

## **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

**JEFATURA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**"EVALUACIÓN Y MEJORA DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA Y ENSAMBLE DE  
UN FOTOBIORREACTOR DE PANEL ONDULADO"**

### **TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO INDUSTRIAL**

**PRESENTA**

**JESÚS ALBERTO MAZAS RAMOS**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. JOSÉ ALFREDO CARAZO LUNA**

**CODIRECTOR DE TESIS**

**M.C. MOISÉS MANZANO HERRERA**

**ASESOR**

**DR. ROGELIO VALADEZ BLANCO**

**HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, JUNIO DE 2025**



## **DEDICATORIA**

A mi madre, Evelin,  
por estar en cada paso,  
por enseñarme, con tu ejemplo, que la constancia también es amor  
y que los sueños se defienden con trabajo, aunque cueste.

Esta meta también es tuya.



## AGRADECIMIENTOS

Este logro no habría sido posible sin el respaldo, guía y afecto de personas que, de distintas maneras, marcaron profundamente este trayecto.

A mi mamá, mi abuela y mi hermano, por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y su constante apoyo. Han sido el pilar más firme en mi vida y también en este proceso académico. Al Lic. Balduino Flores y Flores, por estar presente en los momentos clave de este camino. Su acompañamiento y disposición han sido valiosos en más formas de las que caben aquí.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional en esta casa de estudios, que también se volvió hogar durante estos años.

Al Mtro. Moisés Manzano Herrera, por su inagotable paciencia, su compromiso genuino y el tiempo dedicado a guiarme con claridad y confianza durante el desarrollo de este proyecto.

A mi codirector, el Dr. José Alfredo Carazo Luna, por su acompañamiento cercano, su disposición constante y sus valiosas observaciones en esta última etapa, que fueron justo el impulso que necesitaba. Al Dr. Rogelio Valadez Blanco, por compartir su experiencia y conocimientos, y por su apoyo práctico durante la fase experimental del proyecto.

Al Dr. Álvaro Jesús Mendoza Jasso, al Dr. Carlos Vázquez Cid de León y al Dr. Salvador Montesino González, por sus observaciones y aportaciones durante la etapa de revisión. Agradezco profundamente el tiempo que dedicaron a la lectura de este trabajo, así como sus sugerencias, que contribuyeron significativamente a mejorar su calidad.

Agradezco también a los técnicos de los distintos talleres, especialmente al del taller de plásticos, cuya asistencia fue esencial en la implementación de varias etapas del proceso experimental. Su experiencia práctica y buena disposición marcaron una diferencia importante.

Finalmente, agradezco a todas las personas que se tomen el tiempo de leer esta tesis. Su interés y atención no solo dan sentido al esfuerzo invertido, sino que también impulsan la razón de ser de este trabajo: compartir conocimiento y contribuir, desde lo que está al alcance, a una mejora colectiva.

Este trabajo es testimonio de que la constancia, incluso en medio de la incertidumbre, rinde frutos.



## RESUMEN

El fotobiorreactor es un elemento clave en el cultivo controlado de microalgas, utilizadas en la producción de alimentos, bioinsumos, medicamentos y biocombustibles, así como en procesos ambientales como la biorremediación y el tratamiento de aguas. Su uso se ha vuelto cada vez más relevante en industrias que buscan soluciones sustentables, ya que permiten un control más preciso de las variables biotecnológicas que afectan el crecimiento de microalgas, en comparación con cultivos abiertos.

En este contexto, la Universidad Tecnológica de la Mixteca desarrolló un prototipo de fotobiorreactor de panel ondulado, el cual presentó oportunidades de mejora en sus procesos de manufactura durante su uso en distintos experimentos.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar y mejorar dicho prototipo aplicando la metodología de diseño y desarrollo de productos de Ulrich y Eppinger, apoyada en herramientas propias de la ingeniería industrial, como el Diagrama de Ishikawa, el QFD y el AMEF. A través de este enfoque, se identificaron causas raíz, se tradujeron requerimientos del usuario en especificaciones técnicas y se priorizaron fallas críticas.

Las mejoras implementadas incluyeron cambios en el sistema de aireación, sellado, accesibilidad interna y selección de materiales, lo que permitió obtener tiempos de operación representativos, facilitar tareas de mantenimiento, mejorar la confiabilidad del equipo y se generó documentación técnica que facilita su replicabilidad. El proyecto representa un aporte al fortalecimiento de tecnologías sustentables dentro del programa institucional de Energías Renovables y Productos Sustentables.

**Palabras clave:** Fotobiorreactor, microalgas, ingeniería industrial, tecnología sustentable, mejora de procesos



# ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	3
1.1    Planteamiento del problema .....	3
1.2    Justificación .....	5
1.3    Hipótesis .....	8
1.4    Objetivos .....	8
1.4.1    Objetivo general.....	8
1.4.2    Objetivos específicos y metas.....	8
1.5    Limitaciones .....	11
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	13
2.1    Microalgas.....	13
2.2    Sistemas de cultivo .....	15
2.2.1    Sistemas abiertos .....	16
2.2.2    Sistemas cerrados .....	16
2.3    Herramientas de la ingeniería industrial.....	17
2.3.1    Diagrama causa y efecto .....	18
2.3.2    AMEF .....	20
2.3.3    QFD .....	23
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....	29
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....	31
4.1    FASE 0: PLANEACIÓN.....	31
4.2    FASE 1: DESARROLLO DEL CONCEPTO .....	36
4.2.1    Diagrama de Ishikawa .....	36
4.2.2    Análisis de los diagramas de Ishikawa .....	38
4.2.3    Análisis de modo y efecto de fallos.....	47

4.3 FASE 2: DISEÑO EN EL NIVEL SISTEMA .....	57
4.4 FASE 3: DISEÑO DE DETALLE.....	68
4.4.1 HoQ .....	68
4.4.2 Necesidades del cliente .....	68
4.4.3 Atributos medibles .....	73
4.4.4 Especificaciones técnicas.....	79
4.4.5 Planos CAD .....	85
4.4.6 Documentación de los principales procesos .....	86
4.4.6.1 Manuales de procedimiento .....	86
4.4.6.2 Diagrama de flujo - Diagrama de procesos .....	86
4.4.6.3 Tablas de tiempo.....	87
4.4.6.4 Fichas técnicas del material utilizado .....	88
4.4.7 Partes, formas, medidas y funciones del FBR analizadas.....	88
4.4.7.1 Contenedor de microalgas .....	88
4.4.8 Cumplimiento de las fases metodológicas .....	90
4.5 FASE 4: PRUEBAS Y REFINAMIENTO.....	92
4.5.1 Validación de las mejoras implementadas .....	92
4.5.1.1 Modificación del orificio del panel frontal.....	95
4.5.1.2 Ajuste de dimensiones de las soleras de hule espuma.....	97
4.5.1.3 Mantenimiento del molde de mdf previo al termoformado.....	99
4.5.1.4 Sustitución de silicón acético por cianocrilato en la unión de soleras y paneles de acrílico.....	100
4.5.2 Análisis de tiempos de las mejoras implementadas .....	103
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....	107
5.1 Trabajos futuros.....	108
5.2 Recomendaciones .....	109
REFERENCIAS .....	111
ANEXOS .....	117

ANEXO A. TIEMPOS REALIZADOS POR GERARDO RUBÉN RODRÍGUEZ CAMACHO Y GERARDO BALLESTEROS BRISEÑO .....	117
ANEXO B. DIAGRAMAS DE ISHIKAWA .....	119
ANEXO C. MATRIZ HoQ.....	123
ANEXO D. MANUALES DE PROCEDIMIENTOS .....	128
ANEXO E. DIAGRAMAS DE FLUJO .....	181
ANEXO F. TABLAS DE TIEMPO .....	190

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Prototipo PBR-GRRC17 .....	3
Figura 2.	Prototipo PBR-GBB19 .....	4
Figura 3.	Micrografía de Microalga Chlorella sp en microscopio óptico.....	14
Figura 4.	Parámetros determinantes en la productividad de microalgas .....	15
Figura 5.	Diagrama de Ishikawa .....	20
Figura 6.	Formato AMEF .....	23
Figura 7.	Las cuatro fases del modelo de QFD .....	25
Figura 8.	Casa de la calidad (HOQ).....	26
Figura 9.	Matrices del QFD.....	28
Figura 10.	Las seis fases del proceso genérico de desarrollo de producto .....	30
Figura 11.	Diagrama de la adaptación de la metodología a utilizar .....	30
Figura 12.	Diagrama de Ishikawa de puesta en marcha y operación del GBB19.	
	.....	37
Figura 13.	Modificación de orificio en la placa del fotobiorreactor.....	85
Figura 14.	Contenedor de microalgas del FBR con difusores de aire.....	89
Figura 15.	Cinética de crecimiento .....	93
Figura 16.	Vista del orificio en el panel frontal del contenedor de microalgas del FBR.....	96
Figura 17.	Orificio modificado en el panel frontal del contenedor.....	97
Figura 18.	Comparativa de las soleras de hule espuma (de etileno-propileno).98	
Figura 19.	Soleras de hule espuma (de etileno-propileno) adheridas a las placas de acrílico.....	98

Figura 20. Comparativa del grosor resultante tras la unión de los paneles de acrílico con las soleras de hule espuma (de etileno-propileno) instaladas.....	99
Figura 21. Molde de MDF empleado en el termoformado de placas de acrílico, antes y después del mantenimiento preventivo. ....	100
Figura 22. Acumulación de bioincrustaciones en la parte inferior del contenedor. ....	101
Figura 23. Contenedor de microalgas con soleras de hule espuma unidas con cianoacrilato.....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Objetivos específicos y metas alineadas con las fases metodológicas .....	9
Tabla 2.	Tabla Comparativa de tiempos del ensamble de un fotobiorreactor de Gerardo Rubén.....	32
Tabla 3.	Tabla Comparativa de tiempos del ensamble de un fotobiorreactor de Gerardo Ballesteros .....	32
Tabla 4.	Problemas de Sellado.....	38
Tabla 5.	Problema - Acumulación de Microorganismos .....	39
Tabla 6.	Problema - Pérdida de Presión de Aire y Flujo Inadecuado .....	40
Tabla 7.	Problema – Falta de Acceso para Sensores de Monitoreo.....	42
Tabla 8.	Problema – Contaminación Biológica .....	43
Tabla 9.	Problema – Exposición Parcial del Fotobiorreactor a un Entorno no Controlado.....	44
Tabla 10.	Problema – Bioincrustaciones .....	46
Tabla 11.	Ánálisis Modal de Efectos y Fallos .....	48
Tabla 12.	Evaluación de las propuestas implementadas.....	58
Tabla 13.	Lista de necesidades del cliente, los “QUE” .....	69
Tabla 14.	Características medibles, los “CÓMO” .....	73
Tabla 15.	Matriz de relación QUÉ vs CÓMO .....	79
Tabla 16.	Lista de Especificaciones técnicas .....	80
Tabla 17.	Implementación de la metodología de diseño y desarrollo de productos en el prototipo PBR-GBB19.....	90
Tabla 18.	Datos de concentración .....	95

Tabla 19. Tiempos registrados durante el mantenimiento estructural completo del fotobiorreactor ..... 104

Tabla 20. Tiempos registrados durante el mantenimiento entre ciclos de operación del fotobiorreactor ..... 106

## LISTA DE ABREVIATURAS

GRRC17: Diseño del PBR realizado por Gerardo Rubén Rodríguez Camacho en 2017.

GBB19: Rediseño realizado por Gerardo Ballesteros Briseño en 2019 de prototipo GRRC17.

PBR: *Photobioreactor.*

FBR: Fotobiorreactor.

CO<sub>2</sub>: Dioxido de Carbono.

HOQ: *House Of Quality* (Casa de la Calidad).

AMEF: Análisis Modal de Efectos y Fallos.

QFD: *Quality Function Deployment* (Despliegue de la Función de Calidad).

MDF: *Medium Density Fiberboard* (Tablero de Fibra de Densidad Media).

µm: Micrómetro (micra).

L/min: Litros por minuto.

W/m<sup>3</sup>: Vatios por metro cúbico.

SCADA: *Supervisory Control and Data Acquisition* (Control de Supervisión y Adquisición de Datos)

g/L: Gramos por litro (unidad de concentración de masa en solución).

Lux: Unidad de iluminancia en el Sistema Internacional de Unidades (equivale a un lumen por metro cuadrado).

Psi: Libras por pulgada cuadrada (*pounds per square inch*), unidad de presión utilizada en sistemas anglosajones.

3-log: 99.9% de reducción (reducción de 1,000 veces) de microorganismos.

- KPa: Kilopascal (unidad de presión en el Sistema Internacional, donde 1 kPa = 1000 pascales).
- mm: Milímetro (unidad de longitud equivalente a una milésima de metro).
- LBI: Laboratorio de Biotecnología Industrial.



## INTRODUCCIÓN

El panorama actual por el que atraviesa la humanidad de crisis ecológica, pandémica, la problemática geopolítica, entre otros aspectos que tienen una gran influencia en el bienestar humano [1]-[3], conlleva a los actores del campo de la investigación como el de la ingeniería industrial, a dirigir los esfuerzos hacia la búsqueda de soluciones sustentables y alternativas tecnológicas locales que sean aptas para un uso práctico, que proporcionen independencia tecnológica, con una visión más amigable hacia la naturaleza y que sean capaces de satisfacer las necesidades de la sociedad [4].

Un ejemplo de alternativa sustentable son las microalgas, seres unicelulares, que se encuentran en ambientes acuáticos y son capaces de realizar fotosíntesis. Es decir, son aptas para tomar la energía de la luz solar para producir su propio alimento. Además, estas microalgas forman biomasa, lo que significa que se pueden usar para obtener combustible y otros productos. Son una fuente de alimento para muchos animales y organismos, y por lo tanto, son importantes para el equilibrio de los ecosistemas.

Asimismo, son consideradas una fuente de alimentación sana para el ser humano. Por esta razón, con el fin de poder aprovechar estas microalgas de la mejor manera, las investigaciones sobre este campo van en aumento, como se puede observar en diversas bases de datos [3], [5]-[7]

Para poder acceder a los valiosos nutrientes que las microalgas obtienen por la interacción con el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), agua y energía solar, es necesario el uso de los fotobiorreactores (FBR o PBR por su abreviación en inglés), los cuales son un sistema de cultivo cerrado que contienen una cámara de flujo anaerobio para la producción de microalgas en grandes cantidades y poder obtener biomasa algal como materia prima, pues es la base de todos esos nutrientes [5], [6], [8].

