la década pasada, solo algunos pueden ser utilizados para la producción de biomasa y metabolitos de interés” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

En la producción de organismos fotoautótrofos existen 2 diseños básicos (Borowitzka 1999, Contreras-Flores et al. 2003, Tredici 2004) (Labbé, s.f.)

Los reactores abiertos priman la economía aceptando un control pobre del entorno mientras que los FBR cerrados consiguen unas condiciones estrechamente controladas que permiten a las microalgas crecer a una velocidad óptima a cambio de un mayor coste.

Fotobiorreactores abiertos



En los fotobiorreactores abiertos el cultivo está en contacto con la atmósfera. Son instalaciones que intentan compensar con un bajo coste una baja productividad debida a un control poco estricto o inexistente de condiciones como el pH o la

Figura 4. Fotobiorreactor abierto. temperatura. “Al estar abiertos son susceptibles a la invasión por otros microorganismos incluyendo microalgas, por lo que son especialmente adecuados para especies robustas y de rápido crecimiento.

Sin embargo, pese a estos inconvenientes, la mayoría de las microalgas producidas en el mundo provienen de este tipo de sistemas. Su gran ventaja es que es fácil y económico construirlos en grandes volúmenes incluso de cientos de metros cúbicos.

Existen dos tipos básicos de fotobiorreactores abiertos: "open ponds" que, como su nombre indican son simples receptáculos del tamaño y forma adecuado y los "raceways" que, además son capaces de suministrar agitación y mezcla, facilitar el intercambio de gases e incluso controlar el pH en cierta medida” (Sevilla, 2014). [41]

Fotobiorreactores cerrados

Los fotobiorreactores cerrados se denominan así porque mantienen al cultivo totalmente aislado del medio ambiente exterior. Típicamente están equipados con sistemas de

agitación, aireación, control del pH, intercambio del calor, adición de medio y CO₂ (Sevilla, 2014).

Tipos de fotobiorreactores cerrados

COLUMNAS

Son fotobiorreactores cerrados que consisten en una columna de burbujeo de material transparente de diámetro d y altura H , “son dispositivos sencillos ya que el burbujeo proporciona la mezcla del sistema, la retirada del O₂ y el aporte de CO₂ que se puede mezclar con la corriente de aireación” (Sevilla, 2014).

Dentro de los” fotobiorreactores cerrados, las columnas son fáciles de construir ya que su forma cilíndrica ayuda a distribuir la luz y soporta bien la presión en la base.



Figura 5. Fotobiorreactor de columna.

Se han utilizado columnas con recirculación interna con el objeto de mejorar el flujo y prolongar el contacto de los gases, mejorando así la transferencia de materia” (Sevilla, 2014).

Fotobiorreactor plano

“Los reactores planos son similares a las columnas en su composición: asocian agitación e intercambio de materia en el mismo espacio en el que se capta la luz, pero intentan resolver algunos de los problemas de las columnas.



Figura 6. Fotobiorreactor plano

El paso óptico se puede hacer tan delgado como se quiera.

Es posible escalar el FBR incrementando su longitud, sin modificar la altura de líquido ni el paso óptico.

Pueden construirse de manera muy sencilla y económica: es suficiente un bastidor y un recubrimiento plástico.

Se pueden construir inclinados y es posible orientarlos hacia el sol, para maximizar así la captación de luz y con ello la productividad” (Sevilla, 2014). [42]

Fotobiorreactor tubular

Son los más sofisticados y los más especializados, pero tienen un costo elevado en su construcción. El diseño distingue dos partes:



Figura 7. Fotobiorreactor tubular

Lazo: es la parte en la que se lleva a cabo la captación de la energía solar. Se denomina "lazo" porque es un tubo dispuesto de alguna manera que proporcione una forma compacta, lo que requiere codos y curvas.

El lazo está específicamente diseñado para la captación de la luz, sin tener que preocuparnos por los intercambios de calor o materia, lo que permite optimizar la productividad maximizando la eficiencia fotosintética.

Desgasificador: Parte en la que se lleva a cabo el intercambio de materia, especialmente la desorción de O₂ y los intercambios térmicos a través de cambiadores de calor que se pueden instalar al efecto (J. R. Benavente-Valdés, 2012). [43]

Los diseños buscan la simplicidad y la economía a la vez que intentan un aprovechamiento óptimo del suelo con el objeto de resultar económicos.

El cultivo intensivo de microalgas ha sido posible en gran medida gracias al desarrollo de nuevos diseños de fotobiorreactores como lo expuestos anteriormente, pero estos diseños cuentan con deficiencias que deben ser determinantes para el diseño de un fotobiorreactor (Flores, 2003).

Deficiencias de los fotobiorreactores existentes

- × *Escala (FBR columna):* Existe una dificultad por su gran volumen, ya que al aumentar el diámetro se aumenta muy deprisa la proporción de volumen oscuro, disminuyendo la productividad. Tampoco es posible hacerlas muy altas ya que la presión en la base dificulta el burbujeo y causa estrés hidrodinámico.
- × *Absorción de luz:* Las columnas de burbujeo, por su posición vertical, tampoco son buenas captadoras de luz, especialmente a mediodía, que es precisamente cuando la radiación solar es máxima. Es difícil construir columnas inclinadas ya que pierden muchas de sus ventajas (Sevilla, 2014).
- × *Dimensiones (FBR plano):* En la práctica no es fácil construir FBRs planos demasiado largos por la dificultad que tiene esta geometría para soportar la presión hidrostática. Además, pese a que pueden inclinarse, siguen siendo dispositivos verticales (dependen del burbujeo) y son por lo tanto pobres captadores de luz en muchos momentos del día (J. R. Benavente-Valdés, 2012).
- × El ensuciamiento de las superficies transparentes debido a bacterias y otros organismos (entre ellos, las propias algas) es uno de los mayores problemas operativos de los fotobiorreactores.
- × Como se mencionó anteriormente, existen diversos factores que influyen ampliamente en el cultivo de microalgas y determinan el diseño del reactor a emplear (J. R. Benavente-Valdés, 2012), por esta razón se quiere diseñar un

fotobiorreactor, solucionando las deficiencias de los sistemas ya creados y cumpliendo con los parámetros exigidos para el cultivo de las microalgas

- × La iluminación en los fotobiorreactores es determinante, por lo que es indispensable tenerla en cuenta.

Determinantes en el diseño de un fotobiorreactor

ILUMINACIÓN

“La intensidad de la luz es uno de los factores más importantes para el crecimiento fotosintético de las microalgas. Los sistemas de cultivos de microalgas pueden ser iluminados por luz artificial, luz solar o ambas” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

“Para que la luz artificial sea de utilidad en el proceso fotosintético de las microalgas, los fotones generados deben encontrarse a una longitud de onda de entre los 600 y 700 nm. Al comparar distintas fuentes de luz artificial, incluyendo luz fría fluorescente, lámparas incandescentes, halógenas, AlInGap II (fosfuro de indio, galio y aluminio, con una longitud de onda de 643 nm) y diodos emisores de luz (light emitting diodes, LED), se encontró que el LED del tipo AlInGap II son la fuente de luz más eficiente y económica para el crecimiento de microalgas” (Kommareddy y Anderson, 2003) (J. R. BenaventeValdés, 2012). [44]

La luz es el nutriente que proporciona la energía a las microalgas para que puedan llevar a cabo la generación de nueva biomasa y es por tanto el motor del crecimiento. La luz es siempre el nutriente limitante en un fotobiorreactor bien diseñado, ya que los demás

nutrientes se pueden añadir en exceso. Sin embargo, la luz es limitada y además es difícil hacerla penetrar en el fotobiorreactor.

Es difícil entender que la luz, un nutriente que llega continuamente, pueda ser un factor limitante. Para ello hay que entender que las microalgas absorben la luz muy intensamente, en mucha mayor cantidad de lo que pueden asimilar (Sevilla, 2014).

“La tasa específica de crecimiento de las microalgas depende de la intensidad de la luz. El crecimiento de las microalgas se incrementa conforme la intensidad de luz aumenta. Cuando la tasa de crecimiento llega a su punto máximo, ésta disminuye con el incremento de la intensidad de la luz debido a la fotoinhibición (Bohne y Linden, 2002). Este patrón de crecimiento en relación con la intensidad de la luz se observa en la mayoría las especies de microalgas (Fábregas y col., 1998). Se ha reportado que la producción y acumulación de metabolitos de interés comercial se ve afectada por la radiación de luz blanca en algas, hongos y bacterias (Martin, 2010). Sin embargo, la intensidad y el régimen de la iluminación varían con el género de microalga” (J. R. Benavente-Valdés, 2012). [45]

La luz como nutriente limitante: cultivos ópticamente densos

Las microalgas absorben muy intensamente la luz. Con un coeficiente de extinción, k_a , del orden de 0,5 m²/g, se puede comprobar usando la ley de Lambert Beer:

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

“Es fácil comprobar que incluso en cultivos relativamente diluidos ($C_b=500 \text{ g/m}^3$ por ejemplo) la intensidad de luz (I) se reduce a una fracción de la incidente (I_0) a pocos centímetros bajo la superficie del cultivo (x)” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

Esto explica por qué incluso estando iluminados por intensidades de iluminación tan altas como la del sol de Almería a mediodía en verano ($I_0=2500 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ esto es llegan 2500 milimoles de luz por metro cuadrado y segundo) los cultivos pueden estar fotolimitados. Esto ocurre porque se producen amplias zonas oscuras en el seno de los cultivos y, aunque existen zonas muy iluminadas, en promedio, el volumen del fotobiorreactor puede estar muy oscuro.

Esta situación es inevitable cuando se usa luz solar por varios motivos.

En primer lugar, porque si se absorbe la luz eficazmente es obvio que se producirán zonas oscuras.

En segundo lugar, porque las irradiancias solares son excesivas y provocan daños a las microalgas. Por tanto, interesa que existan zonas oscuras de forma que en promedio la irradiación interna sea del orden de 10 veces inferior a la solar (esto es una aproximación bastante burda pero que sirve de ejemplo).

La atenuación de la luz es un fenómeno complejo que se estudia en el siguiente tema, en el que interactúan variables como la irradiación incidente (I_0) la concentración de biomasa (C_b)

el coeficiente de extinción de la biomasa (k_a , una medida de la eficiencia con la que absorbe la luz) y la geometría del fotobiorreactor. [46]

“La tasa específica de crecimiento de las microalgas depende de la intensidad de la luz. El crecimiento de las microalgas se incrementa conforme la intensidad de luz aumenta. Cuando la tasa de crecimiento llega a su punto máximo, ésta disminuye con el incremento de la intensidad de la luz debido a la fotoinhibición”. (J. R. Benavente-Valdés, 2012) [47]

La fotoinhibición es una “desactivación reversible de aparato fotosintético que aparece probablemente como mecanismo protector que se produzca una concentración demasiado elevada de intermedios fotosintéticos reductores que podrían dañar las células. La fotoinhibición aparece, por tanto, cuando el ritmo de fotólisis del agua y la consecuente generación de e^- supera la capacidad metabólica de la biomasa y esto puede ocurrir bajo tres circunstancias: exceso de luz, baja temperatura y suministro insuficiente de CO_2 ” (Sevilla, 2014). [48]

“Fábregas y col. (1998) estudiaron el efecto de la intensidad de la luz en la microalga *Haematococcus pluvialis*, observando que a una intensidad de $230 \mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$ la acumulación de astaxantina fue mayor en comparación a la observada con una intensidad de $40 \mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$. De igual manera, Barbosa y col. (2004) mostraron un remarcado incremento en la concentración de astaxantina en *Haematococcus pluvialis* cuando se incrementó la intensidad de luz de 50 a $400 \mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La fotoinhibición es un proceso dependiente del tiempo, en el cual ocurre un daño irreversible pocos minutos después de iniciado el estrés por luz, con un daño que excede

el 50 % después de 10 o 20 minutos (Pulz, 2001). Sin embargo, se han encontrado pocas referencias disponibles acerca de la fotoadaptación, la inhibición por luz o efectos de saturación en fotobiorreactores” (J. R. Benavente-Valdés, 2012). [49]

Distribución de la luz

“En cultivos de microorganismos fotoautótrofos la disponibilidad de luz determina la velocidad específica a la que se realiza la fotosíntesis y, como consecuencia, determina también la tasa específica de crecimiento. Sin embargo, en todos los sistemas de cultivo, las células más cercanas a la superficie iluminada impiden la penetración de la luz hacia el seno del medio de cultivo y producen un efecto de sombreado sobre las células más alejadas de la superficie. En algunos cultivos se ha estimado que la luz penetra solo de 1 a 2 cm más allá de la superficie, de manera que la zona fótica representa solo una pequeña fracción (10 – 30 %) del volumen total del cultivo. Debido a que el medio de cultivo está en constante movimiento, las células solo son expuestas por breves instantes a la luz en ciclos que pueden durar desde milisegundos a unas cuantas décimas de segundo. En condiciones reales el factor que determina la actividad fotosintética es la cantidad de energía disponible para cada célula individual, más que la cantidad de energía luminosa incidente (Lu y Vonshak, 1999; Fernandes y col., 2010). Los parámetros que pueden considerarse básicos para describir la disponibilidad de energía bajo una iluminación intermitente son dos, la relación de los periodos luz/oscuridad (L/O) y la frecuencia de los ciclos L/O. Estos establecen en gran medida el régimen de iluminación, el cual es un indicador de la disponibilidad de luz para una célula individual” (Fernández y col., 2002) (J. R. Benavente-Valdés, 2012). [50]

Trayectoria de la luz

La luz “es determinada por la profundidad de líquido en un reactor de tipo carrusel, por la separación entre las placas en un reactor de placas (horizontal o vertical) o por el diámetro del tubo en un reactor tubular. Las rutas luminosas que mejores resultados han dado en diferentes fotobiorreactores están entre 2.6 y 3.0 cm, sin embargo, en cultivos de alta densidad celular, una trayectoria de la luz de 1 cm aumenta la probabilidad de que las células en promedio estén expuestas a un régimen de iluminación óptimo (Javanmardian y Palsson, 1991). En virtud de lo anterior, actualmente no es recomendable utilizar rutas luminosas de más de 10 cm en ningún tipo de fotobiorreactor” (Oncel y Sukan, 2008) (J. R. Benavente-Valdés, 2012). [51]

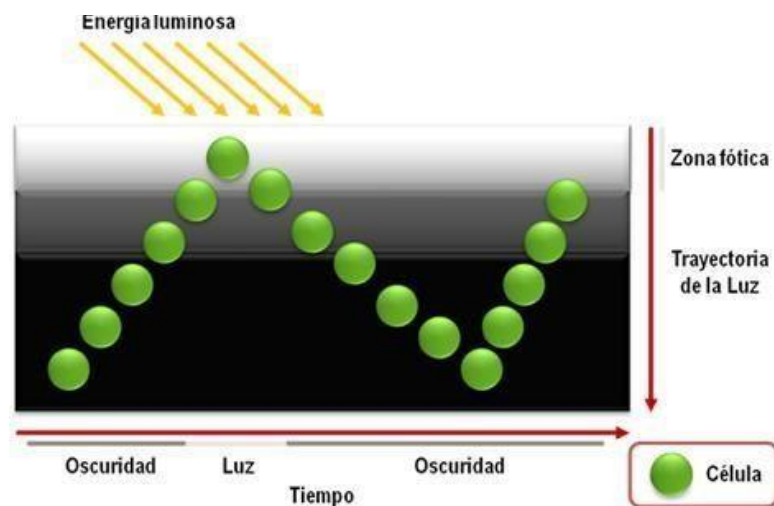


Figura 8. Ilustración de la trayectoria de la luz y de los ciclos luz oscuridad (Contreras-Flores y col., 2003)

Rutas luminosas

“Las rutas luminosas que mejores resultados han dado en diferentes fotobiorreactores están entre 2.6 y 3.0 cm, sin embargo, en cultivos de alta densidad celular, una trayectoria de la luz de 1 cm aumenta la probabilidad de que las células en promedio estén expuestas a un régimen de iluminación óptimo (Javanmardian y Palsson, 1991). En virtud de lo anterior, actualmente no es recomendable utilizar rutas luminosas de más de 10 cm en ningún tipo de fotobiorreactor” (Oncel y Sukan, 2008) (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

[52]

Intensidad de luz

La intensidad mínima de luz que permite que proceda el proceso de fotosíntesis ha sido establecida en cerca de 1% de la luz que incide sobre la superficie, la profundidad a la que se alcanza ese 1% de la luz incidente se conoce con el nombre de profundidad de compensación. A esa profundidad, la actividad fotosintética y la actividad respiratoria se encuentra en equilibrio.

La intensidad de un haz de luz incidente declina significativamente a medida que pasa a través del medio absorbente de acuerdo con la siguiente expresión:

$$T = 10^{-\epsilon \cdot c \cdot d}$$

T: Transmitancia

ϵ : Coeficiente molar de extinción

c: Concentración molar del absorbente

d: Distancia a la que se mide la luz transmitida

Fotoperiodo

“El fotoperiodo (tiempo de exposición a la luz y oscuridad) tiene efecto sobre los ciclos de vida y actividades metabólicas de las microalgas tanto en cultivo como en la naturaleza” (Humphrey, 1979). En condiciones naturales, la mayoría de las algas se establecen en periodos alternos de luz / oscuridad. [53]

Mezclado

En fotobiorreactores es conocido como un factor de mejoramiento de la producción de biomasa (Lou y Al-Dahhan, 2004). El mezclado juega un rol importante en el aseguramiento de la distribución de la intensidad de luz, en una suficiente transferencia gaseosa de CO₂ y en el mantenimiento uniforme de pH (Kommareddy y Anderson, 2005)” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

Temperatura

“Los sistemas fotosintéticos siempre generan calor a causa de la ineficiencia de la fotosíntesis de convertir la energía luminosa a energía química (Bholase, 2004). La conversión teórica de la luz roja en energía química es de un 31 % y el 69 % restante se pierde como calor. Por ello, la cantidad de enfriamiento en un sistema de cultivo

dependerá de la intensidad de la luz y de la concentración celular, sin embargo, el enfriamiento del reactor es sólo utilizado en sistemas cerrados (Andersen, 2005)” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

“La temperatura también es importante para la disociación de las moléculas de carbono, haciéndolo disponible para la fotosíntesis (Kommareddy y Anderson, 2003). La temperatura influye en la respiración y fotorespiración de manera más marcada que en la fotosíntesis. Sin embargo, si el CO₂ o la luz es un factor limitante para la fotosíntesis” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

PH

“Las microalgas tienen diversos requerimientos de pH para su crecimiento. A niveles de pH alcalinos, la disponibilidad de CO₂ puede ser limitante para el crecimiento y la fotosíntesis de microalgas, el pH se incrementa conforme la edad del cultivo es mayor, esto es debido a la acumulación de minerales y a la oxidación de nutrimentos. Por lo tanto, es recomendado que el pH inicial del medio de cultivo se ajuste a 6.5 antes de ser inoculado (Martin, 2010)” (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

Recomendaciones para el diseño de un FBR

“Para el diseño de un fotobiorreactor en el que se desee una óptima producción de biomasa es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos Tsoglin y col., (1996)” (J. R. Benavente-Valdés, 2012):

La trayectoria de la luz debe ser pequeña (no mayor a 2.5 cm).
Mantener una alta densidad celular (> 8 a 15 gramos de biomasa por litro de cultivo).