En el caso de la Región Mixteca Oaxaqueña, lugar en donde se encuentra el Grupo de trabajo del proyecto de “Energías Renovables y Productos Sustentables” de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), se está trabajando en una línea de investigación relacionada con el cultivo de microalgas para la obtención de energías renovables y productos sustentables. En éste se busca aprovechar las condiciones

ambientales y geográficas que se gozan en la región, como lo son un gran potencial de luz y energía solar; esenciales para el crecimiento de las microalgas. Esto permitirá explotar estos recursos para beneficio de la sociedad y desarrollar proyectos de esta índole que permita a los tecnólogos, fabricantes o inversionistas contar con un nicho más amplio de opciones tecnológicas que se adecúen a sus propias exigencias y necesidades.

En este contexto, en tesis anteriores, se diseñaron y manufacturaron dos prototipos de FBR, liderados por dicho cuerpo académico; GRRC17 [9] y GBB19 [10]. Ambos prototipos presentaron innovaciones, permitiendo una mejora en el cultivo de microalgas a nivel de laboratorio, aprovechando las condiciones anteriormente mencionadas.

Gerardo Rubén [9] en su trabajo de investigación, realizó la determinación de peso seco que produce su prototipo PBR-GRRC17 al filtrar dos muestras de 10 mL de cultivo obtenido después de ocho días de crecimiento dentro del fotobiorreactor, generando en promedio 445mg/L. En el caso de Ballesteros Briseño [10], su prototipo PBR-GBB19 obtuvo un mayor índice de peso seco con la misma cantidad de cultivo filtrado, con 700 mg/L de biomasa en peso seco.

Sin embargo, a partir de una serie de observaciones durante un ciclo de trabajo y mantenimiento del prototipo GBB19, se observó que aún presenta áreas de oportunidad que pueden abordarse a partir del análisis que plantea la metodología de diseño y desarrollo de productos.

En consecuencia, el presente proyecto propone una metodología basada en el diseño y desarrollo de productos del autor Karl Ulrich con la aplicación de herramientas propias de la ingeniería industrial, para realizar mejoras que contribuyan en los procesos de ensamble y manufactura de dicho prototipo.

# CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

## 1.1 Planteamiento del problema

En la búsqueda de tecnologías orientadas al cuidado del medio ambiente y a la generación de energías limpias de bajo costo, que sean aptas para un uso práctico y que sean capaces de satisfacer las necesidades de la sociedad, las microalgas y su cultivo adquieren protagonismo y se consideran como una alternativa viable y sostenible de la industria del futuro. Claro está que los sistemas de cultivo cerrado (FBR), como lo menciona Fernández Linares [11] se caracterizan por la facilidad de control sobre prácticamente todas las variables biotecnológicas de interés, además de presentar beneficios fundamentales como un bajo riesgo de contaminación, condiciones reproducibles de operación y flexibilidad en el diseño.

Una primera propuesta, fue el desarrollo del prototipo PBR-GRRC17, el cual se diseñó y manufacturó por el ingeniero Gerardo Rubén Rodríguez Camacho, modelo que buscó optimizar el diseño en relación costo-beneficio, espacio físico, costos de mantenimiento y requerimientos energéticos, como se puede observar en la Figura 1 [9]. Al realizar un análisis con prototipos y patentes existentes en el tiempo en que se desarrollaba el PBR-GRRC17, se observó que éste se distinguía por la disminución de bioincrustaciones sobre la superficie de las placas, problema muy recurrente en los FBR.

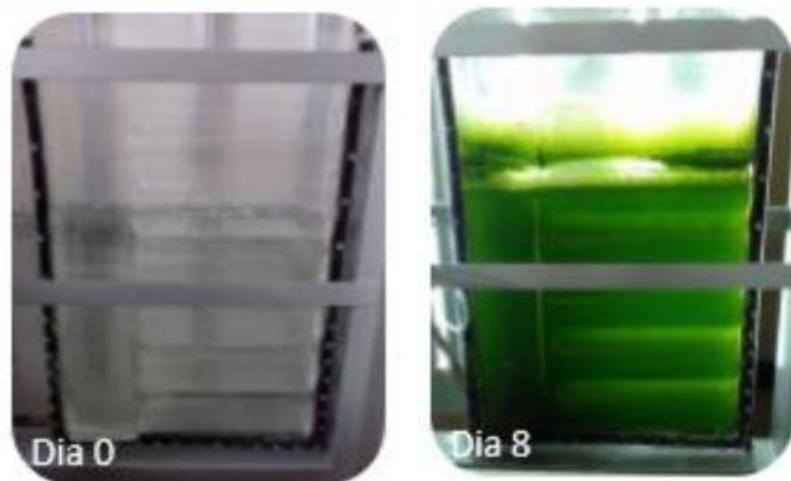


Figura 1. Prototipo PBR-GRRC17

Fuente: Rodríguez Camacho, G [9].

Como una segunda propuesta, Ballesteros Briseño presentó un nuevo prototipo PBR-GBB19 [10], trabajando en las áreas de oportunidad presentadas en el PBR-GRRC17, rediseñando la estructura base y como principal objetivo aumentar la cantidad de biomasa algal, mediante el incremento en el flujo de aireación a partir de difusores de aire, permitiendo un mejor mezclado de los nutrientes, Figura 2.



Figura 2. Prototipo PBR-GBB19

Fuente: Ballesteros Briseño, G. [10]

No obstante, el prototipo de Ballesteros Briseño (PBR-GBB19), aún presenta áreas de oportunidad. Durante el trabajo realizado en el FBR se encontraron problemas en el ensamble y desensamble del mismo, lo que pudo resultar en daños a la estructura del fotobiorreactor y el desperdicio de los materiales. Esto propiciado por la falta de un manual que identificara las partes conformadas por el fotobiorreactor, la secuencia de pasos a seguir tanto en el armado y desarmado, así como un listado de las herramientas y materiales que se deben utilizar para realizar dicha actividad.

Otro problema observado inicialmente fue en la repetibilidad de la manufactura del PBR-GBB19, al depender de distintos factores como las condiciones del entorno en donde se encuentre la maquinaria a utilizar. El montaje del fotobiorreactor formó también parte de los fallos que se tuvieron al momento de ponerlo en marcha, debido a que la estructura no era la indicada y daba lugar a que se presentaran fugas de los paneles. Todo lo

anterior permite que exista variabilidad en los procesos de crecimiento de las microalgas y afecte a los cultivos de las mismas.

La forma en que se pretenden mejorar dichas áreas, es a partir de la aplicación de una metodología basada en el desarrollo y diseño de productos de Karl Ulrich, que a su vez se auxilia de herramientas propias de la ingeniería industrial como lo son el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF) y la Casa de la Calidad que forma parte del Despliegue de la Función de Calidad (QFD).

## 1.2 Justificación

Camila Freire-Vinueza et al. [12] mencionan que, desde una perspectiva económica, los patrones de crecimiento adoptados por distintos países no son compatibles con la capacidad del medio ambiente para regenerar o producir recursos naturales. Esto conlleva al agotamiento de recursos no renovables y a la generación de externalidades negativas que afectan la esperanza de vida, la disponibilidad de alimentos y el equilibrio ecológico, con consecuencias irreversibles. A medida que crece la población, aumenta también la demanda de productos y servicios esenciales, lo cual hace urgente encontrar alternativas sustentables. En este contexto, las microalgas representan una opción prometedora, al ofrecer aplicaciones en sectores clave y al requerir menor espacio que otras fuentes biorenovables para su producción.

Por ejemplo, pueden emplearse como sustituto de los combustibles fósiles, contribuyendo así a la reducción de gases de efecto invernadero [13], [7]. Además, su potencial se extiende a procesos agrícolas, mediante el uso de especies como Chlorella vulgaris en el acondicionamiento de suelos y como biofertilizantes para diversos cultivos, así como al tratamiento de enfermedades vegetales [14]. También se explora su uso en la producción de bioplásticos [15] y en la industria farmacéutica para el desarrollo de metabolitos con propiedades antitumorales, antibióticas, antifúngicas e inmunosupresoras [16]. Otras investigaciones se han centrado en su aplicación en el tratamiento de aguas residuales ganaderas, ricas en materia orgánica, nitrógeno (N) y

fósforo (P) [4]. Estos estudios destacan la necesidad de enfoques interdisciplinarios que integren objetivos sociales, ambientales y científico-tecnológicos.

Actualmente, la producción de microalgas permite obtener sustancias de alto valor como proteínas, pigmentos y biopolímeros, aprovechadas en sectores como el farmacéutico, agrícola y textil. Su cultivo puede realizarse en espacios reducidos como estanques o fotobiorreactores (FBR), lo cual las vuelve más atractivas frente a otras materias primas renovables. Los FBR permiten un control más preciso de las condiciones de cultivo (temperatura, pH, concentración de CO<sub>2</sub>, etc.), generando cultivos monoalgares o mixtos con alta densidad celular.

En este marco, cobra relevancia la formación del ingeniero industrial en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, donde se promueven competencias orientadas al diseño de productos y a la mejora de sistemas de producción. Estas herramientas metodológicas resultan esenciales para abordar proyectos interdisciplinarios como el presente, en los que se requiere integrar conocimientos de distintas áreas para optimizar el desempeño de un sistema técnico complejo.

Este trabajo se enfoca en el análisis del prototipo PBR-GBB19, diseñado y manufacturado por Ballesteros Briseño [10], aplicando la metodología de diseño y desarrollo de productos propuesta por Ulrich y Eppinger [17]. Esta metodología, ampliamente validada tanto en contextos industriales como académicos, permite estructurar el proceso de desarrollo de un producto en etapas que facilitan la identificación de oportunidades de mejora. Tal es el caso del estudio de Imad Alsyouf et al. [18], donde dicha metodología fue empleada para mejorar el rendimiento de productos industriales, garantizando su funcionalidad y satisfacción del usuario. De manera similar, Set Melchor [19] aplicó este enfoque para perfeccionar un sistema de cultivo de microalgas mediante la implementación de un reactor robusto e instrumentado con sensores para el monitoreo de variables críticas como temperatura, nutrientes, pH e intensidad lumínica.

A partir de esta base metodológica, se desarrollaron propuestas específicas para mejorar las operaciones involucradas en el uso del fotobiorreactor, en particular aquellas relacionadas con el procesamiento y ensamble de sus componentes. Estas mejoras permitieron definir tiempos repetibles de operación (ensamble, desensamble y puesta en

marcha), con el objetivo de reducir la variabilidad del cultivo y asegurar condiciones estables para la producción de biomasa.

Aunque en la práctica y en distintos textos técnicos el concepto de “procesos de manufactura” abarca tanto la transformación de materiales como la integración de componentes, en este proyecto se optó por hacer explícita la distinción entre operaciones de procesamiento y operaciones de ensamblaje cuando fue necesario. Esta diferenciación favorece un análisis más detallado de las actividades técnicas implicadas en la intervención del fotobiorreactor, ya que cada tipo de operación implica retos, herramientas y enfoques distintos.

Groover [46], en *Fundamentals of Modern Manufacturing*, establece una clasificación clara: el procesamiento transforma la materia prima a través de técnicas como maquinado, moldeado o unión, mientras que el ensamblaje se orienta a la integración de componentes previamente elaborados para constituir un producto funcional. Esta perspectiva se aplica ampliamente en industrias complejas como la automotriz, donde distinguir entre ambos tipos de operación permite una mejor asignación de recursos, el diseño de controles de calidad diferenciados y la identificación de oportunidades de mejora específicas.

En este sentido, la terminología utilizada en el documento busca facilitar la comprensión técnica del enfoque adoptado, manteniendo una lógica estructural clara. Se emplea el término “procesos de manufactura” como categoría general, mientras que la distinción entre “operaciones de procesamiento” y “operaciones de ensamblaje” se utiliza para describir con mayor precisión aquellas secciones del análisis que lo requieren. Esto contribuye a una descripción más rigurosa, ordenada y coherente del trabajo realizado.

Todo lo anterior se enmarca en la línea de investigación “Energías Renovables y Productos Sustentables”, cuyo objetivo es sentar las bases para una planta piloto con procesos optimizados para la producción de biomasa algal. A mediano plazo, la implementación de esta propuesta podría fortalecer prácticas sustentables en contextos educativos y productivos, promoviendo la transferencia de conocimiento, la mejora continua y una relación costo-beneficio favorable para el aprovechamiento de microalgas en la región.

### **1.3 Hipótesis**

La mejora de los procesos de manufactura de un fotobiorreactor de panel ondulado es alcanzable mediante su evaluación técnica, rediseño de componentes y validación funcional, aplicando la metodología de diseño y desarrollo de productos.

### **1.4 Objetivos**

A continuación, se presentan los objetivos de este proyecto, alineados con las etapas del diseño y desarrollo de productos de Ulrich y Eppinger.

El objetivo general busca evaluar y optimizar los procesos de manufactura de un fotobiorreactor de panel ondulado, asegurando mejoras en su eficiencia y funcionalidad. Para ello, los objetivos específicos siguen la estructura de esta metodología, abordando cada fase de manera sistemática, desde el análisis del diseño actual hasta la implementación y validación de mejoras.

Cada objetivo específico se complementa con metas definidas, que permiten orientar el desarrollo del proyecto y medir su progreso de manera precisa. Este enfoque estructurado facilita la identificación de oportunidades de mejora y la toma de decisiones fundamentadas.

#### **1.4.1 Objetivo general**

Mejorar los procesos de manufactura de un fotobiorreactor de panel ondulado mediante su evaluación técnica, rediseño funcional y validación operativa, con el fin de optimizar su desempeño y facilitar su replicabilidad.

#### **1.4.2 Objetivos específicos y metas**

La Tabla 1 muestra los objetivos específicos del proyecto y las metas proyectadas.

**Tabla 1. Objetivos específicos y metas alineadas con las fases metodológicas**

<b>FASES METODOLÓGICAS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>METAS</b>
<b>FASE 0: PLANEACIÓN</b>	<p><b>OE1: Evaluar el rendimiento del fotobiorreactor actual a partir de un análisis de tiempos operativos durante el ensamble y desensamble.</b></p> <p><b>OE1-M1.</b> Establecer un análisis comparativo de los tiempos de las actividades que involucran la intervención del fotobiorreactor actual, previo a cualquier mejora, como línea base para la evaluación del desempeño. Como herramientas de medición se empleará un cronómetro manual, complementado con registros en video para validar la duración de las actividades.</p> <p><b>OE1-M2.</b> Realizar un estudio AMEF y un Diagrama Causa-Efecto para identificar las piezas y procesos de montaje a mejorar.</p>	
<b>FASE 1: DESARROLLO DEL CONCEPTO</b>	<p><b>OE2.</b> Identificar las restricciones, necesidades y prioridades de las partes interesadas, para asegurar que</p> <p><b>OE2-M3.</b> Considerar las limitaciones presupuestarias y temporales respecto al</p>	

	las mejoras propuestas sean actual proyecto de viables y contextualizadas.	
<b>FASE 2: DISEÑO EN EL NIVEL SISTEMA</b>	<b>OE3.</b> Definir las especificaciones técnicas de las mejoras a implementar, para asegurar su viabilidad técnica, facilitar su documentación y orientar su aplicación en el fotobiorreactor.	<b>OE3-M4.</b> Obtener las especificaciones técnicas del fotobiorreactor, con base en la aplicación de la Casa de la Calidad del QFD.
<b>FASE 3: DISEÑO DE DETALLE</b>		<b>OE3-M5.</b> Determinar funciones, partes, formas y medidas.
		<b>OE3-M6.</b> Determinar materiales y tecnologías.
		<b>OE3-M7.</b> Determinar la documentación necesaria.
<b>FASE 4: PRUEBAS Y REFINAMIENTO</b>	<b>OE4.</b> Implementar las mejoras de acuerdo con las especificaciones técnicas, para evaluar su impacto en el desempeño del fotobiorreactor y validar su funcionalidad.	<b>OE4-M8.</b> Desarrollar e implementar las mejoras necesarias. <b>OE4-M9.</b> Efectuar un nuevo análisis comparativo de los tiempos posteriores a la implementación de mejoras, con el fin de evaluar el impacto de las modificaciones respecto al modelo original (PBR-GBB19).

## 1.5 Limitaciones

Dada la amplitud de esta línea de investigación, el tema de este proyecto se limitará a la validación del nuevo prototipo con la puesta en marcha del mismo y su monitoreo en los laboratorios de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Se pondrá en marcha cultivando con algún tipo de microalgas y se comparará su desempeño con la versión de Ballesteros Briseño PBR-GBB19.

El alcance de este proyecto de investigación contempla el análisis y definición de los tiempos y movimientos asociados al ensamblaje y desensamblaje del FBR, así como el tiempo de puesta en marcha y, en caso necesario, la manufactura de los paneles y la estructura del montaje.

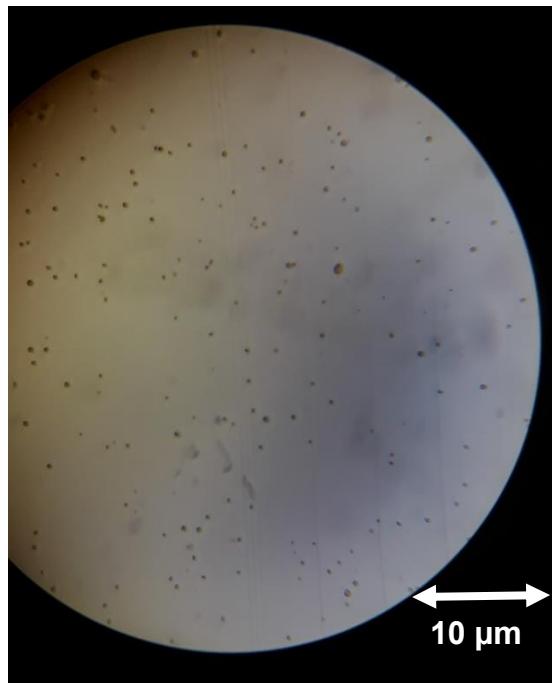


## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este apartado se abordan los principales tópicos relacionados con el presente trabajo, incluyendo los sistemas de cultivo de microalgas, los fotobiorreactores como tecnología clave para su producción controlada, y los procesos de manufactura asociados a su construcción. Asimismo, se presentan las herramientas de ingeniería industrial empleadas en el desarrollo metodológico, tales como el Diagrama de Causa-Efecto, el Despliegue de la Función de Calidad (QFD) y el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF).

### 2.1 Microalgas

Las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos capaces de convertir dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua y energía solar en biomasa. Se desarrollan en diversos hábitats como agua dulce, salobre o marina, y son altamente adaptables a diferentes rangos de temperatura, pH y disponibilidad de nutrientes, lo que favorece su cultivo en condiciones controladas [5], [20]. En el caso de la Figura 3, se observa que las microalgas predominan en formas esféricas con un diámetro de 2–8  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3.** Micrografía de Microalga *Chlorella* sp en microscopio óptico.

*Fuente: Elaboración Propia*

Gracias a su estructura simple y rápida reproducción, representan una fuente prometedora de biomasa para fines bioenergéticos e industriales. Algunas especies, como *\*Chlorella vulgaris\** o *\*Spirulina\**, destacan por su capacidad de adaptación, su alto contenido de lípidos y su ciclo corto de crecimiento, atributos clave para la producción de biocombustibles como biodiesel, bioetanol o biohidrógeno [10], [21]–[23].

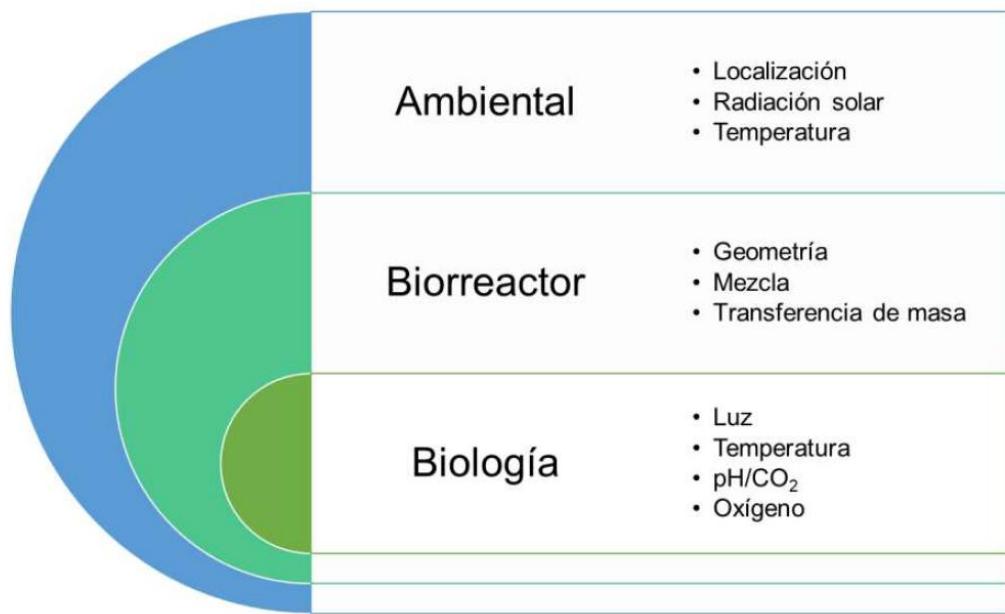
Además de su potencial energético, las microalgas se utilizan en la alimentación animal y humana, así como en las industrias farmacéutica y cosmética, por su contenido en compuestos bioactivos como ácidos grasos poliinsaturados, carotenoides (astaxantina, luteína, cantaxantina) y clorofila [24]–[27].

Este amplio rango de aplicaciones ha impulsado el desarrollo de tecnologías para su cultivo a mayor escala, entre las cuales los fotobiorreactores destacan como sistemas eficientes para mantener condiciones óptimas de crecimiento y maximizar la producción de biomasa.

## 2.2 Sistemas de cultivo

Los sistemas de cultivo son infraestructuras diseñadas y utilizadas por los investigadores y acuicultores para cultivar una o más especies de microalgas, con el fin de obtener biomasa algal y de esta recuperar diversos componentes valiosos utilizados en diferentes contextos [8].

En un sistema de cultivo de microalgas el obtener la máxima productividad de biomasa posible y controlar adecuadamente el medio de cultivo, para que no se ponga en peligro la estabilidad de los microorganismos [28], depende de varios factores o criterios, Manzoni Maroneze [29] engloba estos parámetros en ambiental, sistema de cultivo o biorreactor y el biológico, como se puede observar en la Figura 4.



**Figura 4. Parámetros determinantes en la productividad de microalgas**

Fuente: Manzoni Maroneze, M., et al. [29]

Dada la diversidad de aplicaciones industriales, los requerimientos nutricionales y ambientales, así como de la biología de las especies a cultivar, se debe tomar en cuenta que el establecimiento de un sistema de cultivo efectivo es un paso específico y crucial en función de la aplicación considerada, el tipo y valor del producto final desarrollado a partir de la biomasa.

Los sistemas de cultivo pueden clasificarse según su configuración y tipo de funcionamiento; pero las dos categorías principales de sistemas de cultivo más conocidas son los sistemas abiertos y sistemas cerrados [8], [9], [28]-[31].

### 2.2.1 Sistemas abiertos

Sistemas conocidos por estar expuestos al aire libre, situados en grandes extensiones de terreno con condiciones no ideales para el crecimiento de biomasa debido a la carencia de un sistema de control de variables como la temperatura, el pH o un sistema de aireación para optimizar el rendimiento de la biomasa. A pesar de ello son los sistemas más comunes y más usados en la actualidad para monocultivos, pues su bajo costo, durabilidad, facilidad de construcción y operación lo justifica para ciertos productos.

Por su diseño, estos sistemas suelen comprender tanto medios naturales, como lagunas y estanques artificiales con variedad de diseños. A continuación, se mencionan tres tipos de sistemas abiertos.

- Estanques abiertos (*open pond*)
- Carrusel (*raceway*)
- Tanques circulares

### 2.2.2 Sistemas cerrados

A diferencia de los sistemas de cultivo abiertos, los sistemas cerrados comúnmente denominados fotobiorreactores (FBR) son estructuras diseñadas para aislar el cultivo del ambiente exterior, lo que permite un control más preciso de variables clave como la temperatura, el pH, la aireación, la intensidad lumínica y la concentración de nutrientes. Este control mejora la estabilidad del cultivo, reduce significativamente el riesgo de contaminación, y permite obtener biomasa de alta calidad en cultivos monoclonales o mixtos [9].

Actualmente, existe una gran diversidad de diseños y configuraciones de FBR que responden a diferentes necesidades de escala, eficiencia y tipo de microalga cultivada.

Rodríguez Camacho [9] los clasifica en: tanques agitados, columnas de burbujeo, sistemas airlift, FBR tipo columna (FBR-C), de panel plano (FBR-PP), tubular (FBR-T), tubulares verticales (FBR-TV), horizontales (FBR-TH) y helicoidales (FBR-TH).

Entre estas variantes, el fotobiorreactor tipo airlift de panel ondulado representa una solución híbrida que combina dos ventajas técnicas clave: el movimiento del medio por burbujeo y una geometría que optimiza la iluminación y el contacto entre células y nutrientes. A diferencia de los FBR de panel plano, que pueden generar zonas muertas o estancamiento del medio, la ondulación del panel favorece una mayor turbulencia controlada, lo cual reduce la sedimentación celular y mejora el aprovechamiento de la luz incidente [10].

El principio airlift se basa en inducir un flujo interno mediante la inyección de aire (o una mezcla aire–CO<sub>2</sub>) en una sección del reactor, generando un circuito de circulación entre compartimientos de baja y alta densidad de burbujas. Este mecanismo natural de circulación evita el uso de componentes mecánicos móviles, reduciendo el consumo energético, el daño por cizallamiento celular y los costos de mantenimiento [48].

Por su parte, la ondulación del panel permite aumentar el área superficial expuesta a la luz sin incrementar de forma significativa el volumen del sistema. Esta característica resulta particularmente útil en especies microalgales sensibles a la limitación lumínica, pues promueve una mayor uniformidad en la distribución de radiación en toda la columna del cultivo [49]. A su vez, contribuye a mitigar el sombreado entre células en densidades altas, lo que mejora el rendimiento fotosintético neto.

## 2.3 Herramientas de la ingeniería industrial

En esta sección se presentan las herramientas de apoyo utilizadas para el análisis y mejora del fotobiorreactor. Estas provienen del campo de la ingeniería industrial y permiten abordar el proyecto de forma estructurada. Se incluyen el Diagrama de Causa-Efecto, el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) y el Despliegue de la Función de

Calidad (QFD), herramientas ampliamente empleadas en el diseño, evaluación y mejora de productos o procesos.

### 2.3.1 Diagrama causa y efecto

En 1943 en Tokio, Japón, Kaoru Ishikawa desarrolló la herramienta de análisis conocida como Diagrama de Causa-Efecto, diagrama “espina de pescado” o diagrama de Ishikawa, una herramienta gráfica eficaz en la identificación y organización de información relacionada con las posibles causas o razones de un problema, resultado o característica de calidad específico o central, influyendo en la toma de acciones certeras de su mejoramiento y del control de calidad de una empresa u organización [32].

Se debe tomar en cuenta que esta herramienta no ofrece respuesta a una pregunta, como sucede en el análisis de Pareto, diagramas Scatter o histogramas, en el momento de generar el diagrama causa-efecto, normalmente se ignora si estas causas son o no responsables de los efectos. De desarrollarse un diagrama causa-efecto bien organizado se tendrá una amplia claridad y concepción común de un problema complejo, con todos sus elementos y relaciones claramente visibles a cualquier nivel de detalle requerido [33].

Para Romero Bermúdez, et. al.[32], este diagrama se debe utilizar cuando se pueda contestar “Sí” a una o a las dos preguntas siguientes:

- 1) ¿Es necesario identificar las causas principales de un problema?
- 2) ¿Existen ideas u opiniones sobre las causas de un problema?

Otros autores refieren que el diagrama de Ishikawa plantea dos hipótesis:

- 1) Existe un número limitado de causas principales y secundarias para cada problema.
- 2) Distinguir estos dos tipos de causas es una primera etapa hacia la resolución del problema.

Kaoru Ishikawa, engloba las diferentes causas que pueden surgir de un problema en cinco grandes familias (5M) y las utiliza para estructurar el diagrama causa-efecto.

- Materia prima
- Medio

- Métodos o Métodos de trabajo
- Máquina
- Mano de obra

Existen autores que amplían el modelo de 5M a 7 u 8M según el caso.

Por lo que al modelo 5M se añaden:

- Medida
- Management (de su traducción al inglés Gestión, si no se considera en la M de Métodos)
- Medios financieros

Tanto Burgasí Delgado, et. al. y Romero Bermúdez[32], [33], mencionan que la elaboración del diagrama puede realizarse de dos maneras: la primera forma enlista todos los problemas identificados, a partir de una lluvia de ideas, jerarquizando los principales y cuáles son sus causas; la segunda manera determina y ubica las ideas principales en los llamados “huesos primarios” y a las causas secundarias las ubica en los “huesos pequeños”, ambas forman parte de las espinas principales, tal y como se ve en la Figura 5.