Un mezclado vigoroso para asegurar ciclos L/O de alta frecuencia.

Evitar inhibición del crecimiento por acumulación de O₂.

Mantener temperatura y pH óptimos (J. R. Benavente-Valdés, 2012).

Teniendo en cuenta las deficiencias y los requerimientos para el diseño de un fotobiorreactor planteo una exploración formal que por medio de principios formales de diseño, haciendo referencia a la geometría sagrada como punto de partida en relación a la idealización y concepción lógica formal perfecta, y a su vez, siendo consecuentes con el tema abordado, principios naturales, abordando conceptos como Biomímesis, proporción aurea, numero de oro, que desde un análisis lógico matemático permitan generar un fotobiorreactor que supla tanto las necesidades funcionales, como las formales, estructurales y desde el componente tecnológico generar estímulos de luz a partir del uso de diodos led, los cuales estarán distribuidos en un área hexagonal, respondiendo al concepto filosófico de “Rizoma” desarrollado por Gilles Deleuze y Félix Guattari.

CONCEPTOS TENIDOS EN CUENTA PARA LA EXPLORACIÓN FORMAL EN EL
DISEÑO DE UN FOTOBIORREACTOR
Biomímesis

ciencia que estudia a la naturaleza como fuente de inspiración de nuevas tecnologías innovadoras para resolver aquellos problemas humanos que la naturaleza ha resuelto, a través de modelos de sistemas (mecánica) o procesos (química), o elementos que imitan o se inspiran en ella, trata de imitar a la naturaleza no sólo en sus formas, sino sobre todo en sus funciones y procesos (Biomimesis, 2018).

Geometría sagrada

Hace referencia al “conjunto de formas geométricas que se encuentran presentes en el diseño de ciertos sitios considerados sagrados, principalmente iglesias, catedrales y mezquitas, junto con los significados simbólicos y esotéricos que se les atribuyen basándose en sus propiedades.

Algunas personas que trabajan con la geometría sagrada afirman que estimula ambos hemisferios cerebrales a la vez; el derecho por estar relacionado con habilidades artísticas y viso-espaciales, y el izquierdo por estar relacionado con la matemática y la lógica, aunque cabe aclarar que esto se trata de una sobresimplificación de la actividad cerebral y la especialización de cada hemisferio.

En todo diseño se tienen en cuenta cuatro componentes, lo conceptual, lo visual, lo relacional y lo práctico. Son elementos conceptuales aquellos que no son visibles: Son el punto, la línea, el plano y el volumen. Cuando los elementos conceptuales se hacen visibles, adquieren forma” (Geometria sagrada, s.f.). [54]

Hexágono

Con la geometría “el 6 irradia sentido de perfección. El seis es el número creador por excelencia y toda la geometría sagrada está relacionada y nace a partir del número seis.

El polígono de 6 lados se denomina hexágono. El hexágono regular tiene todos sus ángulos de 60° ” (Mercedes, 2017).

“En el hexágono. la longitud de los lados coincide de forma exacta con el radio del círculo que se traza alrededor de él. En la magia el hexágono tiene una especial relevancia y recibe el nombre de Estrella de David o Sello de Salomón. El hexagrama es muy utilizado y poderoso en estas lides. De estos símbolos místicos hablare en sendos capítulos próximamente.

La naturaleza utiliza como base de construcción de patrones el número seis y el hexágono. Sobre todo, lo podemos encontrar en las formas inorgánicas como: copos de nieve, cristales de minerales (aragonito), estructura atómica de elementos (carbono), las columnas solidificadas del basalto, ... Esta tendencia de la naturaleza a compactar las cosas en paquetes hexagonales produce un orden interno y externo eficiente” (Mercedes, 2017). [55]

Lógica matemática

Consiste en el “estudio matemático de la lógica, y en la aplicación de dicho estudio a otras áreas de la matemática y de las ciencias. La lógica matemática tiene estrechas conexiones con las ciencias de la computación y con la lógica filosófica.

La lógica matemática estudia los sistemas formales en relación con el modo en el que codifican o definen nociones intuitivas de objetos matemáticos como conjuntos, números, demostraciones, y algoritmos, utilizando un lenguaje formal.

La lógica matemática se suele dividir en cuatro subcampos: teoría de modelos, teoría de la demostración, teoría de conjuntos y teoría de la recursión. La investigación en lógica matemática ha jugado un papel fundamental en el estudio de las matemáticas.

La lógica matemática no es la «lógica de las matemáticas» sino la «matemática de la lógica». Incluye aquellas partes de la lógica que pueden ser modeladas y estudiadas matemáticamente.

La lógica matemática comprende dos áreas de investigación distintas: la primera es la aplicación de las técnicas de la lógica formal a las matemáticas y el razonamiento matemático y la segunda, en la otra dirección, la aplicación de técnicas matemáticas a la representación y el análisis de la lógica formal” (Lógica matemática, 2018). [56]

Número áureo / número de oro

El “número áureo (también llamado número de oro, razón extrema y media, razón áurea, razón dorada, media áurea, proporción áurea y divina proporción) es un número irracional, representado por la letra griega ϕ (phi).

Se trata de un número algebraico irracional (su representación decimal no tiene período) que posee muchas propiedades interesantes y que fue descubierto en la antigüedad, no como una expresión aritmética, sino como relación o proporción entre dos segmentos de una recta, es decir, una construcción geométrica. Esta proporción se encuentra tanto en algunas figuras geométricas como en la naturaleza: en las nervaduras de las hojas de algunos árboles, en el grosor de las ramas, en el caparazón de un caracol, en los flósculos de los girasoles, etc. Una de sus propiedades aritméticas más curiosas es que su cuadrado ($\Phi^2 = 2,61803398874988\dots$) y su inverso ($1/\Phi = 0,61803398874988\dots$) tienen las mismas infinitas cifras decimales” (Academia Play, 2016). [57]

Rizoma (Gilles Deleuze y Félix Guattari)

Concepto filosófico “desarrollado por Gilles Deleuze y Félix Guattari en su proyecto Capitalismo y Esquizofrenia (1972, 1980). Es lo que Deleuze llama una "imagen de pensamiento", basada en el rizoma botánico, que aprehende las multiplicidades.

En la teoría filosófica de Gilles Deleuze y Félix Guattari, un rizoma es un modelo descriptivo o epistemológico en el que la organización de los elementos no sigue líneas

de subordinación jerárquica —con una base o raíz dando origen a múltiples ramas, de acuerdo al conocido modelo del árbol de Porfirio—, sino que cualquier elemento puede afectar o incidir en cualquier otro (Deleuze & Guattari 1972:13). En un modelo arbóreo o jerárquico tradicional de organización del conocimiento — como las taxonomías y clasificaciones de las ciencias generalmente empleadas- lo que se afirma de los elementos de mayor nivel es necesariamente verdadero de los elementos subordinados, pero no a la inversa. En un modelo rizomático, cualquier predicado afirmado de un elemento puede incidir en la concepción de otros elementos de la estructura, sin importar su posición recíproca. El rizoma carece, por lo tanto, de centro, un rasgo que lo ha hecho de particular interés en la filosofía de la ciencia y de la sociedad, la semiótica y la teoría de la comunicación contemporáneas.

La noción está adoptada de la estructura de algunas plantas, cuyos brotes pueden ramificarse en cualquier punto, así como engrosarse transformándose en un bulbo o tubérculo; el rizoma de la botánica, que puede funcionar como raíz, tallo o rama sin importar su posición en la figura de la planta, sirve para ejemplificar un sistema cognoscitivo en el que no hay puntos centrales —es decir, proposiciones o afirmaciones más fundamentales que otras— que se ramifiquen según categorías o procesos lógicos estrictos” (Deleuze & Guattari 1972:35) (Rizoma, 2017).[58]

MARCO METODOLÓGICO

FASE 1

Investigación

1.1. Fuentes de energía

1.1.1 Definición

1.1.2 Fuentes usadas actualmente

1.1.3 Datos estadísticos que respalden la investigación

1.1.4 Características de la energía

1.1.5 Beneficios

1.1.6 Problemáticas ambientales generadas

1.2 Energía renovable

1.2.1 Definición

1.2.2 Tipos de energía renovable

1.2.3 Características

1.2.4 Beneficios ambientales

1.2.5 Fuentes alternativas de energía (Biomasa)

1.3 Microalgas

1.3.1 Definición

1.3.2 Características

1.3.3 Ventajas implementación

1.3.4 Formas de cultivo

1.3.5 Requerimientos medios de cultivo

1.3.6 Generación de energía (Biomasa)

1.4 Medio de cultivo (Fotobiorreactor)

1.4.1 Definición de fotobiorreactor

1.4.2 Tipos de fotobiorreactores existentes

1.4.3 Características

1.4.4 Deficiencias de cada sistema de cultivo

1.4.5 Indagación formal de fotobiorreactores

1.4.6 Sistemas de control y monitoreo necesarios (ph, temperatura, mezclado, iluminación)

1.4.7 Rango de datos para garantizar el bienestar del cultivo

1.4.8 Deficiencias de los fotobiorreactores existentes

1.4.9 Determinantes de diseño en fotobiorreactores

1.5 Sistemas de iluminación para fotobiorreactores cerrados

1.5.1 Requerimientos de control lumínico

1.5.2 Lectura de documentos existentes sobre exploraciones que evidencian avances del crecimiento de microalgas por manejo de sistemas de iluminación

1.5.3 Dispositivos para generar fuentes de luz

1.5.4 Radiación, trayectoria y rutas de iluminación requeridas en el fotobiorreactor

1.5.5 Colores determinados para el cultivo de microalgas

1.5.6 Manejo de intervalos (fotoperiodo)

1.6 Exploración formal a partir de conceptos de diseño

1.7 Definición de conceptos y relación con aspectos formales de un fotobiorreactor

1.8 Geometría sagrada

1.8.1 Definición

1.8.2 Historia

1.8.3 Formas sagradas

1.8.4 Hexágono

1.8.5 Definición y características de un hexágono

1.9 Lógica matemática

1.9.1 Definición

1.9.2 Proporción aurea

1.9.3 Numero de oro

2.0 Rizoma

2.1 Lectura del libro escrito por Gilles Deleuze y Félix Guattari

2.2 Relación con el diseño y sistema de cultivo

FASE 2

Fundamentación

1. Unión de conceptos ya seleccionados.
2. Determinantes de requerimientos formales, estructurales y funcionales.
3. Estructuración de conceptos y determinantes en matriz de morfoconcepción.
4. Búsqueda de referentes desde componentes formales, estructurales, funcionales (componente tecnológico).

FASE 3

Exploración

1. Exploración formal a partir de conceptos ya mencionados.
2. Elaboración de bocetos iniciales.
3. Creación de listado con parámetros tecnológicos a tener en cuenta.
4. Definición formal.
5. Desarrollo de teselado en relación al hexágono y número de oro.
6. Dimensiones del fotobiorreactor.
7. Selección material adecuado para la elaboración del sistema de cultivo (acrílico).
8. Listado de materiales necesarios para la construcción del fotobiorreactor, teniendo en cuenta uniones, sistemas de aireación y mezclado.

FASE 4

Construcción

1. Compra de material.
 - 1.1 Lamina de acrílico transparente de 5mm de espesor
 - 1.2 Pegante de acrílico
 - 1.3 Manguera de silicona para el sistema de aireación y mezclado interno.
 - 1.4 Bomba de aire para suministrar al cultivo.
 - 1.5 Válvulas para graduar potencia de aire
2. Elaboración planos para corte laser (corte y grabado teselado)
3. Llevar a cabo proceso de corte y grabado laser.

FASE 5

Ensamble

1. Unión de piezas

2. Ensamble sistema de aireación y mezclado
 - 2.1 Realizar perforaciones en la manguera para generar varias salidas de aire
 - 2.2 Disposición equilibrada de las mangueras
 - 2.3 Unión y ensamble de mangueras, válvulas y bomba

3. Cierre del fotobiorreactor

FASE 6

Componente tecnológico

1. Elaboración sistema de iluminación.
 - 1.1 Determinar el sistema que se generará

 - 1.2 Compra de materiales electrónicos
 - 1.2.1 Cinta Led (blanca)
 - 1.2.2 Arduino uno
 - 1.2.3 Jumpers
 - 1.2.4 Resistencia 1k
 - 1.2.5 Borneras
 - 1.2.6 Regulador TIP 122
 - 1.2.7 Jack de entrada
 - 1.2.8 Adaptador 1 A/ 12 V

1.3 Programación Arduino

1.3.1 Encendido y apagado en fotoperiodos de 12 horas

1.4 Desarrollo de tarjeta impresa de sistema electrónico

1.4.1 Esquema electrónico

1.4.2 PCB tarjeta impresa

1.4.3 Render 3D

1.4.4 Simulación electrónica

1.5 Mandar a hacer la impresión electrónica.

1.6 Ubicar los diferentes elementos electrónicos y soldarlos.

1.7 Realizar conexión arduino, impreso, cinta Led.

1.8 Comprobar que funcione de manera correcta la programación realizada.

FASE 7

Montaje sistemas

1. Montaje del sistema de iluminación en el reactor ya elaborado.
2. Pruebas de que no existan fugas o filtraciones en el reactor.
3. Prueba del sistema de burbujeo (fuerza).
4. Prueba sistema de luces Led.

FASE 9

Medio de cultivo

1. Se realiza el proceso según parámetros brindados en papers sobre datos específicos que determinan la cantidad necesaria para la preparación de cada uno de los 10 stocks para la elaboración del cultivo.
2. Cada uno de los stocks es pesado en una balanza analítica.
3. Teniendo en cuenta que las microalgas son organismo de agua dulce, cada uno de los stocks es disuelto en 1 Litro de agua.
4. Cada stock es vertido en frascos ámbar y posteriormente reenvasados en recipientes de vidrio para guardarlos en la nevera.
5. Con una probeta de 2000 ml se vierten 5 Litros del stock en un recipiente.
6. En un biker, de 1 a 6 se vierten 50 ml de cada uno de los 6 stocks.
7. Se agitan en un Erlenmeyer y se lleva el cultivo al recipiente que contiene los 5 Litros.
8. Con movimientos envolventes se mezcla todo e manera homogénea y se disponen en Erlenmeyer de 1 litro y se llevan a calefacción hasta alcanzar su punto de ebullición (100 ° C).
9. El cultivo es retirado y aislado hasta que esté a temperatura media.
10. El medio de cultivo es enfriado a partir de una técnica manual, en donde se realizan cambios regulares de agua fría hasta conseguir que llegue a temperatura ambiente y posteriormente se pueda sembrar el cultivo.
11. Previamente, con micro pipetas Pasteur se sacan gotas y se colocan, junto con aceite de inmersión en una placa objetivo, para ser observadas en el microscopio, con objetivo 40, 10, 100 y determinar cuál medio de cultivo tiene más organismos biológicos para sacar el inóculo del cultivo.
12. Del inóculo se sacan 45 ml, medidos con probetas.
13. Al tener el medio de cultivo listo y el inóculo, se procede a sembrar.

FASE 10

1. Esterilización de contenedores en cabina de rayos U.V
2. Ubicación de los cultivos de microalgas en los fotobiorreactores y en el laboratorio de bioprocesos.

FASE 11

Registro de datos

1. Toma de muestras según días y horas acordadas, para conocer:
 - 1.1 Crecimiento microalgas
 - 1.2 Generación de biomasa

2. Toma de datos a partir de un análisis espectrofotométrico.

FASE 12

1. Análisis de resultados
2. Conclusiones sobre el diseño de los fotobiorreactores y las problemáticas presentadas.

FASE 13

Exploración

1. Bosquejos nuevo diseño de fotobiorreactor, según las problemáticas encontradas anteriormente.
2. Identificación de componentes importantes y necesarios.
3. Ubicación espacial de los fotobiorreactores prospectivamente.
4. Propuesta final.
5. Elaboración de prototipo que de razón de los cambios pensados y los beneficios estructurales, formales y funcionales que lo determinan.

6. Búsqueda del mejor método de ensamble para evitar todo tipo de filtraciones del cultivo.

FASE 13

Construcción

1. Compra de material.
 - 1.1 Lamina de acrílico transparente de 3 y 5mm de espesor
 - 1.2 Pegante de acrílico
 - 1.3 Manguera de silicona para el sistema de aireación y mezclado interno.
 - 1.4 Válvulas entradas / salida de aire.
 - 1.5 Bomba de aire para suministrar al cultivo.

2. Elaboración de matriz hexagonal
 - 2.1 Elaboración de planos
 - 2.2 Corte laser (Mdf)
 - 2.3 Corte matriz en acrílico de 3mm
 - 2.4 Calentar el acrílico y manipular el material hasta obtener la forma requerida
 - 2.5 Realizar el grabado de las caras del fotobiorreactor, generando un sistema de ajuste entre las tres piezas.