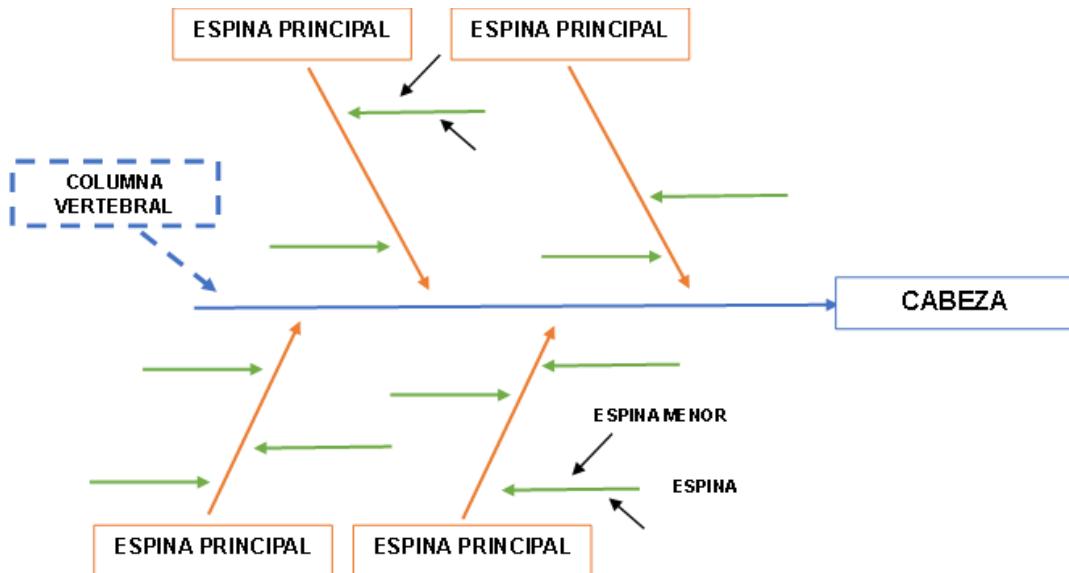


Figura 5. Diagrama de Ishikawa

Fuente: EDUTEKA, "DIAGRAMAS CAUSA-EFECTO" [34]

### 2.3.2 AMEF

Herramienta para realizar un análisis sistemático, documentado, preventivo y cualitativo de la fiabilidad de un sistema y sus subsistemas. Por ejemplo: los equipos, sus componentes, sus modos y efectos de falla, así como también las consecuencias de estos y su nivel de riesgo. De esta forma, permite tomar acciones para reducir o controlar el riesgo, eliminando o minimizando las ocurrencias de fallas que se presenten, con ello se garantiza el funcionamiento adecuado de los sistemas y subsistemas [35], [36], [37].

Al hablar de los diversos campos de aplicación del AMEF el área médica es uno de esos, como lo aborda Paige A. Taylor, et al., en el artículo *"Prioritizing clinical trial quality assurance for photons and protons: A failure modes and effects analysis (FMEA) comparison"* [38]. Ellos evaluaron la garantía de calidad de ensayos clínicos realizados con radioterapia de protones y fotones a fin de mejorar la calidad de los datos y resultados de dichos ensayos e identificar y reducir errores de alto riesgo asociados con los ensayos clínicos.

En el mismo tenor, Bijan Elahi, en el libro “*Safety Risk Management for Medical Device*” [35], toma en cuenta a la metodología como un requisito para la gestión de riesgos de seguridad sensata, eficiente y exitosa en dispositivos médicos, garantizando el cumplimiento de la norma internacional ISO 14971, orientada a estos dispositivos.

Changki Park, et al., en el artículo “*A BN driven FMEA approach to assess maritime cybersecurity risks*” [39] propone y utiliza un nuevo marco de evaluación de riesgos de ciberamenazas marítimas, que combina el AMEF con una RBN (Rule-based Bayesian Network), para evaluar y comprender los niveles de riesgo de las amenazas que contribuyen al riesgo general de la ciberseguridad marítima. A fin de desarrollar medidas de control basadas en el riesgo.

La aplicación del AMEF es válida para cualquier tipo de proceso, ya que normalmente se designa su uso para un proceso de diseño o un proceso de fabricación, sin embargo también puede existir un AMEF dirigido a ventas, organizativo, administrativo o de cualquier tipo de servicio [40].

La secuencia de principios básicos para la aplicación de un AMEF genérico o general, son:

Etapas para una implementación sistemática [40].

- Crear y formar el equipo AMEF
- Identificar el producto o el proceso
- Elaborar el diagrama de bloques funcionales y/o el diagrama de flujo
- Recoger datos de fallos y clasificarlos
- Preparar el AMEF
- Implantar las acciones correctoras
- Revisar y seguir el AMEF

Los pasos necesarios para la aplicación del método AMEF están basados en el formato del mismo método (Figura 6) como se listan a continuación:

1. Nombre del producto
2. Operación o función

3. Modo de fallo
4. Efectos del fallo
5. Gravedad del fallo
6. Características críticas
7. Causa del fallo
8. Probabilidad de ocurrencia
9. Controles actuales
10. Probabilidad de no detección
11. Número de prioridad de riesgo
12. Acción correctora
13. Definir responsables
14. Acciones implantadas
15. Nuevo valor de gravedad del fallo
16. Nuevo valor de probabilidad de ocurrencia
17. Nuevo valor de probabilidad de no detección
18. Nuevo número de prioridad de riesgo

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS												HOJA	REVI. N°	FECHA	POR	
DE PROCESO <input type="checkbox"/> DE DISEÑO <input type="checkbox"/>												de				
PRODUCTO:				PROCESO:									RESPONSABLE:			
ESPECIFICACIÓN:				OPERACIÓN:									FECHA:			
FECHA DE EDICIÓN:				ACTUAR SOBRE NPR> QUE:									REVISADO:			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	VALORACIÓN		18
														15	16	17

Figura 6. Formato AMEF

Fuente: "AMFE: Análisis Modal de Fallos y Efectos" [40]

Para la evaluación de riesgos en el fotobiorreactor, se utilizarán las tablas de puntuación de severidad, detección y ocurrencia del AMEF, conforme a la NTP 679 del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Estas tablas son adaptadas al contexto del proyecto, permitiendo una valoración más precisa de los modos de falla y facilitando la toma de decisiones para la mejora del diseño y manufactura. [41]

### 2.3.3 QFD

El despliegue de la función de calidad (o QFD, por las siglas del inglés *Quality Function Deployment*) se define como la metodología de diseño que identifica las características de calidad de productos y servicios mediante la conversión e identificación de los requerimientos o demandas del consumidor (denominado también usuario) a características técnicas y operativas satisfactorias para dicho producto o servicio durante una etapa temprana de su diseño.

En un concepto básico, permite definir lo que "hay que hacer" (requerimientos del cliente) y lo transforma progresivamente en "cómo hacerlo" (requerimientos de producción) [42],

[43]. A partir de una serie de fases y matrices de planeación, se presenta de forma visual la relación entre los distintos tipos de datos mencionados anteriormente. La secuencia de fases se puede visualizar en la Figura 7.

Para el caso de las matrices, la Figura 9 demuestra la aplicación del QFD a un proceso de servicios de salud [44], pero para la realización de este proyecto se utilizará para un producto (fotobiorreactor).

Para Olaya Escobar [42] las cuatro fases se pueden entender como:

1. De requerimientos del usuario a características de calidad.
2. De características de calidad a características de partes.
3. De características de partes a parámetros de procesos.
4. De parámetros de procesos a requerimientos de producción.



Figura 7. Las cuatro fases del modelo de QFD

Fuente: Elaboración propia.

### **Fase I: Matriz de planeación o casa de la calidad.**

Es el primer paso del QFD, se le considera como el más importante debido a que en la matriz radica una gran cantidad de información a documentarse y analizarse por el equipo de desarrollo. Los principales enfoques de esta información se orientan a las “estimaciones” sobre las utilidades esperadas por el cliente y la interpretación de los expertos del equipo de desarrollo de las mismas (parámetros o magnitudes esenciales del objeto), para dar como resultado las especificaciones de diseño del producto o servicio [44].

La casa de la calidad consta de ocho áreas fundamentales, divididas en cuatro vectores y cuatro matrices (Figura 8) [42].

1. Vector de requerimientos del usuario.
2. Vector de evaluación técnica.
3. Vector de características de calidad.
4. Vector de factores de evaluación.
5. Matriz de correlación.
6. Matriz de sensibilidad.
7. Matriz de evaluación.
8. Matriz de puntuación

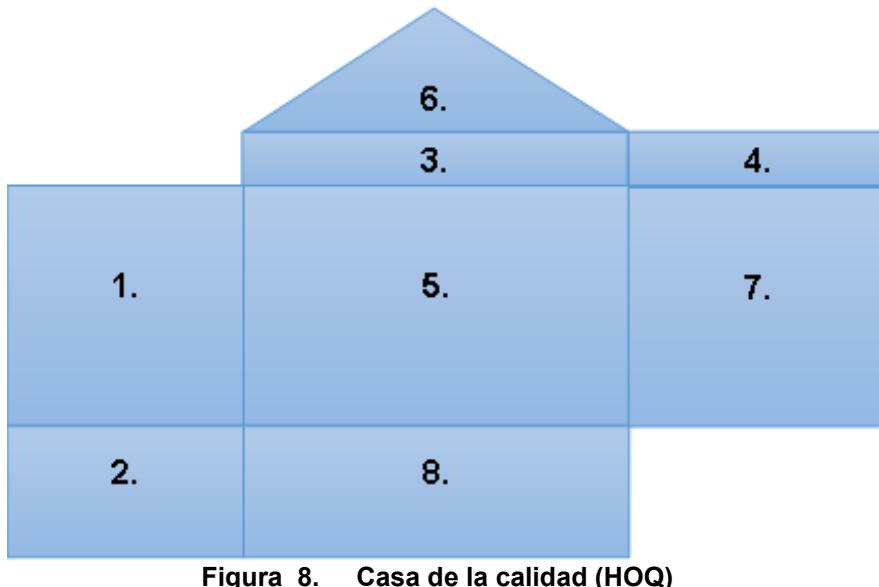


Figura 8. Casa de la calidad (HOQ)

Fuente: Elaboración propia.

**Fase II: Despliegue de partes (componentes) o diseño en detalle.**

El objetivo de esta fase es llevar a cabo la correlación y evaluación entre las especificaciones de diseño y las características de los principales componentes o partes del producto, de lo que resultan las especificaciones convenientes para éstas y sus posteriores desarrollos.

**Fase III: Planificación de proceso.**

Los propósitos de la fase de planificación de procesos son determinar la mejor combinación entre el diseño y los procesos, determinar los parámetros críticos de los procesos y establecer sus valores objetivos.

**Fase IV: Control de proceso o Producción.**

Se crean indicadores de actuación para supervisar el proceso de producción, mantenimiento y habilidades de los operadores.

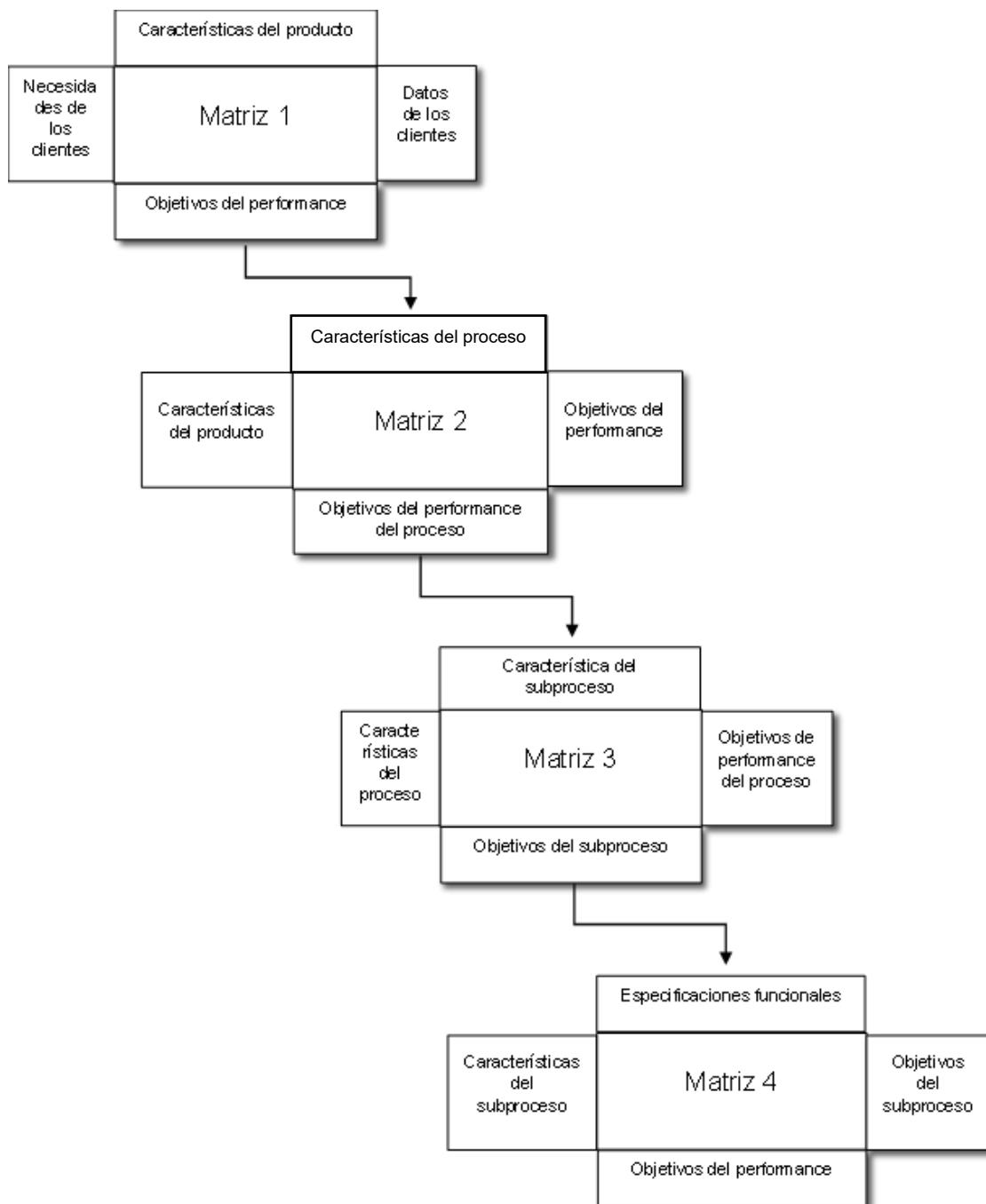


Figura 9. Matrices del QFD

Fuente: S. L. Silva Chavelas [44]

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología a utilizar en el proyecto de tesis, está basado en la fuente bibliográfica de los autores Karl Ulrich y Steven Eppinger: Diseño y Desarrollo de Productos [17]. En ella incluyen lo que los autores llaman “un proceso genérico de desarrollo de producto”, pues buscan que se adapte a las necesidades industriales particulares de cada empresa, involucrando a cada uno de los departamentos de la misma, mercadotecnia, diseño y manufactura.

Por consiguiente, se puede decir que en un proceso de desarrollo de producto existe una secuencia de pasos o actividades para concebir, diseñar y comercializar un producto.

Dicho proceso genérico consta de seis fases, tal como se muestra en la Figura 10.

**Fase 0. Planeación:** Identificación de oportunidades, evaluación de los avances tecnológicos y los objetivos de mercado.

**Fase 1. Desarrollo del concepto:** Identificación del mercado objetivo, generación y evaluación de alternativos del producto, selección de distintos conceptos para su desarrollo y pruebas adicionales.

**Fase 2. Diseño a nivel sistema:** Definición de la arquitectura del producto, descomposición del producto en subsistemas y componentes junto con sus especificaciones funcionales. Se esboza un diagrama de flujo del armado final.

**Fase 3. Diseño de detalle:** Se especifica la geometría completa, materiales y tolerancias de todas las partes únicas del producto. Se identifican las partes estándar que deben ser adquiridas por proveedores.

**Fase 4. Pruebas y refinamiento:** Construcción y evaluación de versiones múltiples de preproducción del producto.

**Fase 5. Inicio de producción:** A partir del sistema de producción pretendido se comienza a hacer el producto.

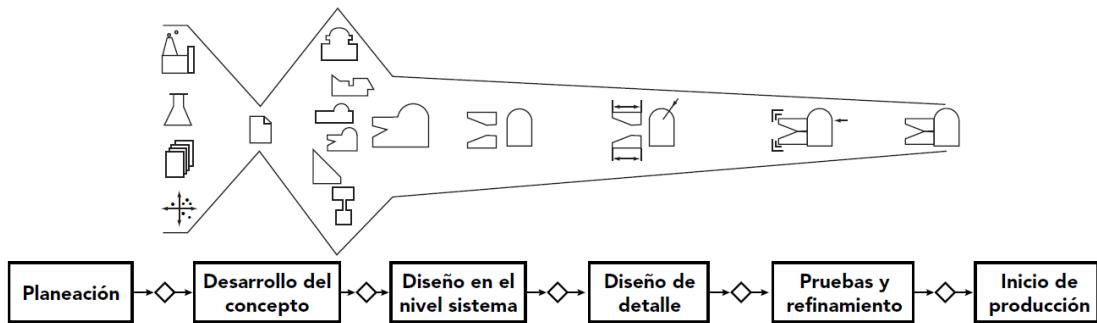


Figura 10. Las seis fases del proceso genérico de desarrollo de producto

Fuente: K. T. Ulrich y S. D. Eppinger [17]

Debido a la naturaleza del proyecto, se optó por una adaptación de fases propuestas por Ulrich y Eppinger, apoyada por el procedimiento de mejora sugerido, desarrollado por Imad Alsyouf et. al. [18], en su artículo de investigación *Implementing product design development methodology for assessing and improving the performance of products*. De esta forma el alcance para este trabajo se contempla hasta la fase 4 del proceso de Ulrich y Eppinger, como se observa en la Figura 11.

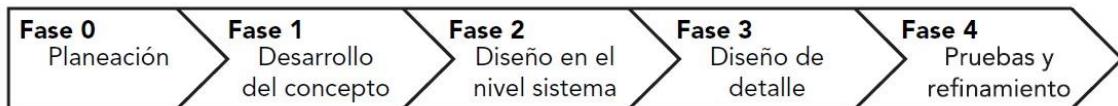


Figura 11. Diagrama de la adaptación de la metodología a utilizar

Fuente: Elaboración propia.

Derivado del contexto anterior, ambas fuentes bibliográficas coinciden en el uso de herramientas relevantes que permitan y apoyen al tomador de decisiones medir el desempeño del sistema con respecto a los requisitos de las partes interesadas, analizar problemas potenciales de desempeño, proponer soluciones, evaluarlas y tomar una decisión efectiva [17], [18].

Dentro de las herramientas que destacan y que serán de gran valor para este trabajo, se encuentra el Diagrama Causa-Efecto (Diagrama de Ishikawa), el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF) y el Despliegue de la Función de Calidad (QFD).

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

### 4.1 FASE 0: PLANEACIÓN

A partir de una intervención empírica realizada sobre el modelo GBB19, que incluyó una limpieza minuciosa debido a la contaminación generada por el abandono del proyecto, se planteó efectuar un primer análisis de tiempos con el objetivo de identificar las actividades necesarias para su mantenimiento, comenzando por el desensamblaje y desarmado del FBR. Posteriormente, se tomaron tiempos para su limpieza y, finalmente, se tomaron tiempos para su armado y ensamblaje. Esto derivó en la búsqueda de los registros de tiempos realizados por los ingenieros Gerardo Rubén Rodríguez Camacho y Gerardo Ballesteros Briseño en sus respectivos proyectos de tesis los cuales se pueden analizar a detalle en el anexo A y fueron considerados para la elaboración de manuales de procedimientos y diagramas de flujo como complemento del presente trabajo.

A continuación, se presenta un análisis comparativo de los tiempos obtenidos por Rodríguez Camacho (Tabla 3) y Ballesteros Briseño (Tabla 4) en el proceso de armado de un fotobiorreactor. Esta comparación permitirá analizar las diferencias en los métodos empleados por cada uno.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

**Tabla 2. Tabla Comparativa de tiempos del ensamble de un fotobiorreactor de Gerardo Rubén**

PLAN DE PROCESOS					
No. de parte:	Fbr-t-01	fecha	10-oct-2017	Material	Acrílico
Nombre de parte:	FBR				
Original:	GRRC				UTMIX-CA-37
Revisión:	MMH	fecha	10-oct-2017	Cliente	
No	Descripción	Estación de trabajo	Preparación	Herramienta	Tiempo
1	Cortar lámina de acrílico	Mesa de trabajo 1	Anexo E. Planeación de procesos	Cortador de acrílico	1 hr
2	Termoformar lámina de acrílico	Termoformadora 1		Termoformadora	15 min
3	Ensamblar láminas de acrílico	Mesa de trabajo 1		Cloruro de metileno	2 hrs
4	Barrenar ensamble	Taladrora 1		Broca 1/4"	1 hr
5	Colocar cinta aisladora	Mesa de trabajo 1		Cinta de neopreno	15 min
6	Unir placas de acrílico	Mesa de trabajo 1		Tornillos	20 min

Fuente: Rodríguez Camacho, G [9].

**Tabla 3. Tabla Comparativa de tiempos del ensamble de un fotobiorreactor de Gerardo Ballesteros**

OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (minutos)	TIEMPO ACUMULADO (minutos)
Limpieza de placas	15	15
Colocación de componentes	10	25
Pegado de las placas	17	42
Armando de la estructura	26	68
Ensamble	48	116
Montaje del FBR	12	128
Desinfección	120	248
Llenado con inóculo	35	283
<b>TIEMPO TOTAL</b>		<b>4 horas 43 minutos</b>

Fuente: Ballesteros Briseño, G. [10]

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Comparando ambas tablas, observamos que, aunque ambas cubren aspectos cruciales del proceso de preparación del fotobiorreactor, la primera se enfoca más en la fabricación y ensamblaje inicial (Rubén) en donde estas actividades consumen aproximadamente 4 horas y 50 minutos, mientras que la segunda detalla las etapas finales de puesta en marcha (Ballesteros) sumando un total de 4 horas y 43 minutos.

Aunque los tiempos totales son similares, esta comparación resalta la importancia de cada fase y subraya la necesidad de un enfoque detallado y cuidadoso en cada etapa del proceso para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

Es importante mencionar que ambos registros no se presentan a detalle, ya que durante la realización del proyecto actual, los tiempos difieren con respecto a los obtenidos recientemente. Estas discrepancias pueden atribuirse a varios factores, incluyendo mejoras en los procesos, cambios en los equipos utilizados y la experiencia acumulada por el personal involucrado. Por lo tanto, es fundamental actualizar y revisar continuamente los procedimientos y tiempos para reflejar con mayor precisión la realidad del trabajo y garantizar la eficiencia y eficacia del mantenimiento del fotobiorreactor.

El enfoque de este proyecto se limita al desarrollo y validación de las mejoras o modificaciones al prototipo, incluyendo su puesta en marcha y monitoreo en los laboratorios de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. El prototipo se puso en funcionamiento cultivando un tipo de microalgas y se comparará su desempeño con los datos publicados por Ballesteros Briseño y Rodríguez Camacho.

Durante esta fase, se ha considerado que las propuestas de mejora estarán condicionadas por los recursos actuales, incluyendo las maquinarias, materiales y herramientas disponibles:

Maquinaria:

- Fresadora CNC de 3 ejes
- Termoformadora
- Pistola p/ pintar de gravedad/pulverizadora
- Pistola para tubo de silicón
- Herramientas:

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

- Tijeras
- Flexómetro
- Llave española milimétrica de 11 mm
- Navaja
- Lija de agua de diferentes números
- Cortador de acrílico
- Prensas tipo “C” de 1” y 2”
- Equipo de protección personal (Guantes dieléctricos, Lentes de protección, Guantes de asbesto o resistentes al calor)
- Mechero
- Cronómetro
- Termómetro

### Materiales:

- Bote de cloro comercial
- Espátula plástica
- Marcadores indelebles
- Rollo plástico film
- Manguera 3/8
- Bote de alcohol
- Jeringas
- Gasas
- Algodón
- Guantes de látex
- Cubrebocas
- Encendedor
- Trapos de microfibra
- Pegamento 911 (Esther de Cianoacrilato)
- Tubos de silicon

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

- 1 Lt sellador de nitrocelulosa (NS-1000\_30)
- Estopa
- Diluyente (Thinner)
- Placas de acrílico
- Cera desmoldante
- Guía/tira de madera (de preferencia de un metro de longitud)
- Galones de Agua
- Desengrasante
- Tira de solera de hule espuma (de etileno-propileno)  $\frac{1}{4}$ " x1/2" o 1/8"x3/4"
- Tornillos de 11 mm x 1"
- Tuercas para tornillos de 11 mm
- Tiras de madera de varias medidas
- Tiras de acrílico
- Mangueras para difusores de aire
- Difusores de aire de diferentes formas
- Perfiles de metal
- Bridas de plástico de 20 o 30 cm

Estas limitaciones técnicas y logísticas imponen un marco sobre las soluciones viables, lo que exige un enfoque creativo y adaptativo para maximizar el rendimiento del fotobiorreactor dentro de los parámetros establecidos.

El alcance de este proyecto de investigación incluye la definición y documentación de los tiempos y movimientos asociados al ensamblaje y desensamblaje del fotobiorreactor, tal como se muestra en las tablas anteriores, así como el tiempo de puesta en marcha. Además, se contempló la manufactura o una mínima modificación en los paneles del mismo, con el objetivo de mejorar la manipulación de las mangueras de aire y optimizar la aireación del cultivo.

## 4.2 FASE 1: DESARROLLO DEL CONCEPTO

En esta fase, el enfoque principal fue analizar el comportamiento actual del fotobiorreactor con el fin de comprender sus principales fallas, riesgos y oportunidades de mejora. Para ello, se aplicaron herramientas de análisis cualitativo como el Diagrama de Causa-Efecto y el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), que permitieron identificar relaciones causa-efecto y priorizar los puntos críticos del sistema. Los resultados de esta etapa sirvieron como base para orientar las decisiones de diseño técnico en las fases posteriores.

### 4.2.1 Diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa y efecto, es una herramienta utilizada para identificar las causas de un problema específico. En este caso, el diagrama analiza las causas de la baja eficiencia del fotobiorreactor GBB19 para su puesta en marcha y operación. Las posibles causas se agrupan en seis categorías principales: Materiales, Métodos, Mano de Obra, Máquinas, Medio Ambiente y Medición.

- **Materiales:** Se identifican problemas como la contaminación biológica y problemas de sellado.
- **Métodos:** Se menciona la exposición parcial del fotobiorreactor a un entorno no controlado.
- **Mano de Obra:** Incluye la falta de formación del personal encargado y la falta de personal relacionado con el proyecto.
- **Máquinas:** Se resaltan la pérdida de presión de aire, el flujo inadecuado y la acumulación de microorganismos en la interfaz líquido-gas.
- **Medio Ambiente:** Incluye la bioincrustación
- **Medición:** Se enfoca en la falta de acceso a sensores de monitoreo.

Este diagrama se construyó a partir de experiencias empíricas obtenidas durante el desmontaje, desarmado, limpieza y mantenimiento del fotobiorreactor GBB19 (Figura 12). Utilizado como una herramienta de ingeniería industrial, el diagrama de Ishikawa

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

representa el primer paso crucial para identificar modos potenciales de fallo en el sistema. Al desglosar y analizar cada categoría, se pueden determinar áreas específicas que requieren atención y mejora, facilitando así un enfoque sistemático para aumentar la eficiencia del fotobiorreactor.



**Figura 12. Diagrama de Ishikawa de puesta en marcha y operación del GBB19.**

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.2 Análisis de los diagramas de Ishikawa

El análisis parte del desglose detallado de cada categoría del diagrama inicial, identificando los factores clave y las conexiones críticas entre sus factores. La creación de varios diagramas de Ishikawa puede llevar a un entendimiento parcial de la información clave. Para complementar este análisis, los demás diagramas elaborados se incluyen en el anexo B. De esta manera, se facilita una interpretación más clara y estructurada de los problemas analizados al presentar la información principal en formato de tablas, organizando los puntos críticos de manera concisa. Este análisis se desglosa en las tablas 5 a la 11, donde se sintetizan los factores clave identificados. Entre estos, destacan las fallas de sellado, la acumulación de microorganismos, la pérdida de presión y el flujo inadecuado de aire, cada uno asociado a factores como la calidad de los materiales, la falta de protocolos de limpieza y el monitoreo insuficiente. Este análisis aborda las causas principales de estos problemas y resalta las áreas de mejora esenciales para optimizar el rendimiento del sistema, permitiendo una visión integrada de los factores que impactan su eficiencia.