3. Diseño de teselado que permita aumentar la dispersión de los diodos led.
 - 3.1 Grabado del teselado en hexágono

4. Elaboración de planos para corte de las diferentes piezas del soporte del fotobiorreactor.

5. Diseño y fabricación del sistema de mezclado, a partir de impresión 3D para garantizar un flujo continuo en el cultivo.
 - 5.1 Diseño de la pieza en Fusión 360.
 - 5.2 Corregir archivo según determinantes.
 - 5.3 Enviar a impresión 3D en PLA Clear.

6. Ensamble de pieza impresa en 3D y perforaciones necesarias para la disposición de la válvula de entrada de aire.

7. Ensamble del fotobiorreactor y verificación de fugas.
 - 7.1 Se coloca silicona en las uniones del fotobiorreactor, con el fin de garantizar resistencia a posibles filtraciones.

8. Ensamble del fotobiorreactor al soporte.

FASE 6

Componente tecnológico

1. Toma de medidas para la elaboración del impreso hexagonal, en relación al teselado diseñado previamente.
2. Diseño del impreso y demás componentes para poder realizar la programación del sistema de iluminación.
3. Ya teniendo el impreso se ensamblan los diodos led y demás componentes electrónicos.
4. Programación del Arduino, 12 H Luz / 12 H Oscuridad. **FASE 6**

1. Ensamble del sistema completo en el espacio requerido.
2. Montaje del cultivo.
3. Inicio de programación y función de los fotobiorreactores para la realización de pruebas de radiación de luz y espectrofotometría.

ESTADO DEL ARTE

Sistemas de cultivo de microalgas

Teniendo un previo conocimiento de lo que es un fotobiorreactor, como funciona y las tipologías existentes (columna, tubular y panel) se mostrarán a continuación diferentes proyectos que evidenciarán procesos de diseño y creación de fotobiorreactores bajo determinantes ya estipuladas para la adecuada conservación de las microalgas, esto con el fin de identificar deficiencias ya exploradas y hallazgos significativos que ayuden para el diseño de un nuevo fotobiorreactor.

1. FOTOBIORREACTOR TUBULAR

1.1 ACUALGAE

1.1.1 Nuevo concepto de fotobiorreactor, pensado por y para los laboratorios

Muchos son los diferentes modelos de fotobiorreactores que existen en la actualidad, pero muy pocos pensados para todo tipo de microalgas (marinas y de agua dulce). Aqualgae, una empresa de ingeniería y biotecnología dedicada a la producción y suministro de fotobiorreactores decidió generar un nuevo concepto de fotobiorreactor con el fin de restar el tiempo invertido por el usuario en tareas de mantenimiento, mejorando el sistema para que la investigación sea lo realmente importante (Aqualgae, 2018). [59]



Figura
9. Fotobiorreactor Aqualgae

“El nuevo modelo aporta a sus usuarios un diseño en coherencia con el resto de equipos del lugar de trabajo. Además, se ha pensado siempre en el cliente, aportando controles ergonómicos, intuitivos y de alta calidad. Un fotobiorreactor compacto, fácil de limpiar, de montar (sistema llave en mano) y de desmontar. El equipo, de cuatro columnas de 25L cada una, está protegido del exterior, garantizando así condiciones de cultivo totalmente controladas, tales como temperatura, iluminación y contaminaciones del exterior” (Aqualgae, 2018).

Especificaciones de diseño fotobiorreactor Acualgae (Lab Model 2016)

Funcional

- ✓ Suministro independiente de aire, CO₂ y nutrientes
- ✓ Sistemas de autolimpieza: Filtros de gases
- ✓ Operación intuitiva en pantalla táctil
- ✓ Configuración óptima con componentes necesarios



Figure 1 Figura 10. Fotobiorreactor

- ✓ Representación gráfica de todas las variables del *Acualgae* proceso
- ✓ Control de flujo con rotámetros
- ✓ Regulación precisa de temperatura con tecnología PID
- ✓ Control automático de pH optimizado
- ✓ Cosechado automático y programable (Acualgae, 2018)

Formal / Estructural

- ✓ 4 columnas de 20 L
- ✓ Superficies 100% lisas para prevención de biofouling
- ✓ Equipo en acero inoxidable 316 y pintura lacada anti-corrosión
- ✓ Interfaces adicionales para integración de otros elementos (válvulas, sensores)
- ✓ Sensores de calidad industrial O₂, Nitratos, densidad óptica
- ✓ Bombas peristálticas opcionales.
- ✓ Mesa de apoyo opcional, con recipientes para nutrientes y/o cosechado, así como elementos de apoyo (Acualgae, 2018).



Figura 11. Forma y estructura fotobiorreactor Acualgae

Aspectos lumínicos

- ✓ Intercambio rápido de tipo de iluminación.
- ✓ Iluminación específica por columnas o general para las cuatro.
- ✓ Distintas tecnologías de iluminación en opción, fluorescente, LED, con diferentes modelos, espectros e intensidades.



Figure 2Figura 12. Sistema de iluminación

- ✓ Reconocimiento automático de la tecnología *fotobiorreactores Acualgae* lumínica empleada.
- ✓ Control automático de fotoperiodo y definición de perfiles de iluminación (Acualgae, 2018)

Análisis formal / estructural / funcional

Figura 13.
Análisis formal, estructural y funcional de



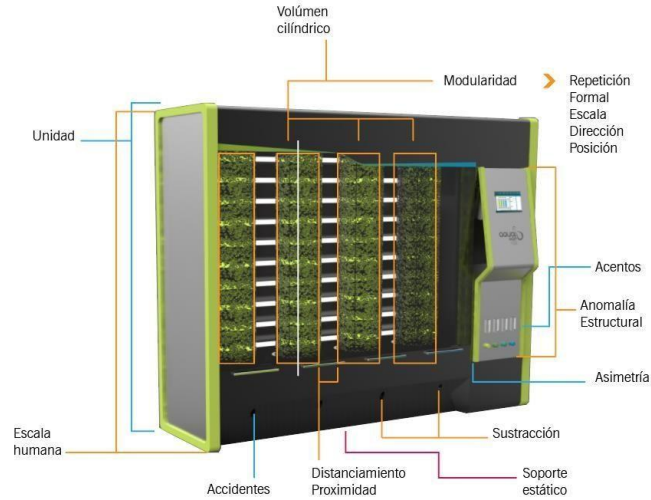
Formal / Estructural



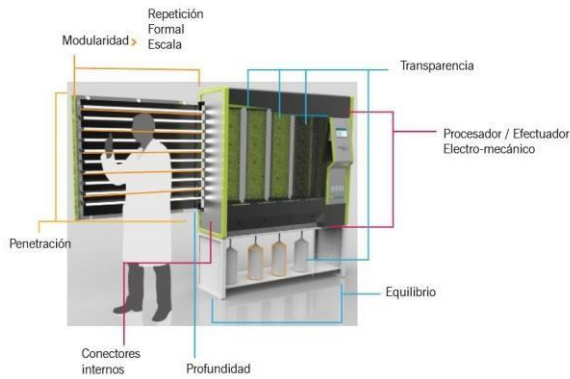
Atributos Formales



A. Tecnológico funcional



fotobiorreactor



Aqualgae.

Ventajas del fotobiorreactor Acualgae

- ✓ La captación de luz y la desgasificación se realizan de manera separada, optimizando ambas funciones.
- ✓ La forma cilíndrica permite la distribución de la luz y soporta bien la presión de la base
(Sevilla, 2014).
- ✓ La relación adecuada entre superficie y volumen permite maximizar el paso de luz en el fotobiorreactor.

Deficiencias fotobiorreactor Acualgae

- × Escalado: al aumentar el diámetro muy deprisa la proporción de volumen oscuro, disminuyendo la productividad.
- × Tampoco es posible hacerlas muy altas ya que la presión en la base dificulta el burbujeo y causa estrés hidrodinámico (Sevilla, 2014).

2. FOTOBIORREACTOR DE COLUMNA DE BURBUJEO

Fotobiorreactor tipo columna de burbujeo. Apto para el cultivo de bacterias, hongos, células vegetales y microalgas, distribuido por Bioin (Bioin, 2013).

Especificaciones de diseño de fotobiorreactor

Funcional

✓ Control de longitud de onda

Infrarrojo	760 nm
Rojo lejano	700 nm
Rojo	660 nm
Naranja	600 nm
Verde	520 nm
Azul	450 nm

Blanco	450 a 660 nm
UV-A	400 nm

tipo

✓ Control intensidad: Usando el panel de control central, se programa digitalmente la intensidad de cada uno de los módulos (Bioin, 2013)

✓ Control fotoperiodo: Control electrónico que permite tener ciclos de luz y oscuridad programables para que cada color simule ambientes naturales. (tiempos de encendido de 1 a 99 horas) (Bioin, 2013)

Figura 14.

Fotobiorreactor columna de burbujeo

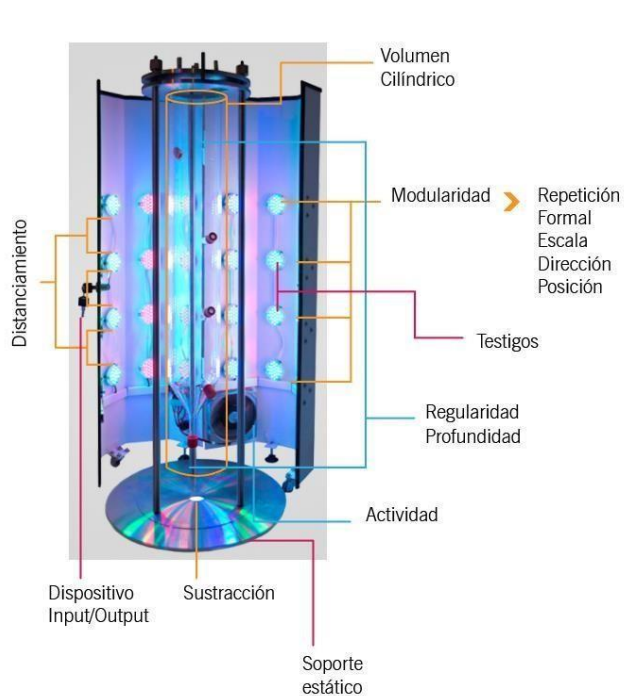


Formal / Estructural

- ✓ Reactor de borosilicato (Autolavable).
- ✓ Soportes en acero inoxidable.
- ✓ Sistema de iluminación LED, con control independiente de longitud de onda, fotoperiodo e intensidad. [60]

Análisis formal / estructural / funcional

Formal / Estructural Atributos Formales A. Tecnológico funcional



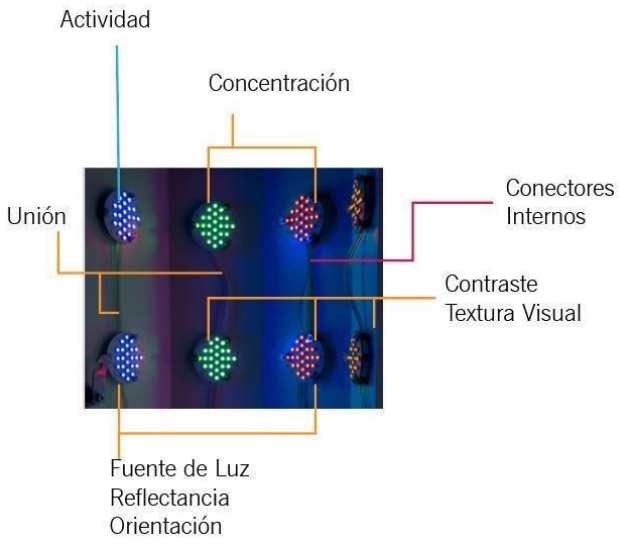


Figura 15. Análisis formal, estructural y funcional de fotobiorreactor de columna de burbujeo

Ventajas del fotobiorreactor de columna de burbujeo

- ✓ Manejo de fotoperiodos en ciclos de Luz / Oscuridad
- ✓ Programación de luces led con simulación de tonos naturales
- ✓ Disposición de leds alrededor del reactor contenedor, manteniéndolos aislados y perfectamente distribuidos.

Deficiencias fotobiorreactor de columna de burbujeo

- × Manejo de luces de diferentes colores, sin tener en cuenta que la luz blanca y azul tiene mayor incidencia en la estimulación de las microalgas.

3. FOTOBIORREACTOR DE COLUMNA CON DIODOS LED

Luces de diodo en columnas de burbujeo al servicio de la producción de microalgas



Figura 16. Equipo de la Universidad de Almería, responsable del estudio. Fundación Descubre con diodos led responsable del fotobiorreactor

“Investigadores del Grupo de Biotecnología de Microalgas Marinas de la Universidad de Almería, en colaboración con la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Massey de Nueva Zelanda, han desarrollado un nuevo dispositivo de cultivo de

microalgas a escala piloto, cuya principal novedad es la utilización de diodos como fuente de iluminación” (IPac, 2016).

El sistema, informa la Fundación Descubre, ha sido utilizado para la producción de dinoflagelados, un grupo de microorganismos marinos que generan sustancias bioactivas con diferentes aplicaciones farmacológicas, más concretamente, el dinoflagelado utilizado en esta investigación fue *Karlodinium veneficum*. Una microalga ha sido reconocida como productora de compuestos con potencial aplicación como anticancerígenos y tratamiento del colesterol. “Los dinoflagelados tienen un enorme potencial para descubrir nuevas sustancias que pueden usarse para mejorar la vida de las personas, pero antes debemos conocer cómo lograr producirlos a un coste razonable, actuando sobre todas las partes del proceso, entre ellas, la fuente de iluminación”, subraya a Fundación Descubre, Francisco García Camacho, responsable de la investigación.

En este caso, “el sistema de iluminación diseñado resulta muy barato y permite simular cualquier régimen de iluminación ideado por el usuario. Además, es aplicable a cultivos de una gran variedad de microalgas para volúmenes que pueden ocupar desde unos pocos mililitros hasta miles de litros. Asimismo, través del nuevo modelo, el metabolismo de las microalgas puede ser dirigido hacia la síntesis de sustancias de interés. También puede imitarse la iluminación solar con la finalidad de evaluar el potencial de cultivo de cualquier especie bajo distintas condiciones. Los dispositivos



utilizados en las pruebas son cerrados en columna de burbujeo, permitiendo el sistema la distribución de la luz y la mezcla con la corriente de aireación”. (IPac, 2016).

Figura 17. Fotobiorreactor en columna de burbujeo con iluminación LED. Dispositivo utilizado en los ensayos. Fundación Descubre

“La iluminación usando luces de diodo es particularmente atractiva ya que consume menos energía y genera menos calor que las lámparas incandescentes y tubos fluorescentes, usados tradicionalmente en la producción de biomasa a partir de microalgas. Además, los LED pueden ser seleccionados para suministrar luz a cualquier longitud de onda”, explica García Camacho

Tras las investigaciones realizadas, tanto a escala de laboratorio, como a nivel piloto, los investigadores de la Universidad de Almería han publicado en la revista *Bioresource Technology* un artículo titulado ‘Pilot-scale bubble column photobioreactor culture of a

marine dinoflagellate microalga illuminated with light emission diodes', en el que confirman la eficiencia productiva del nuevo sistema.

El trabajo forma parte del proyecto titulado 'Biotecnología de dinoflagelados marinos. Producción y valorización de su biomasa a escala piloto', financiado por el Programa Nacional de I+D+i. Con los investigadores de la Universidad de Almería colabora estrechamente el grupo de investigación Productos Naturales Marinos de la Universidad de La Laguna con el objetivo de contribuir a potenciar el uso de dinoflagelados y sus productos derivados como una parte de la bioeconomía basada en la Biotecnología Azul (IPac, 2016)[61].

Ventajas del fotobiorreactor de columna de diodos led

- ✓ Sistema rentable
- ✓ Permite simular cualquier régimen de iluminación ideado por el usuario
- ✓ Uso de luces de diodo por su menor consumo y menos emisión de calor
- ✓ Existe la posibilidad de programar la longitud de onda que se requiere en el fotobiorreactor

4. FOTOBIORREACTOR AUTÓNOMO PARA CULTIVO DE MICROALGAS



Figura 18.
Fotobiorreactor autónomo
para cultivo de algas

“Fotobiorreactor para cultivo de microalgas totalmente autónomo. Cuenta con aireación multipunto desde su base, agitación interna para uniformizar el cultivo, regulación de temperatura mediante resistencia e iluminación interior LED.

El sistema de control permite mantener de manera automática y desatendida las condiciones físico-químicas del medio de cultivo, así como controlar los fotoperiodos sin necesidad de control manual. Además, permite la monitorización y el control remoto del sistema desde cualquier lugar, a través de internet” (svmac, s.f.).

Características generales

- ✓ Volumen de cultivo a la medida de su necesidad.
- ✓ Aireación multipunto desde la base.
- ✓ Para cultivos con alta sedimentación, se incorpora como opción la agitación mecánica con regulación de velocidad.
- ✓ Regulación de la temperatura, mediante resistencia.
- ✓ Iluminación interna mediante LED, con regulación del fotoperíodo.
- ✓ Apertura de la parte superior para labores de limpieza.
- ✓ Sistema de control para control remoto y autónomo.
- ✓ Diseño personalizado. Tanto en la envoltente como en las instalaciones asociadas:

Tratamiento de agua, suministro de nutrientes y CO₂, etc (svmac, s.f.). [62].



Figura 19. Características
fotobiorreactor autónomo para
cultivo de algas

Investigación en fotobiorreactores

1. Estimación de Iluminación en un Fotobiorreactor Productor de Biomasa a Partir de Microalgas

Investigación

M.C. Carlos Francisco González Hernández, M.C. Manuel de Jesús Sol Hernández, Dr. Miguel Ángel Franco Nava.

El proyecto de investigación que se expondrá a continuación está basado en el estudio de la distribución de iluminación en el interior de fotobiorreactor mediante la técnica de análisis de superficie.

“Con el objeto de analizar las variables que determinan la producción de biomasa y en particular evaluar la eficiencia del sistema de iluminación, se diseñó en CA D (computer aided design por sus siglas en inglés) y construyó un fotobiorreactor (\pm BR). El \pm BR fue construido en acrílico, con una geometría cilíndrica sesgada por la base con un ángulo de inclinación 10° y una capacidad de operación de 100 L.

Sus dimensiones son de 650 mm de diámetro interno, espesor de la lámina de acrílico 8 mm, altura máxima 448 mm, altura mínima 330.6 mm. Cuenta con un tubo de desagüe con un diámetro de 61.41 mm (situado en la parte inferior del cilindro) y otro de derrame (en la parte lateral del cilindro) de 100.86 mm de diámetro. La base es de acero inoxidable y cuenta con una lámina circular también de acero inoxidable que aloja en una distancia equidistante 10 diodos emisores de luz (Leds por sus siglas en inglés) tipo campana de 21 Leds cada una y una potencia de 1.3 watts.



Figura 20. Disposición formal fotobiorreactor de algas

Así mismo, el recipiente cuenta con una demanda en consumo de energía W/día necesario para su funcionamiento, esto se muestra en la Tabla 1, para el sistema de iluminación, el inversor y el sistema de agitación de aire (Airlift). Sánchez et. al. [16]., así como Correa [17]., concluye en que las lámparas con

emisión de onda blanca o en combinación blanca-azul son más efectivas que cualquier otra onda de luz.

Consumo Medio de Energía de Fotobiorreactor			
	Potencia (W)		Tiempo de Uso
	Corriente Alterna (c.a.)	Corriente Continua (c.c.)	Horas/Día
Iluminación	13		12
Inversor		2.16	24
Sistema de Agitación por Aire "Airlift"	4.5		24

Figura 21. Demanda en consumo del fotobiorreactor (W/día)

Diseño experimental

Como primera instancia, se determinó la distribución de los puntos de medición de la iluminación en el fotobiorreactor, considerando la altura y volumen del líquido que contiene las microalgas y que debe ser atravesado por la luz para llegar a todo el recipiente.

En la siguiente figura, se muestra una representación del diseño para las alturas con la Finalidad de determinar la medición de la luz, así como también el volumen de acuerdo a la distancia recorrida para cada altura.



22. Alturas para la medición de luz y volúmenes del fotobiorreactor.

Figura

Se utilizó la especie de microalga clorófta *Nannochloris* sp con una densidad de 403 x 10³ cel/ml, en agua de mar con una salinidad de 33 ppm y se realizaron dos etapas en esta Fase. La clorofila, principal pigmento de las microalgas verdes, tiene un rango de bandas de absorción de 450-475 nm y de 630-675 nm para la clorofila a y clorofila b, respectivamente.

En la primera etapa, se utilizaron 10 LED's a 1.3 W, con una distribución equidistantemente localizada en la base metálica del fotobiorreactor, como se muestra en la Figura 3 en donde se presenta la vista superior de la base metálica y la distribución de los LED's. Los LED's de luz blanca son diodos azules, que emiten luz a una longitud de onda de aproximadamente 460 nm, recubiertos con una capa de un derivado de fósforo. El fósforo absorbe la luz azul y la re-emite a distintas longitudes de onda entre

los 400 y 750 nm en el espectro visible, generando luz blanca. Están basados en semiconductores de InGaN (Nitruro de Indio y Galio), difíciles y raros, y por tanto caros. El ángulo de apertura de los LED's utilizados en este trabajo fue de 20°. Este ángulo no es el de apertura máxima, sino que se refiere al doble de la apertura en la cual la intensidad luminosa ha disminuido la mitad respecto a la máxima central" [18].

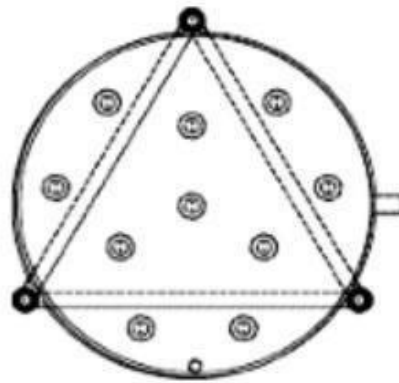


Figura 23. Vista superior del fotobiorreactor con la base metálica y los

En la segunda fase, además de conservar la LED's descritos anteriormente, se realizó una modificación, adicionando tres Lámparas Fluorescentes Compactas(LFC) de 15 W cada una, y una temperatura de color de 6500 K que corresponde a la luz de color blanco frío. El voltaje (V) es para 110-127V, cuenta con dos bulbos de vidrio en Forma de U conteniendo vapor de mercurio a baja presión con pequeñas cantidades de un gas inerte, como el argón. La mayoría de la luz

es emitida en la región visible del espectro (400–700nm), y es por lo tanto muy cercana al espectro de la luz de día [19], con lo que se esperaba mejorar la

Fotosíntesis. El flujo luminoso corresponde a 810 lm y 54 lm/W. Las lámparas fueron situadas periféricamente a la mitad de la altura total del fotobiorreactor como se muestra

a continuación

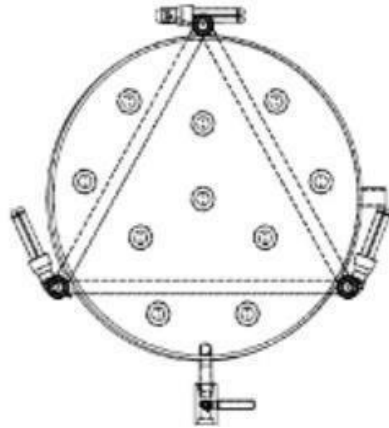


Figura 24. Vista superior del fotobiorreactor con 10

“Los resultados reflejan que el uso de lámparas fluorescentes adicionales al sistema de iluminación LED, incrementa significativamente en 50%, la iluminación en el interior del fotobiorreactor en la posición más próxima al fondo del recipiente. Mientras que en la parte superior se incrementó 2.6 veces respecto al uso exclusivo de lámparas LED.

el diseño y distribución lumínica del fotobiorreactor supera la penetración de la luz que en la mayoría de los diseños sólo alcanza valores del 10% a 30% del volumen total de los fotobiorreactores, donde la zona fótica (iluminada) alcanza apenas los primeros 2 cm de profundidad” (M.C. Carlos Francisco González Hernández, 2014)

Conclusión

“Los resultados obtenidos en el análisis indican que el sistema de iluminación diseñado solamente con LED's fue menos eficaz que el que incorporó lámparas fluorescentes, ya que la concentración más alta de luz en el centro del fotobiorreactor fue de $4.5 \times 10^3 \text{lx}$ a

una altura de 8.96 cm, representando el 1.87 % de la cobertura total del tanque. Sin embargo, a 35.87 cm se presentó una luminosidad puntual de 104 lx en la misma posición y con una cobertura del 35.2% esto indica que en la misma posición de los LED's se observa una disminución de la intensidad luminosa a medida que se incrementa la distancia por las sombras de las microalgas, pero se incrementa el porcentaje de cobertura por el ángulo de dispersión.

Esto es importante considerarlo en el diseño de fotobiorreactores, ya que afecta directamente en el metabolismo de las microalgas quienes requieren como

mínimo 2500 lx para realizar sus funciones metabólicas.

El uso de luz combinada en dirección horizontal y vertical incrementa en un 50% la intensidad luminosa en la base del fotobiorreactor, mientras que en la parte superior se obtiene un incremento del 160%. Siendo un factor importante a resaltar, la ubicación del sistema, debido a que se pueden evitar sombras y favorecer la desviación de gran parte de la luz que incide en el recipiente. La aportación más importante de este estudio fue la validación de la metodología propuesta para la evaluación de la capacidad de iluminación en fotobiorreactores, la cual emplea herramientas simples para cuantificar, representar gráficamente e incluso elaborar modelos matemáticos que permitan evaluar cuantitativamente y comparar dicha capacidad en diferentes tipos de diseños de fotobiorreactores" (M.C. Carlos Francisco González Hernández, 2014) [63].

2. Efecto de tres tipos de luz sobre el crecimiento de microalgas de *Scenedesmus* sp.

Luis Gutiérrez-Mosquera, María Ocampo-Gómez, Sandra Montoya-Barreto y Óscar Sánchez-Toro

“Las microalgas tienen como requerimientos básicos para su crecimiento la fuente de carbono y la fuente de luz. Los micronutrientes son también un requerimiento importante. Sin embargo, la influencia de la longitud de onda en los diferentes colores de luz y la intensidad lumínica corresponde a uno de los aspectos que son determinantes para iniciar su fase lag. La experimentación se realizó con respecto a tipos de luz correspondientes a luz roja, amarilla y blanca con diferentes porcentajes de intensidad lumínica (100, 70, 40 y 10%), encontrándose que la luz blanca a una intensidad lumínica del 10% fue la que exhibió mejores resultados” [64].

PROCESO DE DISEÑO

REQUERIMIENTOS / DETERMINANTES

- ✓ Formalmente, el fotobiorreactor debe ser de fácil acceso y manipulación, garantizando así la facilidad en la usabilidad para poder ser limpiados y esterilizados para posteriores siembras de diferentes cultivos.
- ✓ Componer un sistema tecnológico, que sea económico y fácil de utilizar, para mantener un control y monitoreo constante sin que esto represente costos adicionales.
- ✓ Implementar el sistema de almacenamiento para el registro de datos (ph, temperatura, radiación) presentados en el cultivo, con el fin de conocer y evaluar el estado de las microalgas.

- ✓ Hacer uso de materiales con propiedades resistentes a la corrosión, cambios de temperatura, ph, y que a su vez no maneje un peso elevado.
- ✓ Las dimensiones del fotobiorreactor deben ser coherentes con lo hallado en los referentes, manejar una profundidad comprendida entre 1 y 3,5 cm, garantizando una penetración adecuada de la luz en el interior del fotobiorreactor independiente de la densidad de las microalgas.
- ✓ En cuanto al sistema de iluminación, se deben implementar periodos de luz/ oscuridad con frecuencias de ciclos de tiempo, con el fin de evitar que las microalgas alteren su proceso fotosintético a causa de inhibición.
- ✓ Generar un sistema de aireación y mezclado que permita mantener un movimiento constante de las microalgas, evitando la concentración de oxígeno y la exposición de luz parcial.
- ✓ Formal y estructuralmente debe haber una relación entre la superficie y el volumen del fotobiorreactor, maximizando el paso de luz.
- ✓ Evitar diseñar fotobiorreactores de gran escala, ya que generan presión en la base del reactor, dificultando el burbujeo, causando estrés hidrodinámico.
- ✓ El sistema de iluminación debe implementar el uso de diodos led ya que permite simular cualquier régimen de iluminación requerido, al ser programadas se puede hacer uso de cualquier longitud de onda, su luz consume menos energía y genera menos calor que las lámparas incandescentes y tubos fluorescentes.
- ✓ Implementar un sistema de luz basado en la luz blanca o blanca- azul, ya que tiene mayor incidencia en las microalgas, logrando mayores concentraciones de biomasa por unidad de volumen.

ASPECTOS FORMALES, FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES

Referentes formales

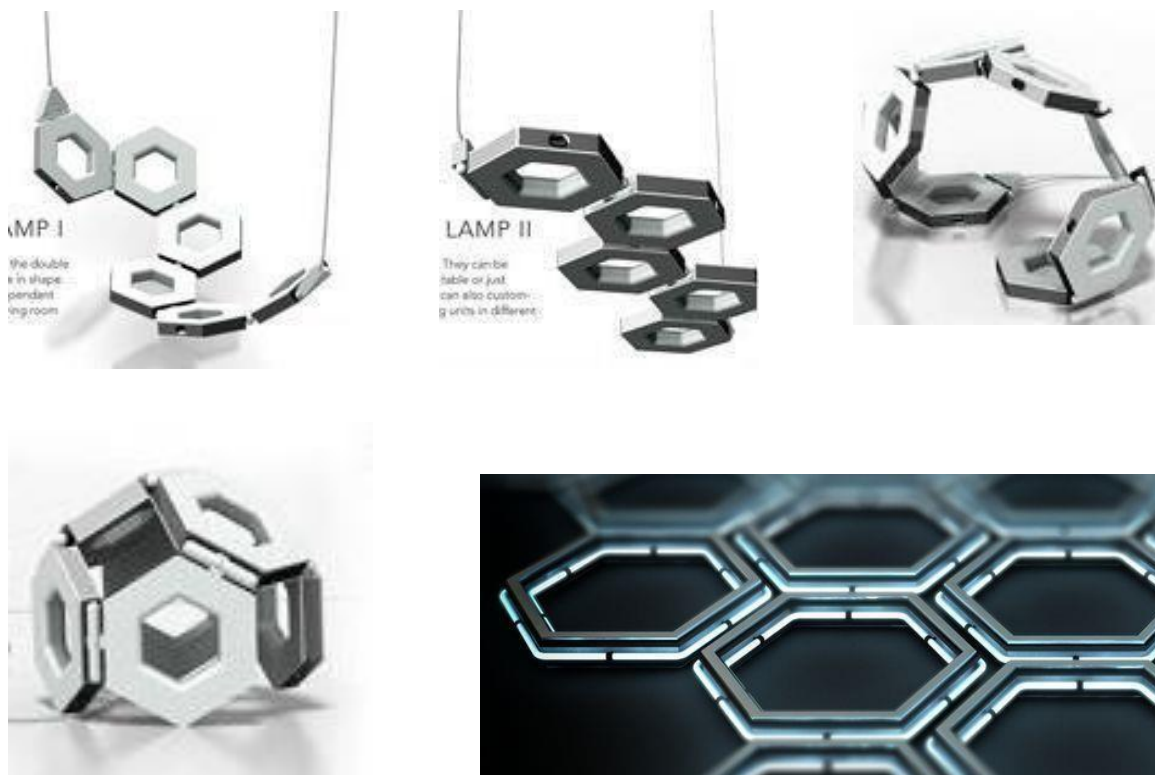


Figura 25. Tile Modular Lighting System. Distribución y Disposición especial de geometrías

Referentes funcionales

Sistema de mezclado y aireación



Figura 26. Referentes de Sistemas de aire
Sistema de iluminación

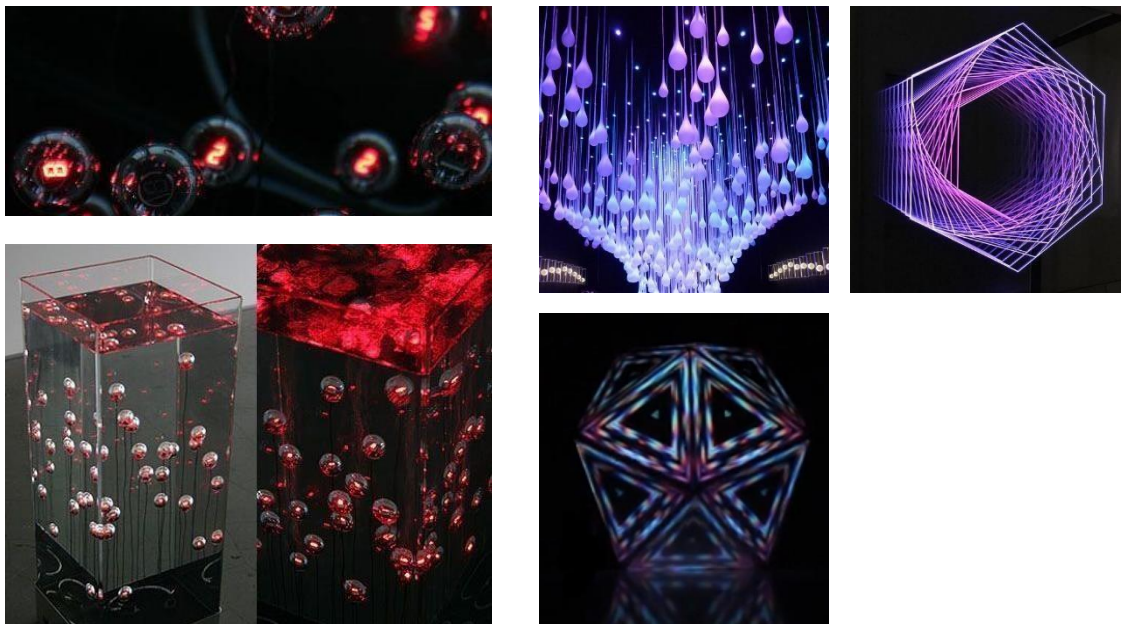


Figura 27. Referentes sistemas de iluminación

Referente estructural

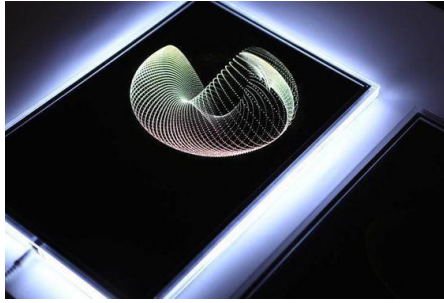
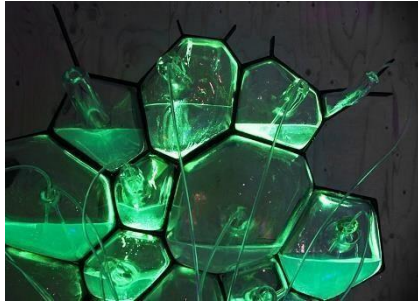