**Tabla 4. Problemas de Sellado**

Categoría	Causas Principales	Descripción
<b>Materiales</b>	Materiales incompatibles, fatiga y desgaste del material	Los materiales no soportan las condiciones operativas, lo que afecta el sellado.
<b>Métodos</b>	Mantenimiento inadecuado	Falta de mantenimiento preventivo o correctivo, lo que contribuye al problema.
<b>Mano de Obra</b>	Error humano en el ensamblaje	El proceso de ensamblaje tiene errores que afectan el sellado.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Máquinas</b>	Mayor presión interna	Las condiciones operativas aumentan la presión interna, afectando el sellado.
<b>Medio Ambiente</b>	Impactos externos	Factores ambientales externos influyen en el deterioro del sellado.
<b>Medición</b>	Falta de inspección regular	La falta de control continuo permite que los problemas pasen desapercibidos.

Fuente: Elaboración Propia

Las fallas en el sellado son causadas principalmente por la incompatibilidad de los materiales con las condiciones operativas, la falta de mantenimiento adecuado y errores humanos durante el ensamblaje. Además, las condiciones ambientales externas y la falta de inspección regular agravan la situación, lo que lleva a una reducción en la vida útil de los sistemas de sellado.

**Tabla 5. Problema - Acumulación de Microorganismos**

Categoría	Causas Principales	Descripción
<b>Materiales</b>	Presencia de nutrientes, materiales porosos	Los materiales promueven el crecimiento microbiano y su adhesión.
<b>Métodos</b>	Falta de desinfección y procedimientos de limpieza inadecuados	No existen procesos definidos para la limpieza y desinfección adecuada.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Mano de Obra</b>	Omisión de protocolos de limpieza	Falta de capacitación en prácticas correctas de limpieza y desinfección.
<b>Máquinas</b>	Áreas difíciles de limpiar	Algunas partes del equipo no permiten una limpieza adecuada.
<b>Medio Ambiente</b>	Movimientos de aire contaminado	El aire puede transportar contaminantes desde otras áreas.
<b>Medición</b>	Falta de inspección regular	El problema no se monitorea adecuadamente, permitiendo la acumulación de microorganismos.

Fuente: Elaboración Propia

La acumulación de microorganismos en el sistema se debe a la presencia de materiales porosos que facilitan el crecimiento microbiano, la falta de protocolos adecuados de limpieza y desinfección, así como una deficiente capacitación del personal. Las áreas difíciles de limpiar en las máquinas y la contaminación del aire empeoran este problema, lo que subraya la necesidad de una mayor vigilancia y controles regulares.

**Tabla 6. Problema - Pérdida de Presión de Aire y Flujo Inadecuado**

Categoría	Causas Principales	Descripción
<b>Materiales</b>	Materiales defectuosos, partículas o sedimentos	Los materiales de baja calidad y los sedimentos afectan el flujo y presión de aire.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Métodos</b>	Falta de monitoreo y ajuste de parámetros	No se ajustan los parámetros adecuados para mantener un flujo estable.
<b>Mano de Obra</b>	Omisión de protocolos operativos	El personal no sigue los procedimientos de operación estándar.
<b>Máquinas</b>	Bomba de aire defectuosa o ineficiente	Las bombas de aire no operan correctamente, afectando el flujo de aire.
<b>Medio Ambiente</b>	Temperatura y humedad que favorecen la bioinrustación	Condiciones ambientales inadecuadas que contribuyen a la acumulación de bioinrustaciones.
<b>Medición</b>	Falta de monitoreo regular de la presión y el flujo	No se realiza seguimiento continuo de las condiciones de operación.

Fuente: Elaboración Propia

La calidad de los materiales y la eficiencia de las máquinas juegan un papel crucial en la pérdida de presión y flujo. La ausencia de monitoreo constante y ajustes en los parámetros operativos, sumado a las condiciones ambientales que favorecen el bioinrustaciones, son factores que contribuyen a este fenómeno, afectando el rendimiento general del sistema.

**Tabla 7. Problema – Falta de Acceso para Sensores de Monitoreo**

Categoría	Causas Principales	Descripción
<b>Materiales</b>	Materiales que dificultan la perforación o montaje	Los materiales no son adecuados para integrar sensores.
<b>Métodos</b>	Diseño del sistema sin considerar la integración de sensores	No se tiene en cuenta la instalación adecuada desde la fase de diseño.
<b>Mano de Obra</b>	Falta de atención al detalle	Errores en la ejecución debido a una planificación deficiente.
<b>Máquinas</b>	Equipos inadecuados para la instalación de sensores	Los equipos actuales no facilitan la correcta instalación de los sensores.
<b>Medio Ambiente</b>	Entorno de trabajo con acceso limitado	El entorno físico no permite un acceso fácil para la instalación de sensores.
<b>Medición</b>	Puntos de medición mal ubicados o inaccesibles	Falta de monitoreo adecuado por dificultades en los puntos de acceso.

Fuente: Elaboración Propia

La limitación en el acceso a los sensores suele ser el resultado de varios factores clave: la selección de materiales inadecuados, un diseño que carece de flexibilidad, errores cometidos durante la ejecución de la obra, y la ubicación incorrecta de los puntos de medición. Estos problemas no solo afectan la funcionalidad del sistema, sino que también incrementan los costos de mantenimiento y operación a largo plazo. Para garantizar una

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

instalación efectiva y eficiente, es crucial implementar una planificación integral desde las etapas iniciales del proyecto. Esto incluye la selección cuidadosa de materiales y equipos compatibles, así como un diseño optimizado que facilite el acceso y mantenimiento de los sensores, minimizando así posibles errores de instalación y asegurando un desempeño confiable.

**Tabla 8. Problema – Contaminación Biológica**

Categoría	Causas Principales	Descripción
<b>Materiales</b>	Uso de líquidos no esterilizados, áreas difíciles de limpiar	La falta de control de materiales promueve la contaminación biológica.
<b>Métodos</b>	Ausencia de protocolos claros para la desinfección.	Los métodos no son uniformes, lo que permite la proliferación de microorganismos.
<b>Mano de Obra</b>	Omitir pasos críticos en la limpieza	Falta de formación y negligencia durante los procedimientos de limpieza.
<b>Máquinas</b>	Mantenimiento inadecuado, piezas desgastadas	La falta de mantenimiento adecuado contribuye a la contaminación.
<b>Medio Ambiente</b>	Falta de control en variables ambientales	No se ajustan correctamente factores como la temperatura o humedad.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Medición</b>	Falta de monitoreo de microorganismos, métodos ineficaces	Las detecciones tardías o imprecisas permiten que el problema crezca.
-----------------	---	---

Fuente: Elaboración Propia

La contaminación biológica es un problema frecuente que ocurre debido a deficiencias en la limpieza, el uso de materiales inadecuados y la falta de un control ambiental adecuado. Estas deficiencias crean condiciones propicias para la proliferación de microorganismos, lo que puede comprometer la calidad y seguridad de los entornos afectados. Además, la ausencia de protocolos definidos y la insuficiencia en las labores de mantenimiento agravan significativamente este riesgo, facilitando el desarrollo de focos de contaminación. Para mitigar este problema, resulta imprescindible implementar procedimientos de limpieza estrictos, establecer programas de monitoreo continuo y garantizar el cumplimiento riguroso de normas de higiene y mantenimiento. Estas medidas no solo reducen los riesgos biológicos, sino que también contribuyen a mantener ambientes más seguros y controlados.

**Tabla 9. Problema – Exposición Parcial del Fotobiorreactor a un Entorno no Controlado**

Categoría	Causas Principales	Descripción
<b>Materiales</b>	Materiales deteriorados, sistemas de sellado defectuosos.	Los materiales no resisten las condiciones, lo que causa fugas o exposición.
<b>Métodos</b>	Ausencia de protocolos claros y mantenimiento deficiente.	Las prácticas deficientes permiten que el entorno afecte al equipo.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Mano de Obra</b>	Omitir pasos críticos en el mantenimiento.	Fallos humanos durante las inspecciones y trabajos de mantenimiento.
<b>Máquinas</b>	Equipos de sellado ineficaces, sistemas de control ambiental insuficientes.	Las máquinas no aíslan correctamente el fotobiorreactor del ambiente.
<b>Medio Ambiente</b>	Variaciones en condiciones ambientales que afectan el aislamiento.	Los cambios en el entorno exponen al equipo a riesgos de contaminación.
<b>Medición</b>	Falta de monitoreo regular de las condiciones ambientales.	La ausencia de seguimiento oportuno facilita la exposición a entornos no controlados.

Fuente: Elaboración Propia

El uso de materiales de sellado defectuosos, combinado con la falta de un mantenimiento adecuado, facilita la exposición del fotobiorreactor a condiciones del ambiente externo. Esta situación no solo compromete la integridad estructural del sistema, sino que también aumenta el riesgo de contaminación y reduce la eficiencia operativa. Para prevenir estos problemas, es fundamental emplear materiales de sellado de alta calidad, garantizar una instalación adecuada y establecer un programa regular de mantenimiento preventivo. Asimismo, implementar sistemas de monitoreo ambiental efectivos permite detectar y corregir posibles fallas de manera oportuna, asegurando así la estabilidad y el óptimo funcionamiento del fotobiorreactor.

**Tabla 10. Problema – Bioincrustaciones**

Categoría	Causas Principales	Descripción
<b>Materiales</b>	Materiales que favorecen la adhesión microbiana	Superficies que permiten la acumulación de microorganismos.
<b>Métodos</b>	Condiciones operativas que favorecen la formación de bioincrustaciones	Falta de control en variables de operación que contribuyen a la formación de incrustaciones.
<b>Mano de Obra</b>	Error en la inspección, manejo inadecuado de productos químicos	El personal comete errores durante las inspecciones y no maneja bien los productos.
<b>Máquinas</b>	Diseño que no facilita la limpieza, puntos muertos de circulación	Las máquinas tienen áreas inaccesibles donde se acumulan sedimentos y residuos.
<b>Medio Ambiente</b>	Iluminación insuficiente o luz parcial	La falta de luz adecuada promueve la proliferación de microorganismos.
<b>Medición</b>	Falta de monitoreo del crecimiento de microorganismos	Los problemas no se detectan oportunamente, permitiendo el crecimiento excesivo de bioincrustaciones.

Fuente: Elaboración Propia

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Las bioincrustaciones son un fenómeno común que ocurre debido al uso de materiales que facilitan la adhesión microbiana, combinado con un control operativo insuficiente. Estas formaciones no solo afectan la eficiencia de los sistemas, sino que también pueden causar daños estructurales, incrementar los costos de mantenimiento y reducir la vida útil de los equipos. Para mitigar este problema, es esencial optimizar la accesibilidad para las labores de limpieza, implementar un manejo adecuado de productos químicos que prevengan el crecimiento microbiano y establecer sistemas de monitoreo continuo para detectar y controlar a tiempo la proliferación de microorganismos. Estas medidas contribuyen significativamente a mantener la funcionalidad y confiabilidad de los sistemas expuestos a riesgos de bioincrustación.

De acuerdo con el análisis de los diagramas de Ishikawa, se identifican factores comunes que contribuyen a los problemas operativos del sistema GBB19, tales como la falta de monitoreo regular, materiales inadecuados y procedimientos deficientes. Las áreas más críticas involucran el uso de equipos obsoletos o ineficaces, la falta de procedimientos claros para limpieza y mantenimiento, y la poca atención a detalles en las labores manuales, lo cual afecta la correcta operación del fotobiorreactor y promueve la contaminación biológica y las bioincrustaciones. Los aspectos clave a optimizar incluyen:

- 1. Optimización de materiales:** Reemplazo de materiales por otros más resistentes y que faciliten el mantenimiento.
- 2. Fortalecimiento de los métodos:** Desarrollo de procedimientos más rigurosos y detallados para la integración de sensores, la limpieza y el mantenimiento preventivo.
- 3. Capacitación del personal:** Enfocar la formación del personal en el seguimiento de protocolos críticos y mejorar la atención al detalle.
- 4. Monitoreo regular:** Implementación de un sistema de medición y monitoreo continuo para controlar los factores ambientales y operativos que influyen en la operación del equipo.

### 4.2.3 Análisis de modo y efecto de fallos

Una vez identificados los modos potenciales de fallo del ensamblaje y desensamblaje del FBR realizado por Ballesteros (GBB19), se analizan a fondo en el siguiente Análisis de Modo y Efecto de Fallos (AMEF), que se encuentra detallado en la Tabla 12. En este

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

análisis, los modos potenciales de fallo se eligieron en función de su valor de Severidad, priorizando aquellos que podrían tener un mayor impacto negativo en el sistema.

Desde la perspectiva de ingeniería de procesos, el análisis AMEF resultó fundamental para priorizar mejoras, al identificar de forma clara qué fallas podían comprometer el funcionamiento del sistema. Esta herramienta permitió enfocar los esfuerzos en puntos críticos, optimizando los recursos y asegurando que los cambios tuvieran un impacto directo en la confiabilidad y eficiencia del prototipo.

Los modos de fallo que resultaron prioritarios para su evaluación e intervención inmediata fueron los relacionados con la contaminación biológica, la pérdida de presión de aire y el flujo inadecuado. También se consideraron relevantes los problemas de sellado y la exposición parcial del fotobiorreactor a un entorno no controlado.

En cuanto a los problemas de sellado, las incidencias se atribuyeron principalmente a una mala manipulación durante el ensamblaje, una inspección deficiente al adherir los materiales a la placa de acrílico, o bien a la fatiga y desgaste del material de sellado.

En el caso de la contaminación biológica y la exposición del FBR a un entorno no controlado, la causa fue la manipulación inadecuada por parte del personal, sumada a la ausencia de protocolos rigurosos de higiene, lo que propició un entorno adverso para el cultivo. Esto derivó en una mayor presencia de organismos contaminantes y en una reducción significativa de la calidad y el rendimiento del sistema.

Adicionalmente, el flujo inadecuado generado por la bomba de aire, ya sea por falta de mantenimiento, una configuración incorrecta o la acumulación de sedimentos de microalgas en los difusores, contribuyó a la inestabilidad del sistema. Este flujo irregular no solo afectó la oxigenación del cultivo, sino que también agravó los problemas de pérdida de presión, disminuyendo la efectividad del proceso.