Figura 28. Referentes estructurales



PROPUESTAS INICIALES

Formal / funcional / estructural

Propuesta 1

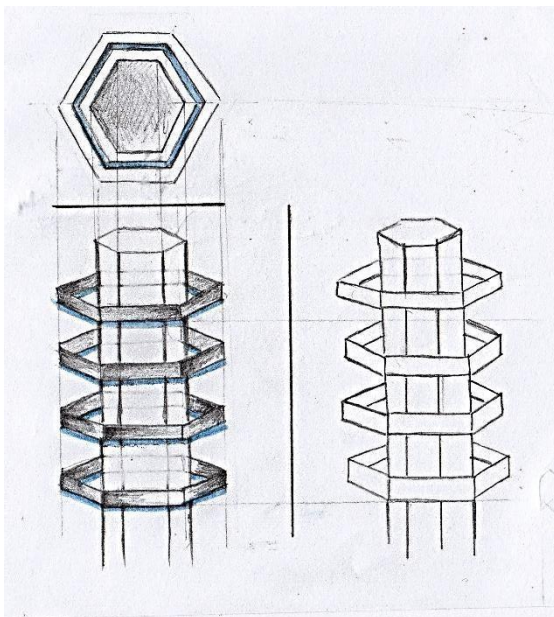
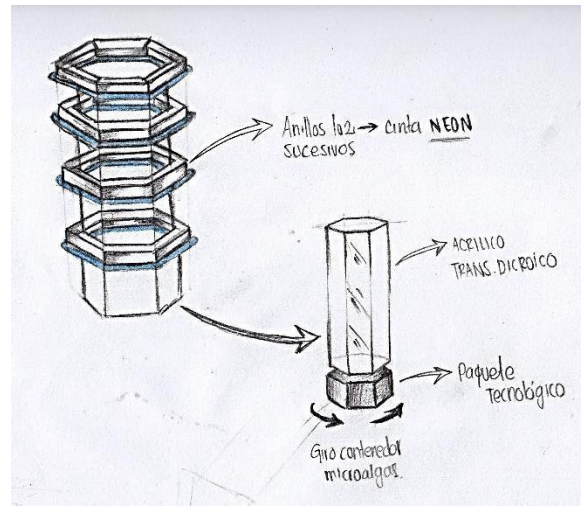
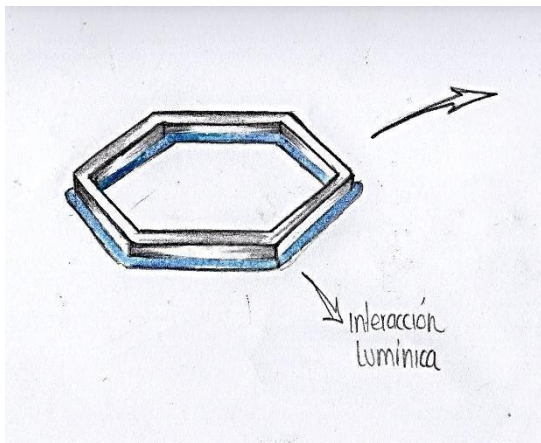


Figura 29. Bocetos propuesta 1

Propuesta 2

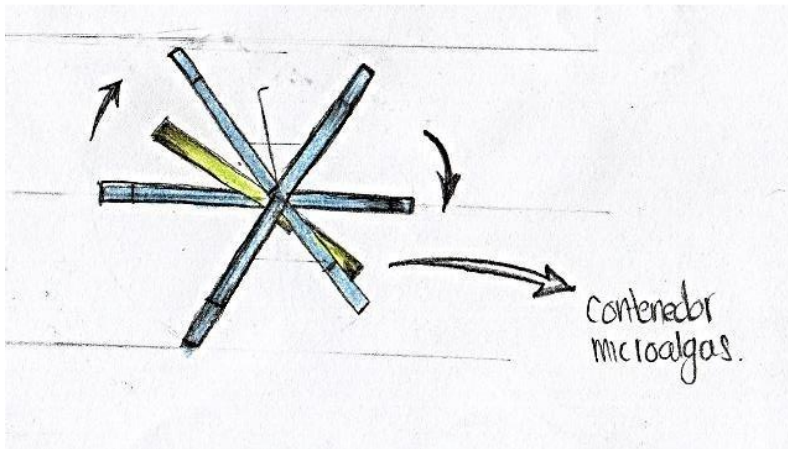
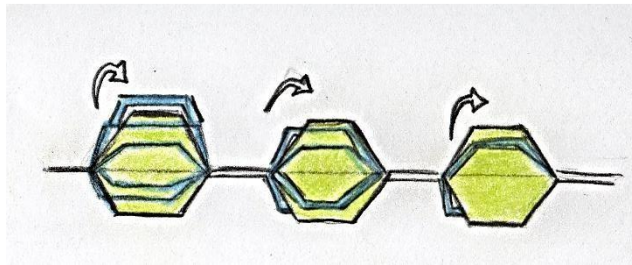
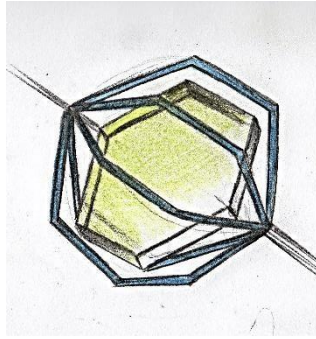
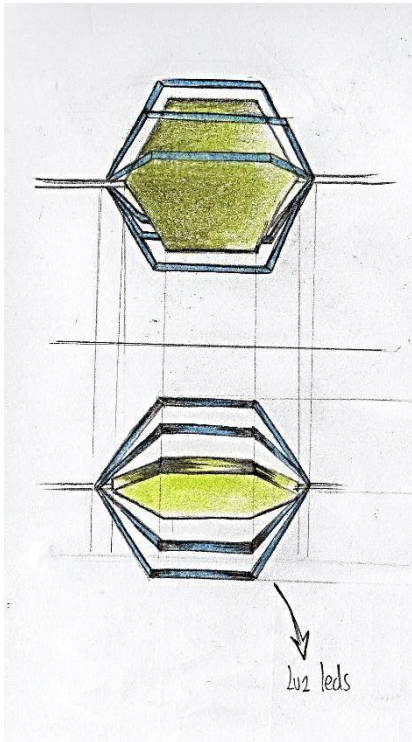


Figura 30. Bocetos propuesta 2

Propuesta 3

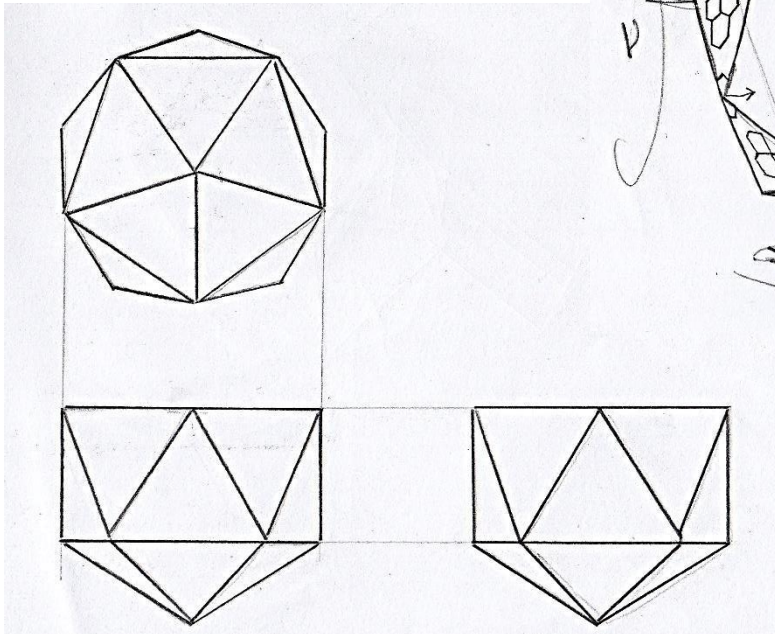
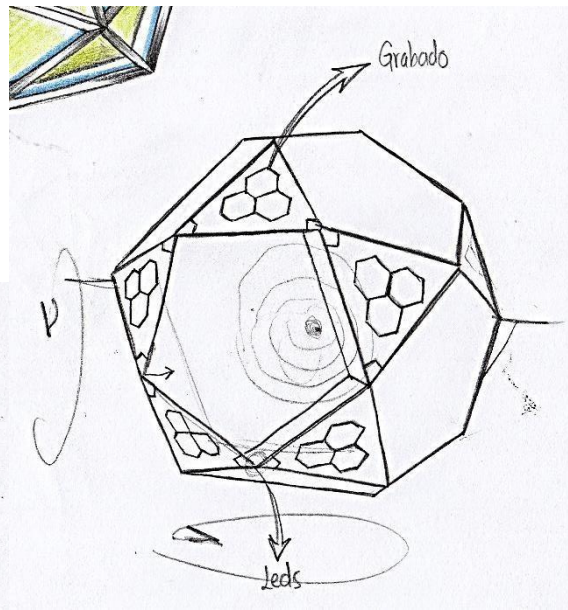
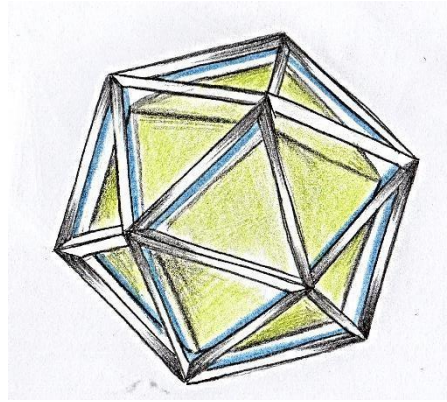
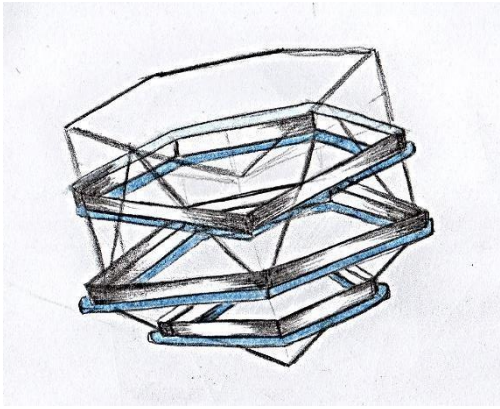


Figura 31. Bocetos propuesta 3

Propuesta 4

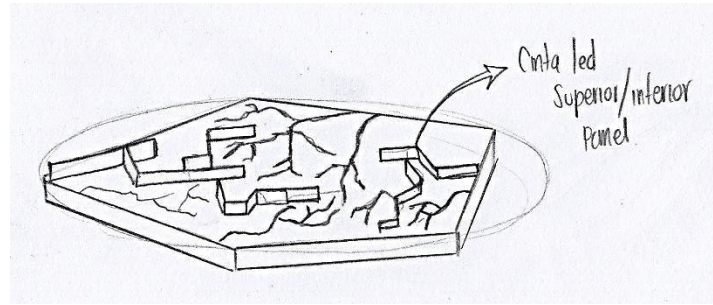
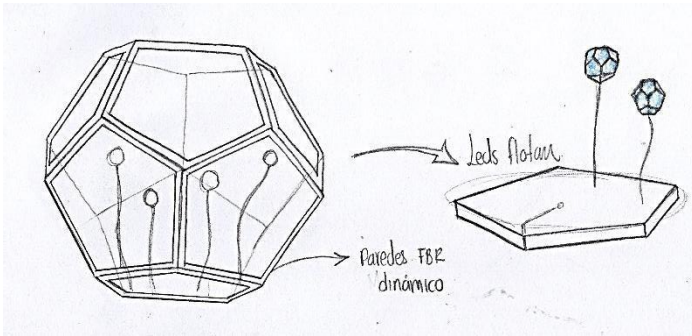


Figura 32. Bocetos propuesta 4

Propuesta 5

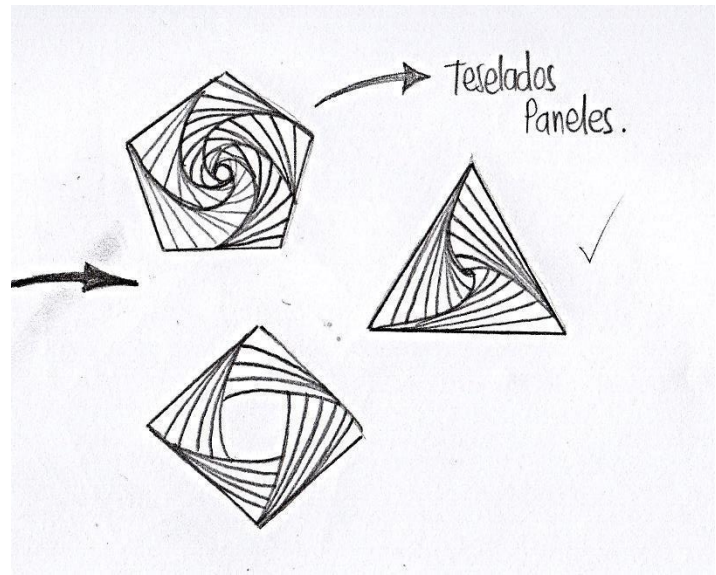
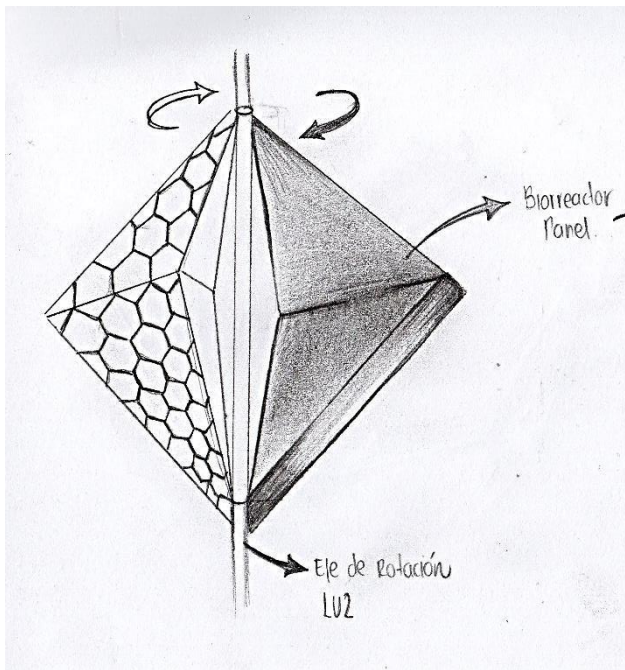


Figura 33. Bocetos propuesta 5

Propuesta 6

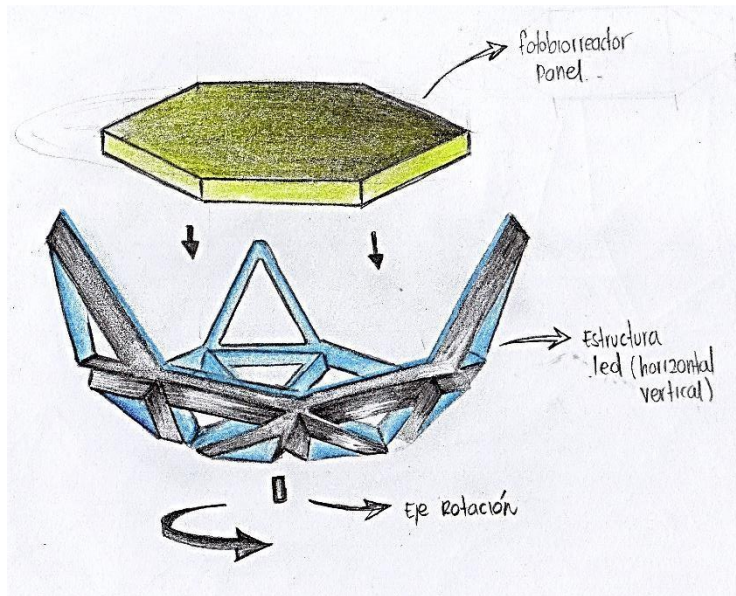


Figura 34. Boceto propuesta 6

Propuesta 7

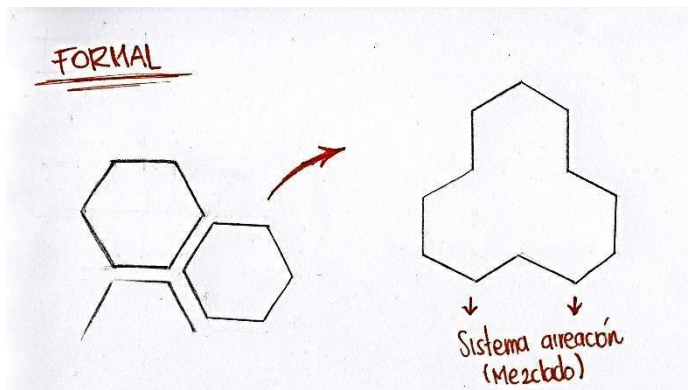
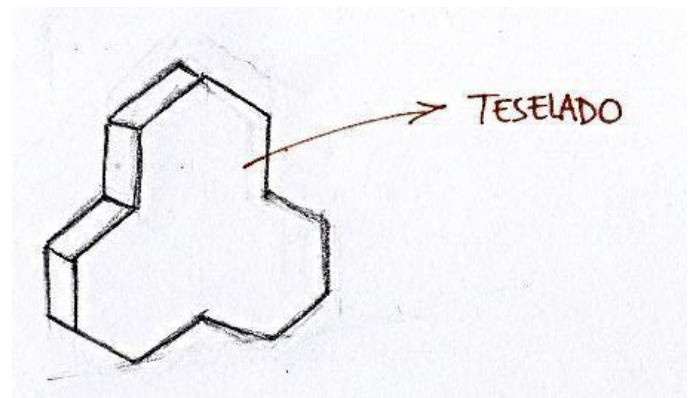


Figura 35. Bocetos propuesta 7



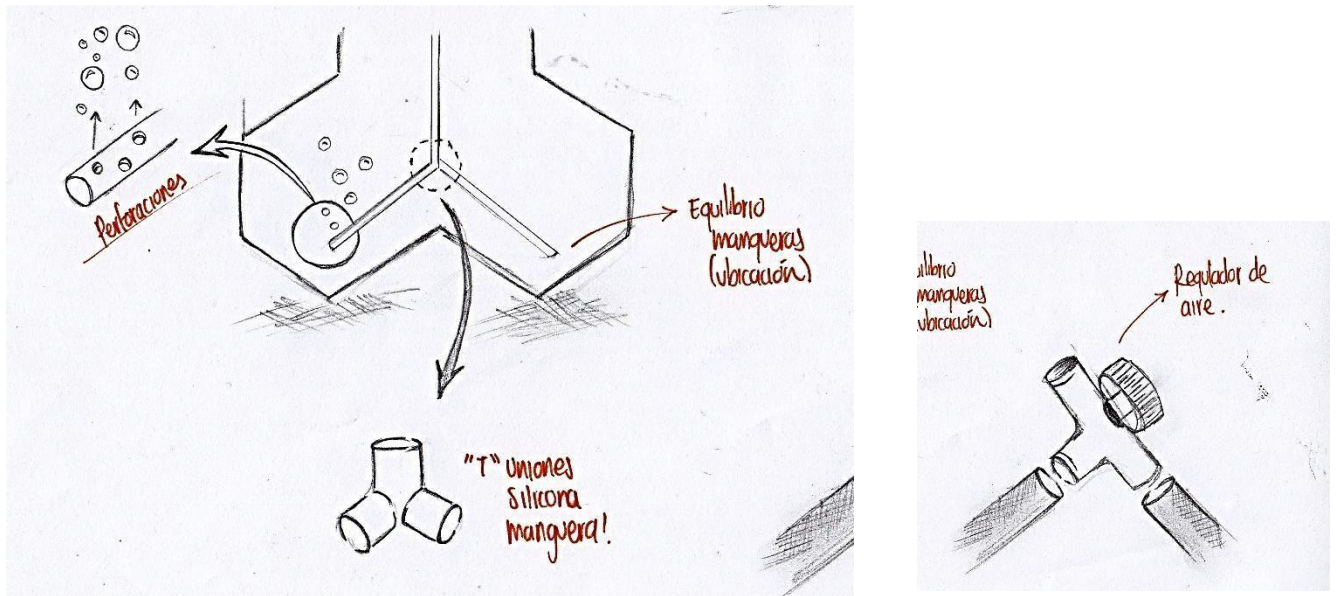


Figura 36. Ubicación elementos necesarios para el diseño de un fotobiorreactor modular

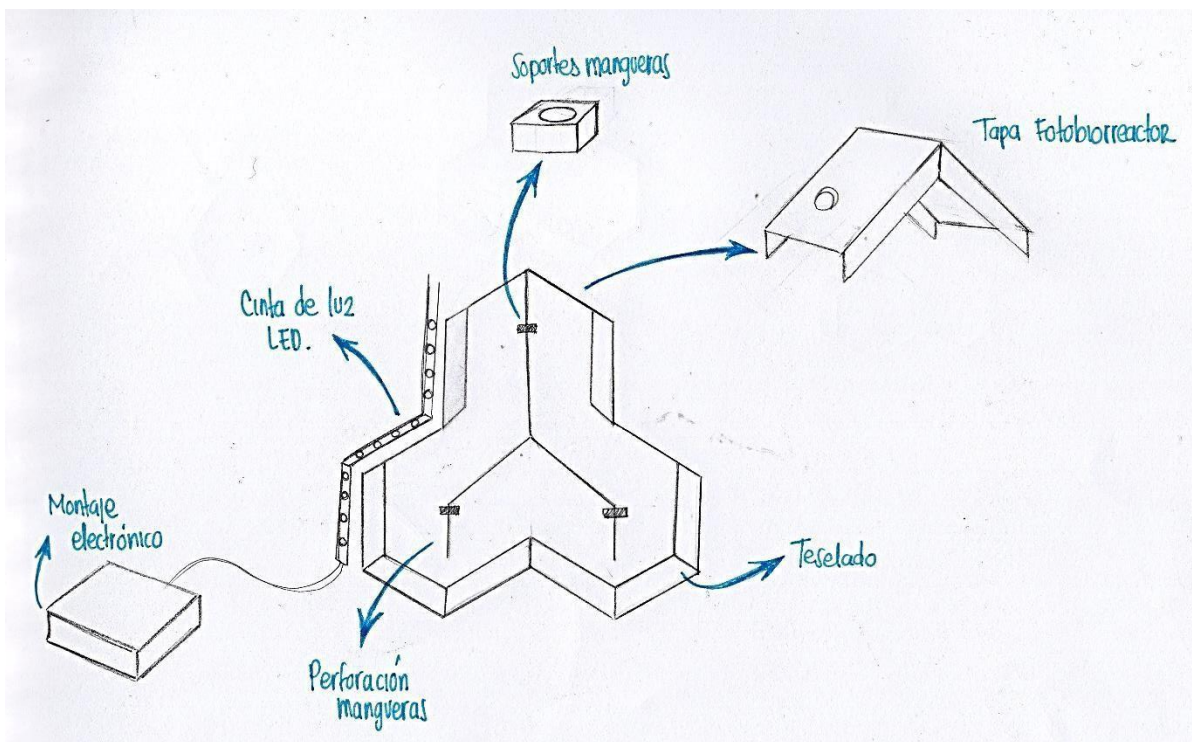


Figura 37. Componentes propuestas final

ELABORACIÓN PROPUESTA NUMERO 7

1. Se eligió el hexágono como forma modular para la creación de fotobiorreactor, al ser una figura geométrica que maneja 6 lados y cuya área tiene mayor provecho en la dispersión de la luz y contención de las microalgas.

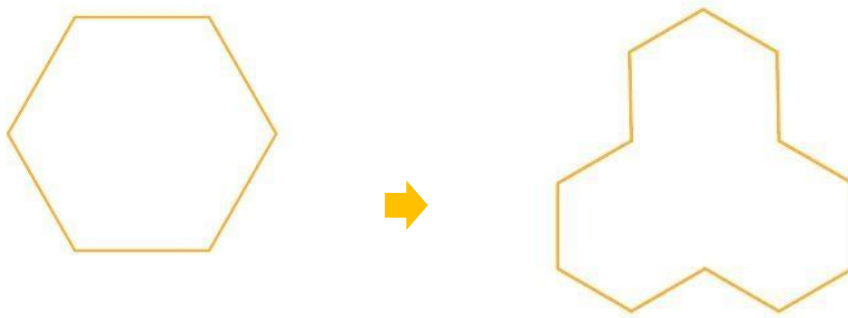
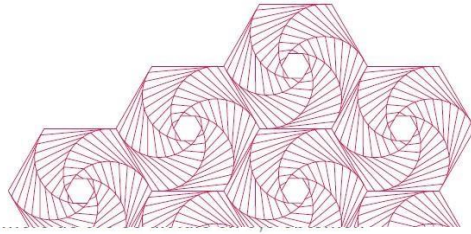


Figura 38. Esquema de modularidad

2. Se manejará un grabado superficial en el fotobiorreactor a partir de la creación de un teselado, con el fin de garantizar la dispersión de la luz, mejorando la proyección e incidencia de la luz, a continuación, se dará a conocer el cómo y porqué del teselado escogido.

06

Se repite el módulo generando un teselado.



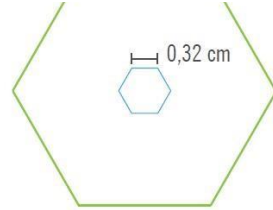
02

do como resultado 0,32, medida del hexágono central interno

$$1,618 / 0,5 \gg 0,32$$



Figura 39. Teselado a partir de pat formales que responden a geometría sagrada numero de oro

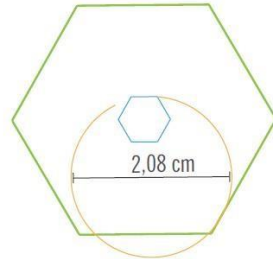


03

La medida del hexágono interno es restada del número de oro, el resultado obtenido multiplica el número aureo dando como resultado 2,08 el diametro de la circunferencia que será utilizada para los arcos del módulo.

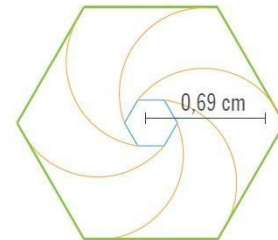
$$1,618 - 0,32 \gg 1,29$$

$$1,618 * 1,29 \gg 2,08$$



04

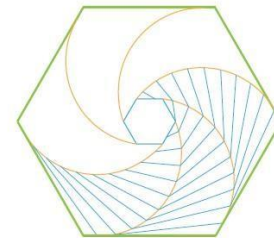
De acuerdo al hexágono interno se repite de manera secuencial el segmento de la circunferencia anteriormente generada.



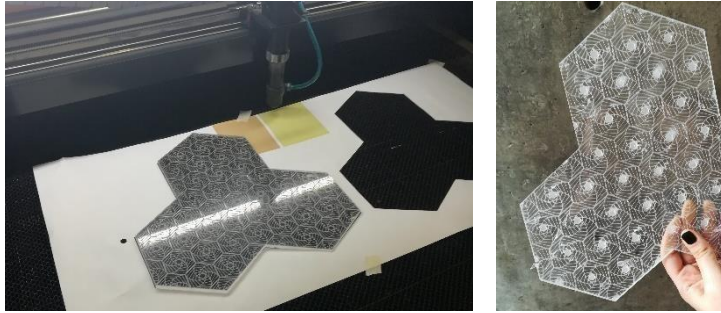
05

La medida del segmento es dividida en 10, dando como resultado 0,16 que serán las divisiones de cada arco para terminar el módulo.

$$1,69 / 10 \gg 0,16$$



3. Corte y grabado laser en acrílico transparente de 5mm de espesor.



4. Ensamble de las diferentes piezas con pegamento para acrílico.



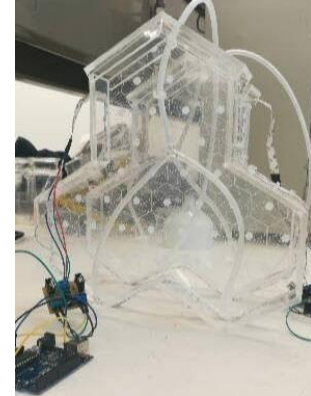
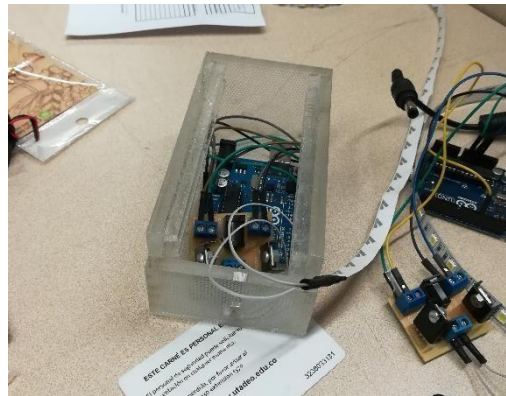
5. Se aplicó silicona fría para evitar posibles filtraciones.



6. Se implementó un sistema de aireación y mezclado, manejando mangueras con perforaciones circulares en la parte inferior de las dos salidas de aire.



7. Para garantizar el proceso de fotosíntesis se realizó un sistema de iluminación a partir de una programación de luz de cinta led blanca.



8. Se realizaron cuatro fotobiorreactores, Fbr (1) Teselado / luz, Fbr (2) Sin teselado / con luz, Fbr (3) Con teselado / Sin luz y Fbr. (4) Sin teselado / Sin luz.



9. Se realizó el medio de cultivo.

10. Se iniciaron los diferentes sistemas en simultaneo, sistema de luz y turbulencia.

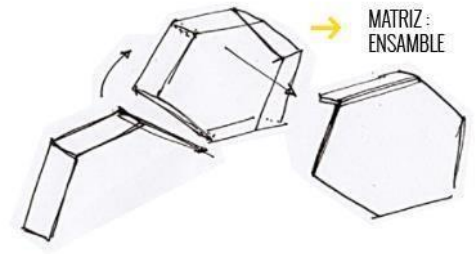
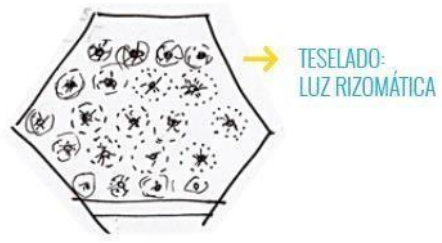
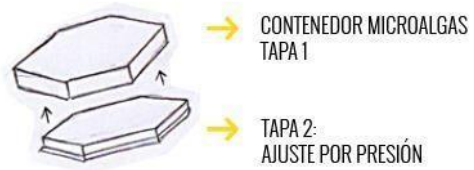
Conclusiones a partir de problemáticas presentadas fotobiorreactores fase 1

- × Es necesario hacer uso de la cámara de luz UV para desesterilizar los fbrs, ya que el agua caliente debilita el contenedor y genera filtraciones.

- × Las luces y el sistema electrónico deben estar alejado del cultivo, debido a que posibles filtraciones generan corto, dañando el sistema de programación.
- × Los diferentes fotoperiodos que estimularon las microalgas generaron resultados diferentes, pero el de 24 H Luz dio mejores resultados.
- × Se genera un aumento de temperatura en el cultivo a causa del sistema electrónico de iluminación, evaporando el cultivo, por lo que es necesario implementar un sistema de saturación de aire.
- × Se realizó un estudio cuantitativo de la radiación de luz en los fbrs, pero en comparación con la luz solar los resultados fueron negativos, por lo que es necesario implementar un sistema de luz adicional.
- × Según el sensor de radiación de luz, el teselado si favorece la dispersión aumentando el nivel de propagación en el área del fotobiorreactor.

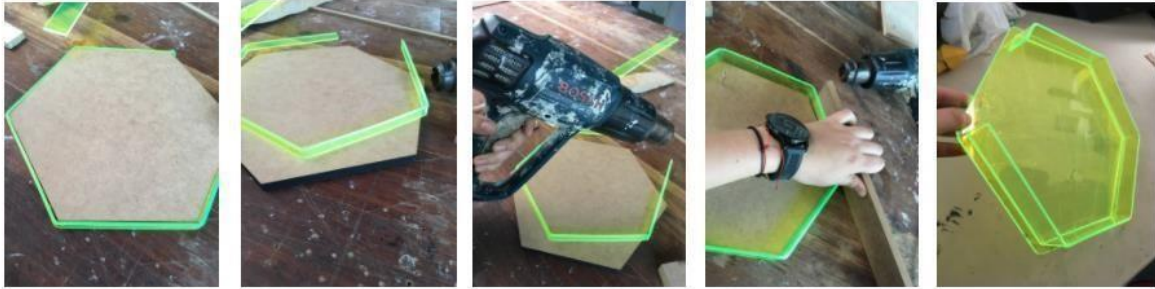
A P O L O: FOTOBIORREACTOR FASE II

A. PROPUESTAS DISEÑO

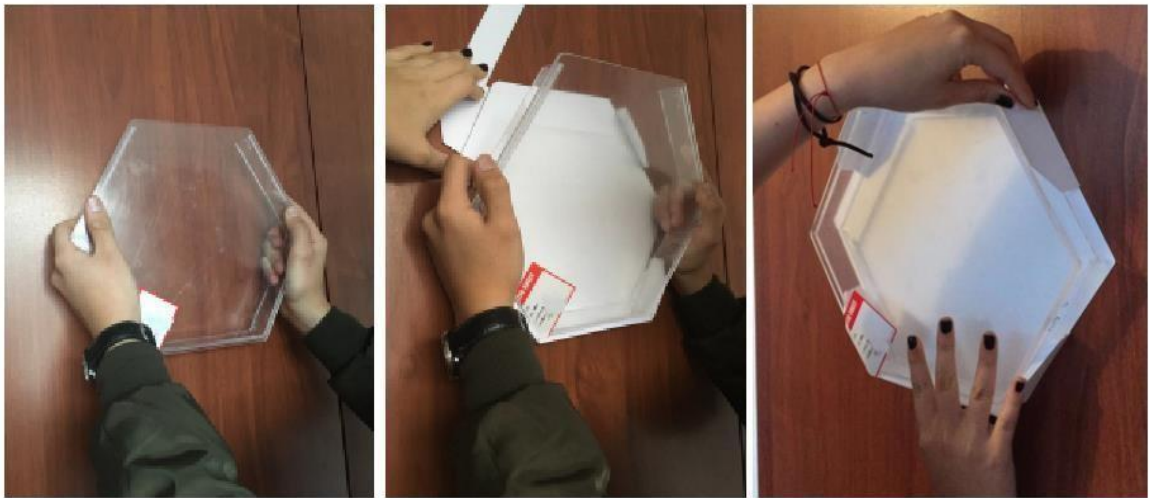


PRUEBAS CONSTRUCCIÓN FOTOBIORREACTOR APOLO

1. Elaboración matriz hexagonal en acrílico de 3 mm. (Prueba)



2. Se realizó en Fusión 360 el plano de la matriz, el cual permitirá un ensamble.

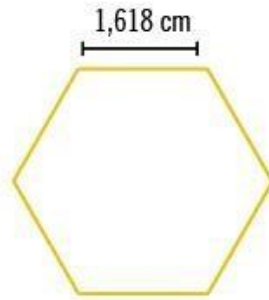


3. Se realizaron pruebas del sistema de ensamble, con el fin de aislar el componente electrónico.

DISEÑO TESELADO: NÚMERO DE ORO

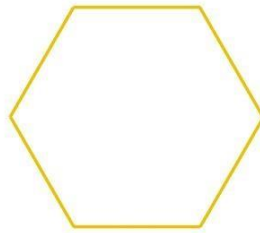
Número irracional, representado por la letra griega ϕ (phi): 1,618033988749

1. Se realizó un hexágono donde sus medidas pertenecen al número de oro.

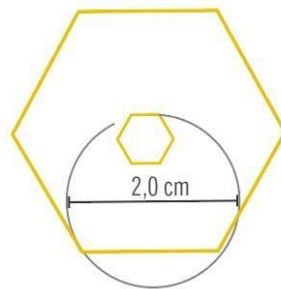


2. El número de oro se dividió en 6 por ser un número perfecto, obteniendo como resultado 0,26

$$1,618 / 6 \rightarrow 0,26$$

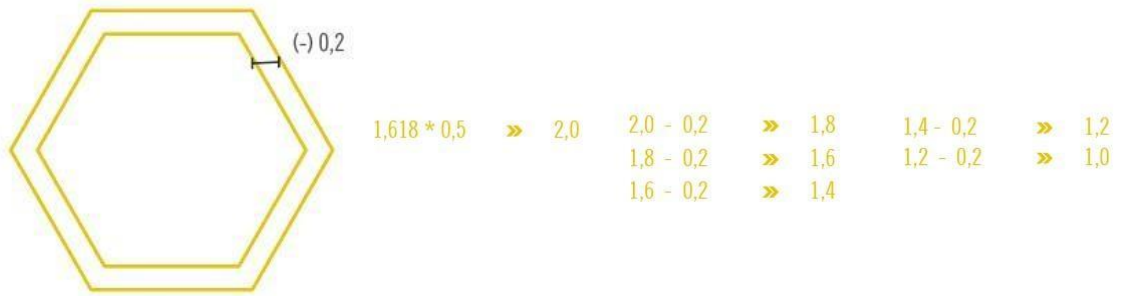


3. El número de oro 1,618 multiplicado por 0,5 da como resultado 2, que corresponde al radio del hexágono inicial.



$$1,618 * 0,5 \gg 2$$

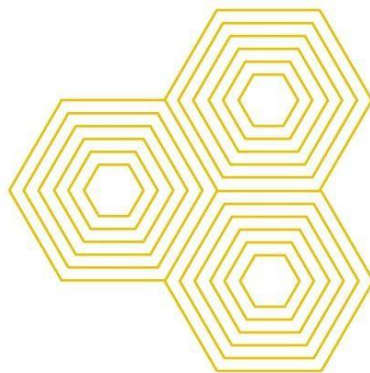
4. Se generó una repetición en secuencia de 6, por lo que los resultados fueron:



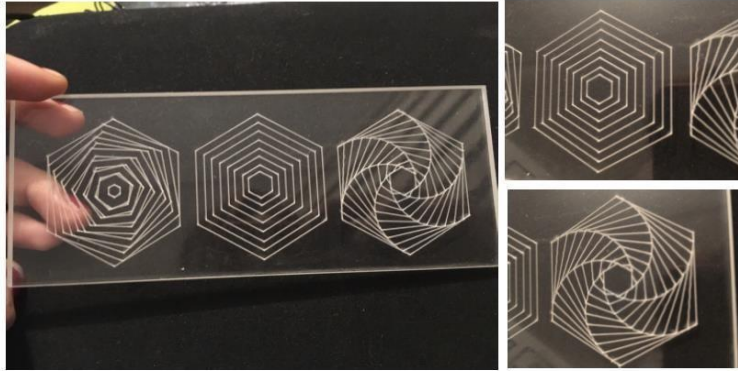
5. Se realizaron los hexágonos teniendo en cuenta los resultados anteriormente obtenidos.