**Tabla 11. Análisis Modal de Efectos y Fallos**

ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA (AMEF)

**ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA (AMEF)**

Nombre del producto		Mantenimiento de un fotobioreactor tipo alifit		Preparado por:		Número de AMEF														
Equipo Central:		Jefatura de Ingeniería Industrial		Fecha Cierre		Página _____ de _____														
ID	Función de Proceso	Requerimiento	Modo potencial de falla	Efecto potencial de falla	Síntesis	Causa(s) potencial de la falla	Fecha AMEF (orig):	Dic-2024	Fecha AMEF	Dic-2024	Nº de AMEF									
						Presencia de nutrientes que favorecen el crecimiento microbiano	6	Control de la cantidad de fertilizante utilizado	7	Control de los actuales del proceso de prevención	D	Controles actuales de detección	N	Acciones recomendadas	Responsabilidad	Avances implementados	Síntesis	Ocupación	Defectos	Nº de AMEF
						Introducción de microorganismos dentro otras áreas	6	Esterilización de materiales y equipos	8	Inspección visual	E	Inspección visual en laboratorio	252	Diseno que facilita el cumplimiento del sistema. Análisis microbiológicos para identificar posibles implementar procesos de limpieza y esterilización en cada ciclo de uso	Implementado	6	4	5	120	
						Falta de inspección regular	7	Ninguno	7	Inspección visual	E	Inspección visual	288	Establecer zonas de control y protocolos de acceso para reducir el riesgo de contaminación. Realizar monitoreos microbiológicos periódicos para identificar contaminación temprana.	Implementado	6	5	6	180	
						Materiales porosos o que favorecen la adhesión microbiana	6	Altauta del fluido de aire en los difusores del fotor	8	Inspección visual	E	Falta de información sobre las actividades realizadas	294	Realización de un programa de inspección regular y funcional					0	
						Movimientos de aire que generan contaminantes	7	Ninguno	8	Inspección visual	E	Inspección visual	288	Monitorear periódicamente la bicarbonato en las superficies específicas. Seleccionar y aplicar las técnicas de limpieza y esterilización más apropiadas para las superficies en contacto directo con el cultivo.	Implementado	6	5	6	180	
						Falta de procedimientos estandarizados de limpieza de la fotor	7	Ninguno	8	Inspección visual	E	Inspección visual	336	Implementación de filtros para las áreas críticas del sistema.					0	
						Falta de desinfección o esterilización adecuada	7	Ninguno	7	Inspección visual	E	Inspección visual	294	Implementar procedimientos estandarizados de limpieza y esterilización de las áreas críticas del sistema.	Implementado	6	5	6	180	
						Áreas del equipo que son difíciles de limpiar	7	Ninguno	8	Inspección visual	E	Inspección visual	294	Implementar procedimientos estandarizados de limpieza y esterilización de las áreas críticas del sistema.	Implementado	5	5	4	100	
						Nula capacitación en limpieza y desinfección	8	Instructores de limpieza y desinfección	8	Inspección visual	E	Inspección visual	336	Realizar un análisis del sistema para identificar las áreas críticas, las que han sido identificadas como esenciales para la limpieza y desinfección de dichas áreas.					0	
						Manufactura actual del sistema que no tiene la capacidad de circulación adecuada	8	Diseño de la bomba para ayudar a que exista una mejor circulación del líquido	8	Inspección visual	E	Inspección visual	384	Establecimiento de protocolos/instrucciones para enfocados en buenas prácticas de limpieza y desinfección. Proporcionar manuales específicos para abordar estas áreas inaccesibles.	Implementado	5	5	6	150	
						Omisión de protocolos de limpieza	8	Instructores de limpieza y desinfección	9	Inspección visual	E	Inspección visual	384	Monitoreo regular tanto de dispositivos de control como de la demanda del cultivo en la planta crítica.	Implementado	6	7	6	252	
						Omisión de protocolos de limpieza	8	Instructores de limpieza y desinfección	9	Inspección visual	E	Inspección visual	432	Realización de procedimientos de limpieza y desinfección previos, implementar manuales en línea y facilitar la capacitación.	Implementado	4	5	7	140	

Grupo de trabajo del proyecto de "Energías Renovables y Productos Sustentables", integrado por: M.C. MÓNICA MANZANO HERRERA, D.R. JOSE ALFREDO CARAZO LUNA, D.R. ROGELIO VALADEZ BLANCO, D.R. PAULA CELIA GUADARRAMA MEDNDOZA.

Reducción de la transferencia de nutrientes y gases a las células de las microalgas

Acumulación de microorganismos en la interfaz líquido-gas

Limpieza, desinfección y reemplazo de componentes para garantizar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil

Puesta en marcha y operación

1

Equipo Central: Jefatura de Ingeniería Industrial					Fecha Clave Dic-2024					Fecha AMEF (Orig): Dic-2024		Página 3 de 7						
ID	Función de Proceso	Requerimiento	Modo potencial de falla	Efecto potencial de falla	S E V	Causa(s) potencial de la falla	O C U	Controles actuales del proceso de prevención	D E T	Controles actuales de detección	N P R	Acciones recomendadas	Responsabilidad	Acciones implementadas	S E V	O C U	D E T	N P R
1	Puesta en marcha y operación	Limpieza, desinfección y reemplazo de componentes para garantizar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil.	Afectación a la circulación de los nutrientes y gases necesarios para el crecimiento de las microalgas	Perdida de presión de aire y flujo inadecuado	9	Materiales que favorecen la acumulación de bioinrustaciones	7	Ninguno	8	Inspección visual	504	Implementar inspecciones regulares para identificar el crecimiento de bioinrustaciones. Evaluar el uso de recubrimientos antimicrobianos	Responsabilidad	Implementado	7	4	6	168
						Temperatura y humedad que favorecen el crecimiento de bioinrustaciones	7	Uso de termómetro, control de la temperatura y humedad con el uso de aire acondicionado	8	Ninguno	504	Implementar la regulación y el monitoreo continuo de las condiciones de operación para prevenir problemas en el rendimiento del sistema, derivados de variables ambientales que favorecen el crecimiento microbiológico.	Responsabilidad	Implementado	7	5	7	245
						Falta de monitoreo regular de la presión y el flujo de aire	7	Ninguno	7	Ninguno	441	Uso de sensores de presión y flujo conectados a un sistema de monitoreo	Responsabilidad	Implementado	7	4	6	168
						Falta de monitoreo y ajuste de parámetros operativos	8	Revisión del crecimiento del cultivo y revisión en laboratorio cada que hay personal interesado en el proyecto	8	Inspección visual y con equipo de laboratorio	576	Automatización del monitoreo de parámetros clave con sensores y sistemas de control a través de PLCs o SCADA.	Responsabilidad	Implementado	7	5	7	245
						Omisión de protocolos operativos	8	Instrucción del personal con capacitación clara y práctica	8	Ninguno	576	Establecer auditorias regulares y sistemas de supervisión, como checklist	Responsabilidad	Implementado	7	4	6	168
						Equipo de circulación inefficiente o insuficiente	6	Ajuste o reemplazo del equipo	8	Notorio bajo flujo del aire en el sistema. Ruido excesivo.	432	Realizar un análisis de diseño del sistema para identificar y corregir los puntos muertos o cuellos de botella. Implementar mantenimiento preventivo para garantizar el rendimiento del equipo. Sustituir componentes inefficientes para garantizar una circulación óptima.	Responsabilidad	Implementado	7	4	6	168
						Componentes defectuosos o de baja calidad	7	Reemplazo por otro tipo de material	7	Inspección visual	441	Implementar un sistema de control de calidad para evaluar los componentes antes de su instalación. Establecer un programa de mantenimiento preventivo.	Responsabilidad	Implementado	7	5	7	245
						Nula capacitación en prácticas de mantenimiento y operación	8	Poca información disponible, carece de detalles concretos.	9	Ninguna	648	Creación de manuales claros y detallados para la capacitación del personal en pasos claves del mantenimiento, operación y de las inspecciones posteriores para su validación adaptados al nivel de conocimiento del personal.	Responsabilidad	Implementado	7	4	6	168
						Falta de mantenimiento de la bomba de aire	6	Ajuste o reemplazo del equipo	7	Notorio bajo flujo del aire en el sistema. Ruido excesivo.	378	Establecer un programa de mantenimiento preventivo para limpiar, lubricar y revisar la bomba periódicamente	Responsabilidad	Implementado	7	4	6	168
						Acumulación o presencia de partículas o sedimentos de bioinrustaciones	6	Diseño pensado para que la turbulencia genere caos en las áreas con mayor asentamiento de microalgas	8	Inspección visual	432	Monitoreo continuo de las áreas críticas con inspecciones visuales. Implementar mantenimiento preventivo para garantizar el rendimiento del equipo.	Responsabilidad	Implementado	8	4	6	192
						Densidad celular elevada	6	Pruebas de laboratorio al cultivo obtenido: absorbancia, color, peso seco y conteo celular	7	Inspección visual	378	Implementar sistemas de monitoreo continuo para evaluar la densidad celular y los parámetros asociados (pH, oxígeno y luz). Implementar métodos de cosecha parcial o dilución para manejar densidades celulares altas.	Responsabilidad	Implementado	7	3	5	105
						Bomba de aire defectuosa o inefficiente	5	Respaldo de otro compresor/bomba de aire	7	Mantenimiento preventivo	315	Realizar mantenimiento preventivo periódico, incluyendo limpieza, lubricación y revisión de componentes internos. Contar con un equipo de respaldo para minimizar el impacto de fallas inesperadas	Responsabilidad	Implementado	7	2	5	70

Grupo de trabajo del proyecto de "Energías Renovables y Productos Sustentables" integrado por: M.C. MOISÉS MANZANO HERRERA, Dr. JOSÉ ALFREDO CARAZO LUNA, Dr. PAULA CECILIA GUADARRAMA MENDOZA.



Equipo Central: Jefatura de Ingeniería Industrial					Fecha Clave Dic-2024					Fecha AMEF (Origen): Dic-2024		Página 5 de 7								
ID	Función de Proceso	Requerimiento	Modo potencial de falla	Efecto potencial de falla	S E V	Causal(s) potencial de la falla	O C U	Controles actuales del proceso de prevención	D E T	Controles actuales de detección	N P R	Acciones recomendadas	Responsabilidad	Acciones implementadas	S E V	O C U	D E T	N P R		
1	Puesta en marcha y operación	Limpieza, desinfección y reemplazo de componentes para garantizar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil.	Contaminación biológica	Afectación de la pureza del cultivo	10	Métodos de detección ineficaces o tardíos	6	Ninguno	8	Contaminación del cultivo	480	Revisar y actualizar los protocolos de detección regularmente. Implementar un sistema de detección temprana basado en parámetros críticos.	Dr. JOSÉ ALFREDO CARAZO LUNA, Dr. ROGELIO VALADEZ BLANCO, Dra. PAULA CECILIA GUADARRAMA MENDOZA.							0
						Falta de monitoreo regular de microorganismos	7	Ninguno	8	Contaminación del cultivo	560	Diseño e implementación de un plan de muestreo regular en puntos críticos del sistema. Análisis externos con tratamientos preventivos para reducir el riesgo de proliferación indeseada.								Implementado 8 5 6 240
						Uso de líquidos no esterilizados	6	Capacitación en el laboratorio	8	Contaminación del cultivo	480	Capacitación del personal procedimientos de manejo séptico. Implementar un sistema de esterilización para líquidos antes de su uso en el proceso.								Implementado 8 4 5 160
						Áreas del equipo que son difíciles de limpiar	6	Aumento del flujo de aire en la zona afectada	8	Inspección visual	480	Realizar un análisis de diseño del sistema para identificar las áreas problemáticas desde la perspectiva de la higiene industrial. Uso de herramientas especializadas para la limpieza de áreas complejas. Establecer procedimientos específicos para abordar estas áreas inaccesibles.								Implementado 9 5 7 315
						Falta de procedimientos estandarizados de desinfección	6	Descripción breve sobre cantidades de productos desinfectantes a utilizar	7	Contaminación del cultivo	420	Desarrollo y documentación de procedimientos claros para la desinfección en todas las áreas del equipo. Capacitar al personal en los métodos y frecuencia adecuados de desinfección.								Implementado 8 4 5 160
						Falta de reemplazo de piezas desgastadas o contaminadas	7	Reuestos adquiridos y almacenados	6	Contaminación del cultivo	420	Establecer un programa de mantenimiento preventivo que incluya la inspección y de ser necesario el reemplazo de piezas críticas por cada ciclo de uso. Llevar registros detallados del estado y la vida útil de cada componente.								Implementado 7 4 4 112
						Mantenimiento inadecuado ó infrecuente	7	Ninguno, poca información sobre la esterilización del sistema	8	Contaminación del cultivo	560	Establecer un programa de mantenimiento preventivo que incluya la inspección regular.								Implementado 8 5 6 240
						Omisión de pasos críticos en la limpieza y desinfección	7	Descripción breve sobre cantidades de productos desinfectantes a utilizar	7	Contaminación del cultivo	490	Capacitación del personal en la importancia y correcta ejecución de cada paso. Implementar listas de verificación para asegurar que se cumplen todos los pasos de limpieza y desinfección. Supervisiones de las prácticas de limpieza y desinfección.								Implementado 7 4 4 112
						Limpieza inadecuada o insuficiente	7	Instrucciones de limpieza y desinfección breves	6	Inspección visual	420	Uso de herramientas y materiales adecuados para el sistema o equipo respetando los protocolos de limpieza efectiva. Realizar inspecciones visuales y pruebas microbiológicas después de la limpieza.								0
						Prácticas inadecuadas de manejo del equipo	6	Ninguno	7		420	Supervisiones regulares de las prácticas del manejo correcto del equipo. Creación de protocolos claros y accesibles para el uso del equipo.								Implementado 9 4 5 180
						Falta de control de variables del entorno	7	Control de algunas variables del entorno	6	Uso de algunos aparatos análogos de medición	420	Implementar un sistema de monitoreo continuo para las variables ambientales críticas.								0

Grupo de trabajo del proyecto de "Energías Renovables y Productos Sustentables" integrado por: M.C. MOISÉS MANZANO HERRERA, Dr. JOSÉ ALFREDO CARAZO LUNA, Dr. ROGELIO VALADEZ BLANCO, Dra. PAULA CECILIA GUADARRAMA MENDOZA.