6. Se repite el módulo generando un teselado.



7. Se realizaron varias opciones de teselado, con el fin de determinar cuál tenía una mejor dispersión lumínica.



8. Por medio de grabado laser se realizó el teselado en la superficie del acrílico (5 mm)

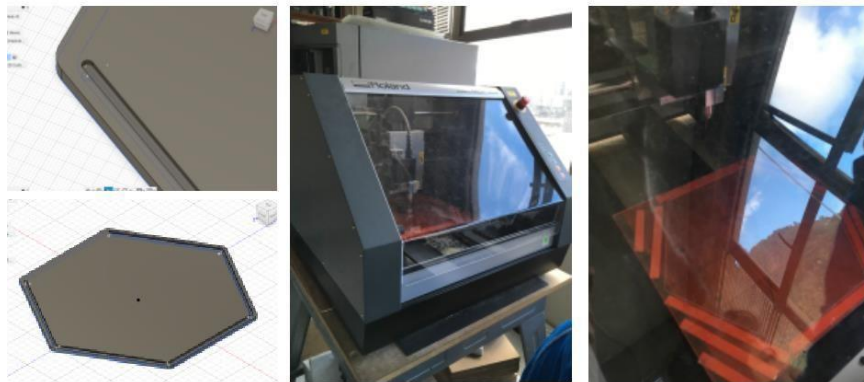


CONSTRUCCIÓN FOTOBIORREACTOR APOLO FASE II

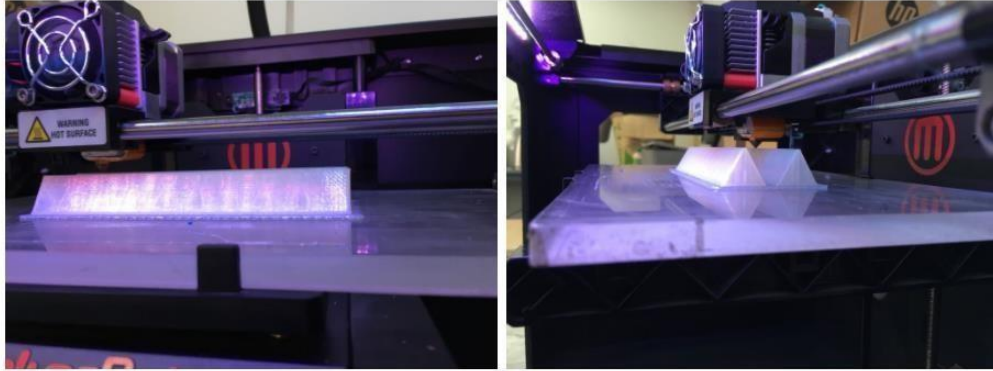
1. Con el fin de garantizar que no existan filtraciones, se realizó una matriz hexagonal, una pieza de acrílico fue doblada siguiendo su forma, reduciendo el número de piezas pegadas y una mayor eficiencia productiva.



2. El ensamble de las diferentes piezas representó un reto, ya que se debía pensar el sistema de ensamble que minimizara las posibilidades de filtraciones en el cultivo, por lo que se realizó un fresado que permitiera encajar las piezas para posteriormente ser pegadas.

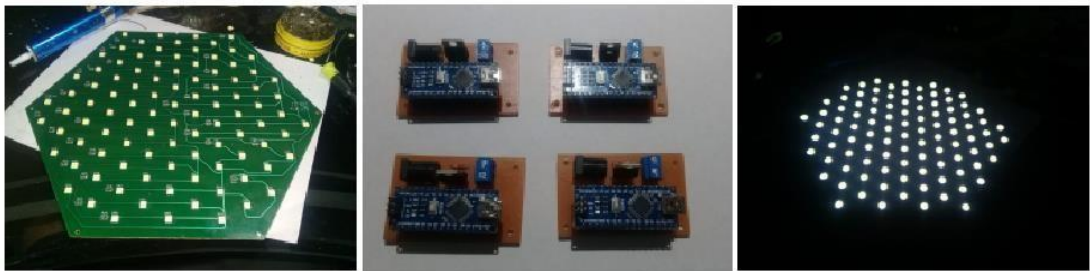


3. Para realizar el sistema de mezclado se hizo una pieza en impresión 3D, modelada en Fusión 360. las perforaciones permiten la salida de aire contante, logrando un movimiento constante.



4. Se realizó una interfaz lumínica rizomática con diodos Led, para estimular fotosintéticamente las microalgas; los componentes electrónicos usados son:

Borneras, TIP 122, Arduino Nano, Conector de poder, Resistencia e impreso.



5. Unión piezas contenedor de microalgas.



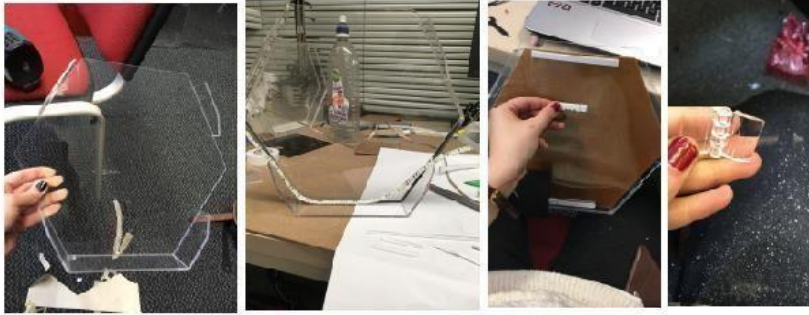
6. Ensamble sistema de mezclado.



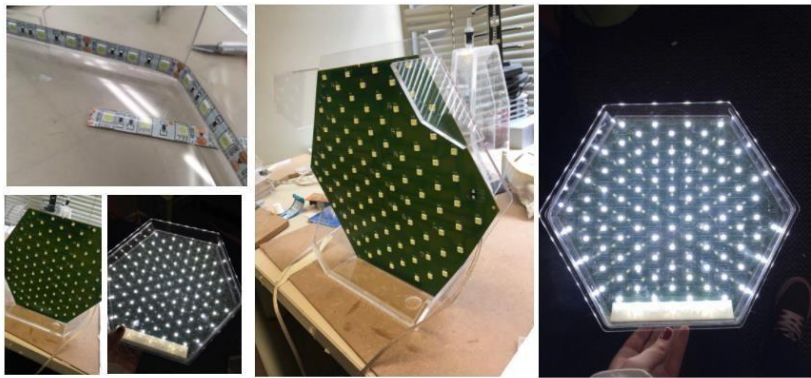
7. Comprobación sistema de mezclado.



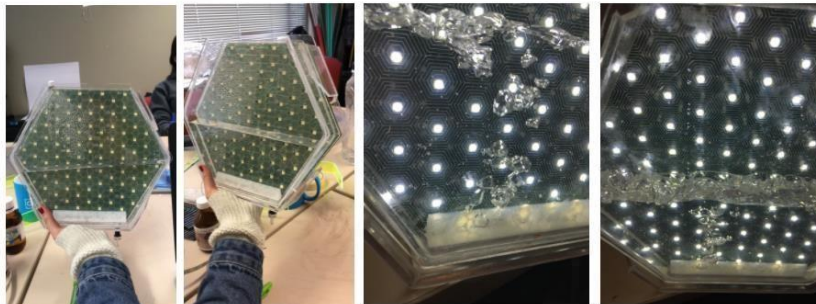
8. Ensamble soporte fotobiorreactores.



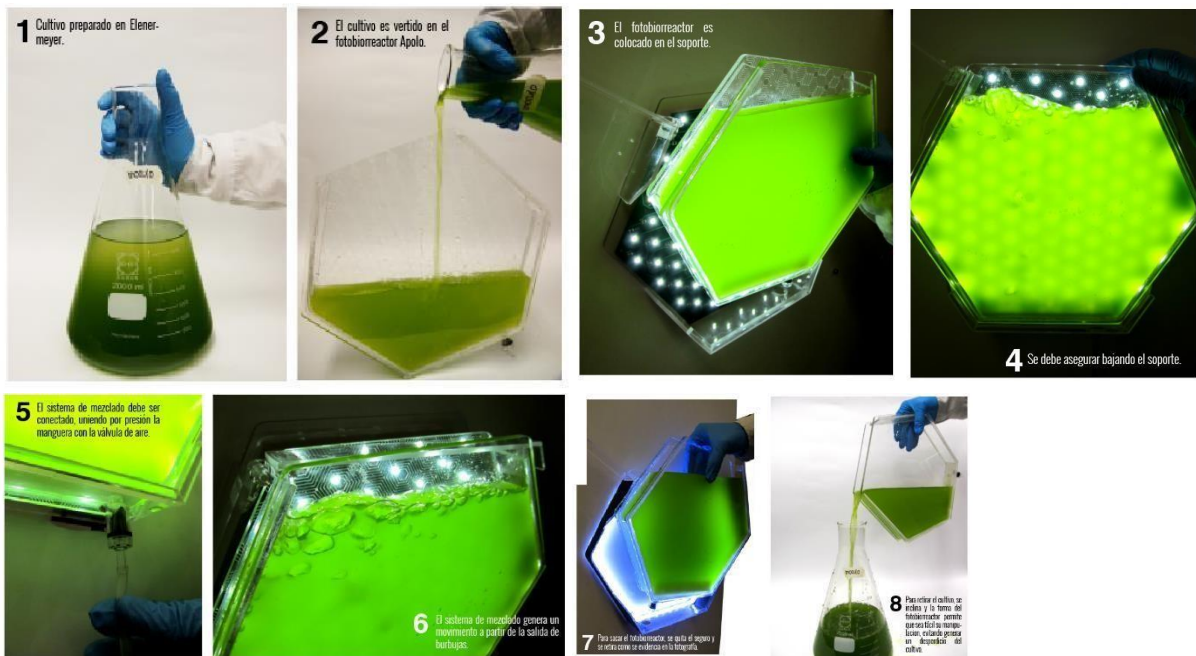
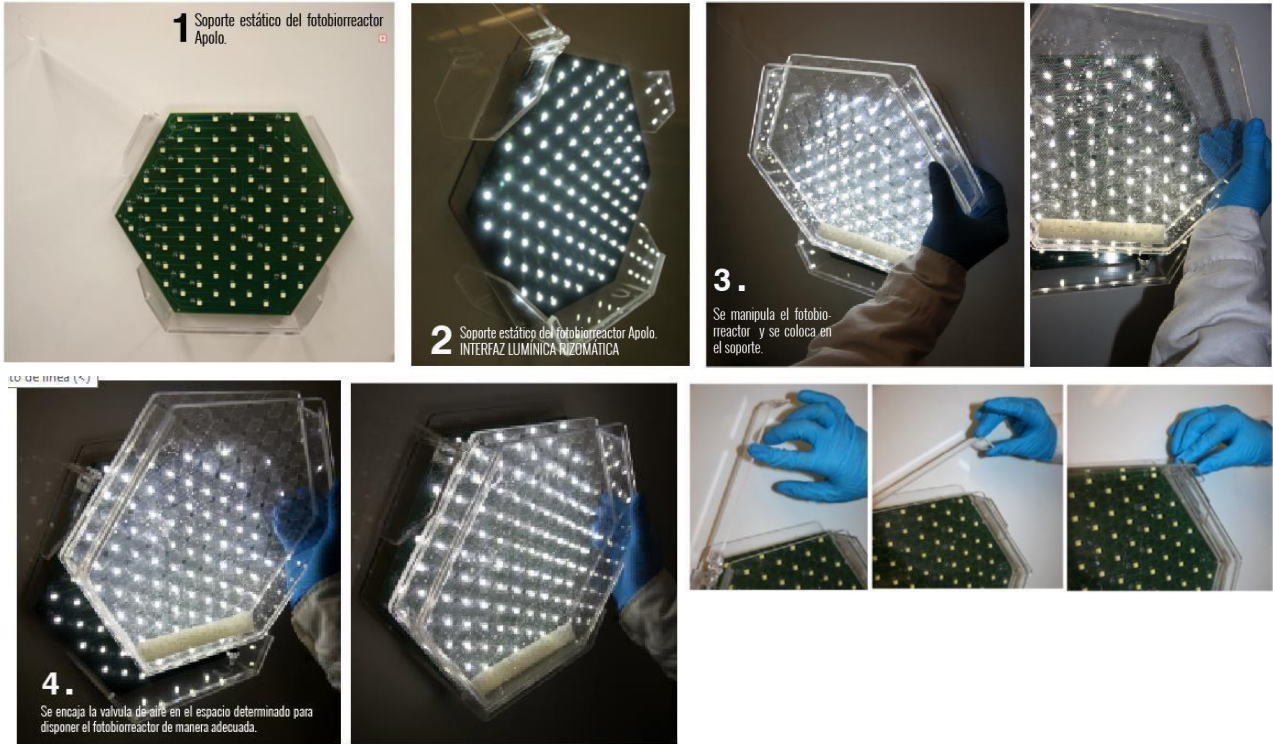
9. Montaje y comprobación componente electrónico.



10. Fotobiorreactor Fase II.

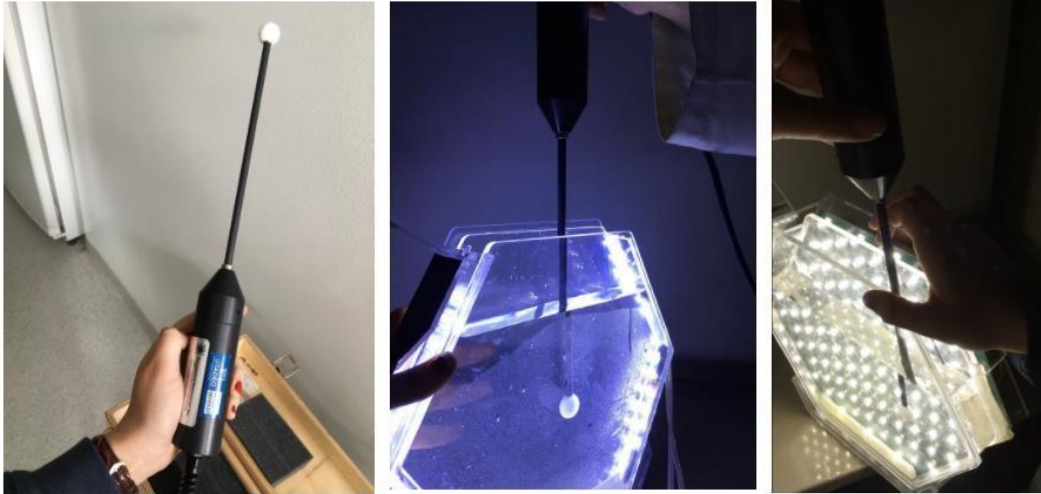


Secuencia de uso



COMPROBACIONES FOTOBIORREACTOR APOLO

Se realizó una prueba de radiación de luz, en el laboratorio de bioprocesos por medio de un sensor de luz.



Los resultados obtenidos en unidades fotométricas (Quanta/cm²) realizados a los dos fotobiorreactores son:



Se puede observar que el fotobiorreactor con teselado tiene una mayor intensidad de luz, en comparación con el que no tiene teselado.

Conclusiones fotobiorreactor Apolo

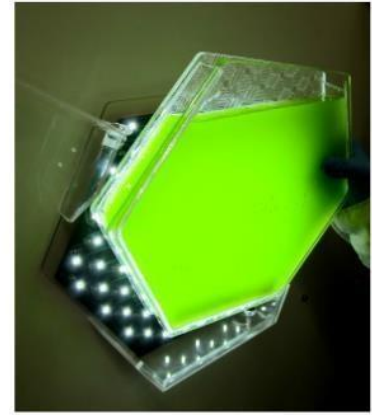
1. el uso de una interfaz lumínica rizomática aumenta la radiación de luz en la superficie del fotobiorreactor, lo que a su vez aumenta la estimulación fotosintética en microalgas.



3,7 QUANTA /
CM²



4,0 QUANTA /
CM²

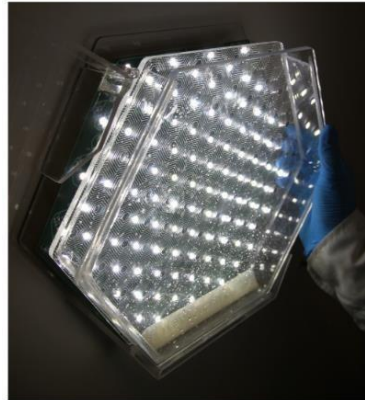


5,6 QUANTA /
CM²

2. El trabajar sistemas modulares permite mejorar la distribución del espacio que debe ser empleado, minimizando costos en relación a la infraestructura necesaria en comparación a los fotobiorreactores convencionales.



3. El empleo de acrílico como material en la construcción de fotobiorreactor genera un menos peso, ayudando en la manipulación.



5. Se realizaron fotobiorreactores a una escala adecuada, con el fin de mejorar su productibilidad, durabilidad y reutilización.
6. Según análisis cualitativo, el intervenir desde el diseño los fotobiorreactores convencionales formal y estructuralmente ha generado respuestas positivas en relación al crecimiento y producción de biomasa.

BIBLIOGRAFÍA

1. Marta. (07/11/2012). *¿Qué es la biomasa?*
Twenergy.<https://twenergy.com/a/que-es-la-biomasa-738>

2. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia. (Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM 2009 Revista de Divulgación Científica. <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>
3. Benavente-Valdés, Roberto & Montanez, Julio & Aguilar, Cristobal & Zavala, Alejandro & Valdivia, B. (2012). Tecnología de Cultivo de Microalgas en Fotobiorreactores. Acta Química Mexicana. 4. 1-12.
4. Benavente-Valdés, Roberto & Montanez, Julio & Aguilar, Cristobal & Zavala, Alejandro & Valdivia, B. (2012). Tecnología de Cultivo de Microalgas en Fotobiorreactores. Acta Química Mexicana. 4. 1-12.
5. Energía primaria. En Wikipedia. Recuperado el 15 de mayo de 2018. https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_primaria
6. (29/12/2016). Recursos no renovables.Significados.com. <https://www.significados.com/recursos-no-renovables>
7. (28/02/2017). Recursos renovables.Significados.com. <https://www.significados.com/recursos-no-renovables>
8. Penélope. (21/07/2015). ¿qué es la energía primaria? Twenergy. <https://twenergy.com/a/que-es-la-energia-primaria-1792>
9. Penélope. (21/07/2015). ¿qué es la energía primaria? Twenergy. <https://twenergy.com/a/que-es-la-energia-primaria-1792>
10. Rodrigo Riquelme. (27/03/2017). 8 datos sobre producción y consumo de energía mundial. El Economista. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/8-datos-sobre-produccionyconsumo-de-energia-mundial-20170327-0126.html>
11. Rodrigo Riquelme. (27/03/2017). 8 datos sobre producción y consumo de

energía mundial. El Economista.

<https://www.economista.com.mx/empresas/8-datos-sobre-produccionyconsumo-de-energia-mundial-20170327-0126.html>

12. Fuentes de energía no renovables. RinconEducativo Energía y Medio Ambiente.

<http://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/fuentesdeenergia-no-renovables>

13. (29/12/2016). Recursos no renovables. Significados.com.

<https://www.significados.com/recursos-no-renovables>

14. Gutiérrez. Rosa M^a. (6/07/2016). BP Statistical Review of World Energy

2016.BP España. https://www.bp.com/es_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2016/bp-statistical-review-world-energy-2016.html

15. La problemática de las energías no renovables. Environmental protection.

http://iesmediterraneogeografia3b.blogspot.com.co/p/blog-page_17.html

16. Erenovable. (24/06/2015). Energías renovables ventajas y

desventajas. Erenovable.com. <https://erenovable.com/energiasrenovablesventajas-y-desventajas/>

17. Plancton Marino Veta la Palma. (27/10/2016). Todo lo que necesitas saber sobre

microalgas. Plancton Marino. <https://planctonmarino.com/microalgas/>

18. Plancton Marino Veta la Palma. (27/10/2016). Todo lo que necesitas saber sobre

microalgas. Plancton Marino. <https://planctonmarino.com/microalgas/>

19. (10/10/2012). Microalgas. EcuRed. <https://www.ecured.cu/Microalgas>

20. Fernández Sevilla, José María. (2014). Microalgas: definición y características.

<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1->

1microalgas.html

21. Martínez García, Lorena. Eliminación de co2 con microalgas autóctonas.

Universidad de León.

<https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/1414/2008ON->

[MART%25CDNEZ%20GARC%25CDA%2C%20LORENA.pdf?sequence=1](https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/1414/2008ON-MART%25CDNEZ%20GARC%25CDA%2C%20LORENA.pdf?sequence=1)

22. Fernández Sevilla, José María. (2014). Microalgas: definición y características.

<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1->

1microalgas.html

23. (10/10/2012). Microalgas.EcuRed. <https://www.ecured.cu/Microalgas>

24. Olguín, Eugenia. (2010). Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel:

retos y oportunidades. Instituto de Ecología.

http://www3.inecol.edu.mx/relbaa/images/docs/loera_olguin_2010_revlatinoam

[biotecnolambalgal_v1n1.pdf](http://www3.inecol.edu.mx/relbaa/images/docs/loera_olguin_2010_revlatinoam)

25. Martinez Garcia, Cristian. (07/12/2015). Biodiesel a partir de microalgas: ventajas y

desventajas. AINEnergía. <http://ainenergia.com/biodiesel-a-partirdemicroalgas-ventajas-y->

[desventajas/](http://ainenergia.com/biodiesel-a-partirdemicroalgas-ventajas-y-)

26.(01/10/2012). Microalgas. Fijación de CO2 y producción de biocombustibles.

Ingenieros.es. <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/microalgas-fijacion->

[deco2y-produccion-de-biocombustibles-p-alginco-2/2882](http://www.ingenieros.es/noticias/ver/microalgas-fijacion-deco2y-produccion-de-biocombustibles-p-alginco-2/2882)

27.(15/07/2010). La biomasa algal, una potente Fuente de energía. Interpresas.

<http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/42002-La-biomasa-algalunapotente->

[fuente-de-energia.html](http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/42002-La-biomasa-algalunapotente-)

28. La fotosíntesis. Botanical. <https://www.botanical-online.com/fotosintesis.htm>

29. (15/07/2010). La biomasa algal, una potente Fuente de energía. Interpresas.

<http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/42002-La-biomasa-algalunapotente-fuente-de-energia.html>

30. Marta. (07/11/2012). *¿Qué es la biomasa?*

Twenergy.<https://twenergy.com/a/que-es-la-biomasa-738>

31.(15/07/2010). La biomasa algal, una potente Fuente de energía. Interpresas.

<http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/42002-La-biomasa-algalunapotente-fuente-de-energia.html>

32. La biomasa en los países en desarrollo: Potencialidades y restricciones.

<http://www.fao.org/docrep/T2363s/t2363s08.htm>

33. Martínez García, Cristian. (07/12/2015). Biodiesel a partir de microalgas: ventajas y desventajas. AINenergía. <http://ainenergia.com/biodiesel-a-partirdemicroalgas-ventajas-y-desventajas/>

34. Martínez García, Cristian. (07/12/2015). Biodiesel a partir de microalgas: ventajas y desventajas. AINenergía. <http://ainenergia.com/biodiesel-a-partirdemicroalgas-ventajas-y-desventajas/>

35. Marta. (07/11/2012). *¿Qué es la biomasa?*

Twenergy.<https://twenergy.com/a/que-es-la-biomasa-738>

36. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia.

(Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM

2009 Revista de Divulgación Científica.

<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>

37. Alexis Hernández Pérez, José I. Labbé. (08/2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* Vol. 49, Nº2: 157-173.
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/revbiolmar/v49n2/art01.pdf>
38. Alicia González Céspedes. (10/2015). ¿Qué son las microalgas? interés y uso. Fundación Cajamar – grupo Cooperativo Cajamar.
<https://www.grupocooperativocajamar.es/recursosentidades/pdf/bd/agroalimentario/innovacion/formacion/materiales-ydocumentos/microalgas-1444391623.pdf>
39. Fernandez Sevilla, Jose Maria. (2014). Microalgas: definición y características.
<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html>
40. Fernandez Sevilla, Jose Maria. (2014). Microalgas: definición y características.
<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html>
41. Fernandez Sevilla, Jose Maria. (2014). Microalgas: definición y características.
<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html>
42. Fernandez Sevilla, Jose Maria. (2014). Microalgas: definición y características.
<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html>
43. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia. (Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM 2009

Revista de Divulgación Científica.

<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>

44. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia.

(Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM

2009 Revista de Divulgación Científica.

<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>

45. Fernandez Sevilla, Jose Maria.(2014).Microalgas: definición y características.

[https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-](https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html)

[1microalgas.html](https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html)

46. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia.

(Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM

2009 Revista de Divulgación Científica.

<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>

47. Fernandez Sevilla, Jose Maria.(2014).Microalgas: definición y características.

[https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-](https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html)

[1microalgas.html](https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1microalgas.html)

48. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia.

(Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM

2009 Revista de Divulgación Científica.

<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>

49. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia.

(Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM

2009 Revista de Divulgación Científica.

<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>

50. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia. (Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM 2009 Revista de Divulgación Científica. <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>
51. J. R. Benavente-Valdés, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, C. N. Aguilar, B. Valdivia. (Ene/Jun 2012). *Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores*. AQM 2009 Revista de Divulgación Científica. <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>
52. Villa, Alina & Herazo, Diana & Torregroza, Ana. (2014). Efecto del fotoperiodo sobre el crecimiento de la diatomea chaetoceros calcitrans (clon c-cal) en cultivos estáticos effect of photoperiod on the growth of diatom Chaetoceros calcitrans (c-cal) in static cultures. Intropica. 9. 10.21676/23897864.1438.
53. Biomasa. En Wikipedia. Recuperado el 14 de mayo de 2018. <https://es.wikipedia.org/wiki/Biomimesis>
54. Geometría Sagrada. En Wikipedia. Recuperado el 11 de mayo de 2018. https://es.wikipedia.org/wiki/Geometría_sagrada
55. Maria Mercedes. (07/11/2018). El hexágono y la flor de la vida. Santuario del Alba. <https://santuariodelalba.wordpress.com/2017/11/07/el-hexagono-y-la-florde-la-vida/>
56. Logica matemática. En Wikipedia. Recuperado el 11 de mayo de 2018. https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%B3gica_matem%C3%A1tica

57. (29/06/2016). El número de Oro (1,61803398874988...). Academia Play.
<https://academiaplay.es/el-numero-de-oro/>
58. Rizoma. En Wikipedia. Recuperado el 11 de mayo de 2018. [https://es.wikipedia.org/wiki/Rizoma_\(filosof%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Rizoma_(filosof%C3%ADa))
59. Aqualgae. (26/10/2018). Aqualgae lanzará en 2016 su nuevo concepto de fotobiorreactor, pensado por y para los laboratorios. Aqualgae.
<http://aqualgae.com/es/productos/lanzamiento-fbr-laboratorio/>
60. Biosoluciones. (2013). Columna de burbujeo. Bioin, Soluciones en Biotecnología y Biomédica.
<http://bioinsoluciones.com/producto.php?idpro=2&idsubpro=36>
61. IPac. (21/10/2016). Luces de diodo en columnas de burbujeo al servicio de la producción de microalgas. [Ipac.acuicultura](http://www.ipacuicultura.com).
http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_en_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html
62. (2017). Fotobiorreactor autónomo para cultivo de algas. SVMAC.
<https://svmac.es/es/project/fotobiorreactor-autonomo-para-cultivo-de-algas/> 63.
- M.C. Carlos Francisco González Hernández, M.C. Manuel de Jesús Sol Hernández, Dr. Miguel Ángel Franco Nava. (06/2014). Estimación de Iluminación en un Fotobiorreactor Productor de Biomasa a partir de Microalgas. Conciencia tecnológica. <http://www.redalyc.org/html/944/94431297004/>
64. Gutiérrez-Mosquera, Ocampo-Gómez, Montoya-Barreto y Sánchez-Toro: Efecto de tres tipos de luz sobre el crecimiento de microalgas de *Scenedesmus* sp. <http://iicta.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2017/02/1190D150.pdf>

TABLA DE FIGURAS

1. Silva Rodrigo. (2016). Consumo de energía primaria en el mundo. [Figura 1]. Recuperado de https://elpais.com/elpais/2016/10/07/media/1475860979_972896.html
2. Martin. (2010). Diagrama esquemático de la fotosíntesis. [Figura 2]. Recuperado de <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>
3. Ainenergía. Rendimiento de la productividad de aceite en función de la superficie para diferentes cultivos. [Figura 3]. Recuperado de <http://ainenergia.com/biodiesel-a-partir-de-microalgas-ventajasydesventajas/>
4. Uruguay Visión Marítima. (2013). Fotobiorreactor abierto. [Figura 4]. Recuperado de <http://www.visionmaritima.com.uy/noticias/ecologianoticias/microalgascomo-fuente-de-energia-y-limpieza-de-aguascontaminadas/>
5. José Mara Fernández Sevilla. (2014). Fotobiorreactor de columna. [Figura 5]. Recuperado de <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1--generalidades/1-7-fotobiorreactores.html>
6. Revista Nuestro Mar. (2015). Fotobiorreactor plano. [Figura 6]. Recuperado de <http://www.revistanuestromar.cl/investigacion/instalan-proyectodemicroalgas-que-captura-gases-de-efecto-invernadero-en-elsectorindustrial-de-ventanas/>
7. Algaenergy. Fotobiorreactor tubular. [Figura 7]. Recuperado de http://www.algaenergy.es/dt_gallery/fotos-ptem/
8. Martin. (2010). Ilustración de la trayectoria de la luz y de los ciclos luz oscuridad. [Figura 8]. Recuperado de <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>

9. Aqualgae. Fotobiorreactor para laboratorios. [Figura 9]. Recuperado de <http://aqualgae.com/es/microalgas-2/>
10. Aqualgae. Fotobiorreactor para laboratorios. [Figura 10]. Recuperado de <http://aqualgae.com/es/microalgas-2/>
11. Aqualgae. Forma y estructura fotobiorreactor Aqualgae. [Figura 11]. Recuperado de <http://aqualgae.com/es/microalgas-2/>
12. Aqualgae. Sistema de iluminación fotobiorreactores Aqualgae. [Figura 12].
Recuperado de <http://aqualgae.com/es/microalgas-2/>
13. Análisis formal, estructural y funcional de fotobiorreactor Aqualgae. [Figura 13]
14. Biotecnología. (2013). Fotobiorreactor tipo columna de burbujeo. [Figura 14].
Recuperado de <http://bioinsoluciones.com/producto.php?idpro=2&idsubpro=36>
15. Análisis formal, estructural y funcional de fotobiorreactor de columna de burbujeo.
[Figura 15]
16. Ipac. (2016). Equipo de la Universidad de Almería, responsable del estudio.
Fundación Descubre responsable del fotobiorreactor con diodos led. [Figura 16].
Recuperado de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_e_n_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html
17. Ipac. (2016). Fotobiorreactor en columna de burbujeo con iluminación LED. Dispositivo utilizado en los ensayos. Fundación Descubre. [Figura 17].
Recuperado de

http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_e_n_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html

18. SVMAC. (2017). Fotobiorreactor autónomo para cultivo de algas. [Figura 18]. Recuperado de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_e_n_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html
19. SVMAC. (2017). Características fotobiorreactor autónomo para cultivo de algas. [Figura 19]. Recuperado de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_e_n_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html
20. SVMAC. (2017). Disposición formal fotobiorreactor de algas. [Figura 20]. Recuperado de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_e_n_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html
21. SVMAC. (2017). *Demanda en consumo del fotobiorreactor (W/día)*. [Figura 21]. Recuperado de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_e_n_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html
22. SVMAC. (2017). Alturas para la medición de luz y volúmenes del fotobiorreactor. [Figura 22]. Recuperado de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_e_n_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html

23. SVMAC. (2017). Vista superior del fotobiorreactor con la base metálica y los focos led.. [Figura 23]. Recuperado de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_en_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html
24. SVMAC. (2017). Vista superior del fotobiorreactor con 10 LED. [Figura 24]. Recuperado de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/51751/luces_de_diodo_en_columnas_de_burbujeo_al_servicio_de_la_produccion_de_microalgas.html
25. Tile Modular Lighting System. Distribución y Disposición especial de geometrías. [Figura 25]. Recuperado de https://www.coroflot.com/cdesign/tile?school_id=64341&experience_range=2&
26. Referentes de sistemas de aire. [Figura 26].
27. Referentes de sistemas de iluminación. [Figura 27].
28. Referentes estructurales. [Figura 28].
29. Bocetos propuesta 1. [Figura 29].
30. Bocetos propuesta 2. [Figura 30].
31. Bocetos propuesta 3. [Figura 31].
32. Bocetos propuesta 4. [Figura 32].
33. Bocetos propuesta 5. [Figura 33].
34. Bocetos propuesta 6. [Figura 34].
35. Bocetos propuesta 7. [Figura 35].

36. Ubicación elementos necesarios para el diseño de un fotobiorreactor modular. [Figura 36].

37. Componentes propuesta final. [Figura 37].

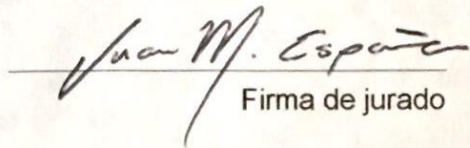
38. Esquema de modularidad. [Figura 38].

Nota de aprobación

5.0



Firma presidente de jurado



Firma de jurado



Firma de jurado