Equipo Central: Jefatura de Ingeniería Industrial					Fecha Clave Dic-2024				Fecha AMEF (Org): Dic-2024	Página <u>6</u> de <u>7</u>								
ID	Función de Proceso	Requerimiento	Modo potencial de falla	Efecto potencial de falla	S E V	Causa(s) potencial de la falla	O C U	Controles actuales del proceso de prevención	D E T	Controles actuales de detección	N P R	Acciones recomendadas	Responsabilidad	Acciones implementadas	S E V	O C U	D E T	N P R
1	Limpieza, desinfección y reemplazo de componentes para garantizar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil.	Exposición parcial del fotobioreactor a un entorno no controlado	Desviaciones en los parámetros físicos o químicos esenciales que podrían reducir la eficiencia del cultivo.	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
2	Inestabilidad en el suministro de nutrientes	Variaciones de variables del entorno que afectan el aislamiento	Reducción del flujo de agua	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
3	Riesgo de contaminación con microorganismos indeseables o competidores	Variaciones de variables del entorno que afectan el aislamiento	Reducción del flujo de agua	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
4	Grado de trabajo del proyecto de "Energías Renovables y Productos Sustentables" integrado por: M.C. Moisés Manzano Herrera, Dr. José Alfredo Garazo Luna, Dra. Paúla Cecilia Guadarrama Mendoza.	Desviaciones en los parámetros físicos o químicos esenciales que podrían reducir la eficiencia del cultivo.	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	

Equipo Central: Jefatura de Ingeniería Industrial					Fecha Clave Dic-2024					Fecha AMEF (Orig): Dic-2024					Página 7 de 7				
ID	Función de Proceso	Requerimiento	Modo potencial de falla	Efecto potencial de falla	S E V	Causa(s) potencial de la falla	O C U	Controles actuales del proceso de prevención	D E T	Controles actuales de detección	N P R	Acciones recomendadas	Responsabilidad	Acciones Implementadas	S E V	O C U	D E T	N P R	
1	Puesta en marcha y operación	Reducción de la eficiencia de la luz transmitida al cultivo y afectar negativamente la calidad y cantidad de la biomasa producida	Bioincrustaciones	Limpieza, desinfección y reemplazo de componentes para garantizar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil.	6	Materiales que favorecen la adhesión microbiana	7	Reemplazo del material	8	Inspección visual	336	Incorporar tratamientos químicos o físicos periódicos para evitar acumulaciones. Implementar rutinas de limpieza y desinfección para prevenir la formación de bioincrustaciones. Realizar estudios de compatibilidad de materiales con el entorno y el proceso operativo.	ovables y Productos Sustentables" integrado por: M.C. MOISÉS MANZANO HERRERA, Dr. JOSÉ ALFREDO CARAZO LUNA, Dr. ROGELIO VALADEZ BLANCO, Dra. PAULA CECILIA GUADARRAMA MENDOZA.	Implementado	4	4	5	80	
						Error en la inspección	7	Ninguno	8		336	Estandarización de procedimientos de inspección y utilizar listas de verificación detalladas. Incorporar herramientas tecnológicas (como cámaras, sensores) que minimicen el error humano.					0		
						Puntos muertos y áreas de baja circulación	6	Rediseño pensado para evitar bioacumulación	8	Inspección visual	288	Implementar limpiezas regulares y exhaustivas para evitar acumulaciones en estas zonas. Incorporar sensores de flujo que ayuden a identificar áreas con baja circulación. Rediseñar componentes críticos para mejorar la circulación en todas las áreas del sistema.		Implementado	5	4	6	120	
						Manejo inapropiado de los productos químicos	8	Descripciones breves sobre su uso	8	Problemas en el sistema dependiendo el contexto	384	Establecer procedimientos operativos claros para la preparación, aplicación y almacenamiento de cualquier sustancia química involucrada en la operación y mantenimiento del sistema, minimizando errores humanos.		Implementado	5	6	6	180	
						Diseno que no facilita la limpieza y el mantenimiento	6	Ninguno	8	Problemas al manipular el fotobioreactor	288	Realizar un análisis de diseño del sistema para identificar las áreas problemáticas. Uso de herramientas especializadas para la limpieza de dichas áreas. Establecer procedimientos específicos para abordar estas áreas inaccesibles.					0		
						Falta de personal	8	Uso de estudiantes realizando el Servicio Social	7	Poca participación en el desarrollo del proyecto	336	Fomentar la participación activa de estudiantes para ampliar el personal involucrado en el proyecto, contribuyendo al desarrollo académico y científico del proyecto. Implementar herramientas de automatización para reducir la dependencia del personal en tareas repetitivas o monótonas. Proporcionar capacitación cruzada para que el personal existente pueda asumir múltiples roles si es necesario.					0		
						Alta concentración de sedimentos	7	Uso de variedad de difusores de aire de distintas geometrías	8	Inspección visual	336	Establecer una rutina de limpieza y mantenimiento específica para evitar la acumulación. Establecer una dosificación precisa basada en las necesidades específicas del cultivo de microalgas, evitando excesos que contribuyan a la formación de sedimentos o precipitados. Implementar análisis periódicos del medio de cultivo para identificar y controlar la acumulación de compuestos no absorbidos por las microalgas (como fosfatos o nitratos residuales).		Implementado	4	4	5	80	
						Áreas con poca circulación de agua	6	Uso de variedad de difusores de aire de distintas geometrías	8	Inspección visual	288	Implementar bombas o compresores de mayor potencia adicionales para mejorar la circulación. Realizar limpiezas regulares y revisar obstrucciones en el sistema de circulación de aire.		Implementado	4	4	6	96	
						Condiciones operativas que favorecen la formación de bioincrustaciones	8	Entorno no adecuado para la operación del sistema	8	Inspección visual	384	Optimizar las condiciones operativas (pH, temperatura, flujo) para minimizar el crecimiento microbiano. Implementar monitoreos continuos.					0		

ovables y Productos Sustentables" integrado por: M.C. MOISÉS MANZANO HERRERA, Dr. JOSÉ ALFREDO CARAZO LUNA, Dr. ROGELIO VALADEZ BLANCO, Dra. PAULA CECILIA GUADARRAMA MENDOZA.

Análisis y Monitoreo							Implementación y Mantenimiento				
Problema			Solución		Categoría		Criterio		Efecto		Estado
Deterioro de la calidad del agua	8	Instrucciones de limpieza y desinfección breves	8	Inspección visual	384						0
Competencia por nutrientes	7	Diseño pensado para que la turbulencia generada limpie las áreas con mayor asentamiento de microalgas	8	Seguimiento del crecimiento del cultivo	336						Implementado 4 3 4 48
Iluminación insuficiente o aplicación de luz parcial	7	Mantenimiento de los sistemas de iluminación	7	Inspección visual	294						Implementado 5 4 5 100
Limpieza inadecuada o deficientes	8	Instrucciones de limpieza y desinfección	8	Inspección visual	384						Implementado 4 4 4 64

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 FASE 2: DISEÑO EN EL NIVEL SISTEMA

La revisión de las acciones recomendadas implementadas tras el análisis modal de fallos y efectos (AMEF) es fundamental para garantizar que se hayan mitigado eficazmente los riesgos identificados en el fotobiorreactor (FBR). Esta nueva evaluación busca validar que las medidas aplicadas no solo hayan logrado disminuir las puntuaciones de severidad, ocurrencia y detección en los modos de falla críticos, sino también que sean congruentes con las condiciones y recursos disponibles durante los experimentos realizados en los laboratorios de la universidad.

Las acciones propuestas que se implementaron fueron seleccionadas por adaptarse de manera adecuada a las capacidades técnicas, materiales y metodológicas del entorno de trabajo. Este enfoque práctico garantiza que los resultados obtenidos reflejen mejoras reales y sostenibles, además de ser representativos de las condiciones operativas del sistema. La nueva evaluación busca identificar si estas medidas han sido suficientes o si persisten oportunidades de mejora, proporcionando un análisis más estructurado que fortalezca el proceso de mejora continua en el diseño y operación del FBR, como se detalla en la Tabla 13.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

**Tabla 12. Evaluación de las propuestas implementadas.**

Fuente: Elaboración propia.

Acciones recomendadas	Acciones implementadas	S E V	O C U	D E T	N P R
<b>Realización de un programa de inspección regular y funcional para componentes clave</b>					<b>0</b>
<b>Establecer límites operativos claros para los ciclos de presión, así como la inspección y el mantenimiento regular de las zonas de unión del FBR</b>	Implementado	8	4	7	224
<b>Capacitación adecuada al personal responsable de la inspección y el mantenimiento preventivo del fotobiorreactor</b>	Implementado	8	4	6	192
<b>Realización de pruebas de compatibilidad de los materiales con las sustancias y condiciones del proceso según sus especificaciones técnicas. Documentación y estandarización para futuros diseños o mantenimientos. Sustitución por nuevos materiales adecuados al sistema</b>	Implementado	7	6	5	210
<b>Creación de manuales claros y detallados para la capacitación del personal en pasos claves del ensamblaje y de las inspecciones posteriores para su validación</b>	Implementado	6	4	6	144
<b>Inspecciones periódicas visuales. Capacitación para el uso seguro y adecuado del equipo</b>	Implementado	8	3	6	144

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Inspección regular y sustitución según los ciclos de uso</b>	Implementado	7	4	6	<b>168</b>
<b>Diseño que facilite el drenado completo del sistema.</b> <b>Ánalisis microbiológicos para identificar posibles contaminantes.</b> <b>Implementar procesos de limpieza y esterilización entre cada ciclo de uso</b>	Implementado	6	4	5	<b>120</b>
<b>Establecer zonas de control y protocolos de acceso para reducir contaminación cruzada.</b> <b>Realizar monitoreos microbiológicos periódicos para identificar contaminación temprana.</b>	Implementado	6	5	6	<b>180</b>
<b>Realización de un programa de inspección regular y funcional</b>					<b>0</b>
<b>Monitorear periódicamente la biocarga en superficies específicas.</b> <b>Selección de materiales adecuados para las superficies en contacto directo con el cultivo.</b>	Implementado	6	5	6	<b>180</b>
<b>Implementación de filtros de aire en áreas críticas del sistema.</b>					<b>0</b>
<b>Implementar procedimientos estandarizados de limpieza.</b> <b>Inspecciones regulares.</b>	Implementado	6	5	6	<b>180</b>
<b>Implementar procedimientos claros y estandarizados de limpieza y esterilización con productos químicos validados.</b>	Implementado	5	5	4	<b>100</b>

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<p><b>Establecimiento de protocolos/ procedimientos enfocados en buenas prácticas de limpieza y desinfección.</b>  <b>Proporcionar manuales claros y gráficos para facilitar la capacitación.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p>5</p>	<p>5</p>	<p>6</p>	<p>150</p>
<p><b>Monitorización regular tanto de dispositivos de circulación como de la densidad celular del cultivo en puntos críticos.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p>6</p>	<p>7</p>	<p>6</p>	<p>252</p>
<p><b>Establecimiento de procedimientos obligatorios de desinfección previos, durante y después de la puesta en marcha. Implementar supervisiones regulares para asegurar el cumplimiento de dichos protocolos/ procedimientos.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>7</p>	<p>140</p>
<p><b>Realizar un análisis de diseño del sistema para identificar y corregir los puntos muertos o cuellos de botella en la circulación.</b>  <b>Implementar mantenimiento preventivo para garantizar el rendimiento del equipo.</b>  <b>Sustituir componentes ineficientes para garantizar una circulación óptima.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p>7</p>	<p>4</p>	<p>6</p>	<p>168</p>

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<p>Creación de manuales claros y detallados para la capacitación del personal en pasos claves del mantenimiento, operación y de las inspecciones posteriores para su validación adaptados al nivel de conocimiento del personal.</p>	<p>Implementado</p>	<p>7</p>	<p>5</p>	<p>7</p>	<p><b>245</b></p>
<p>Establecer un programa de mantenimiento preventivo para limpiar, lubricar y revisar la bomba periódicamente</p>					<p><b>0</b></p>
<p>Monitoreo continuo de las áreas críticas con inspecciones visuales. Implementar mantenimiento preventivo para garantizar el rendimiento del equipo.</p>	<p>Implementado</p>	<p>8</p>	<p>4</p>	<p>6</p>	<p><b>192</b></p>
<p>Implementar sistemas de monitoreo continuo para evaluar la densidad celular y los parámetros asociados (pH, oxígeno y luz). Realizar procesos de cosecha parcial o dilución para manejar densidades celulares altas.</p>	<p>Implementado</p>	<p>7</p>	<p>3</p>	<p>5</p>	<p><b>105</b></p>
<p>Realizar mantenimiento preventivo periódico, incluyendo limpieza, lubricación y revisión de componentes internos. Contar con un equipo de respaldo para minimizar el impacto de fallas inesperadas</p>	<p>Implementado</p>	<p>7</p>	<p>2</p>	<p>5</p>	<p><b>70</b></p>
<p>Realizar pruebas de ensamblaje para identificar posibles dificultades antes de la puesta en marcha. Seleccionar materiales compatibles con las herramientas y técnicas disponibles en el proceso de manufactura. Implementar manuales de procedimientos detallados sobre las técnicas y herramientas a utilizar.</p>	<p>Implementado</p>	<p>6</p>	<p>4</p>	<p>3</p>	<p><b>72</b></p>

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Implementar protocolos detallados para cada etapa del proceso</b>	Implementado	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>120</b>	
<b>Documentar todos los cambios realizados y sus impactos potenciales.</b>	Implementado	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>252</b>	
<b>Realizar revisiones ergonómicas del entorno de trabajo y ajustes si es necesario.</b> <b>Capacitar al personal para trabajar eficientemente en espacios reducidos cuando sea inevitable.</b>	Implementado	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>72</b>	
<b>Rediseño del sistema que integre la planificación de sensores.</b> <b>Identificar necesidades específicas de acceso y ubicación de sensores.</b> <b>Realizar simulaciones o pruebas que validen la accesibilidad a los puntos de instalación.</b>	Implementado	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>175</b>	
<b>Diseño e implementación de un plan de muestreo regular en puntos críticos del sistema.</b> <b>Ánalysis externos con tratamientos preventivos para reducir el riesgo de proliferación indeseada.</b>	Implementado	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>240</b>	
<b>Capacitación del personal en procedimientos de manejo aséptico.</b> <b>Implementar un sistema de esterilización para líquidos antes de su uso en el proceso.</b>	Implementado	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>160</b>	

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<p><b>Realizar un análisis de diseño del sistema para identificar las áreas problemáticas desde la perspectiva de la higiene industrial.</b></p> <p><b>Uso de herramientas especializadas para la limpiezas de áreas complejas.</b></p> <p><b>Establecer procedimientos específicos para abordar estas áreas inaccesibles.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>9</b></p>	<p><b>5</b></p>	<p><b>7</b></p>	<p><b>315</b></p>
<p><b>Desarrollo y documentación de procedimientos claros para la desinfección en todas las áreas del equipo.</b></p> <p><b>Capacitar al personal en los métodos y frecuencia adecuados de desinfección.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>8</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>5</b></p>	<p><b>160</b></p>
<p><b>Establecer un programa de mantenimiento preventivo que incluya la inspección y de ser necesario el reemplazo de piezas críticas por cada ciclo de uso.</b></p> <p><b>Llevar registros detallados del estado y la vida útil de cada componente.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>7</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>112</b></p>
<p><b>Establecer un programa de mantenimiento preventivo que incluya la inspección regular.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>8</b></p>	<p><b>5</b></p>	<p><b>6</b></p>	<p><b>240</b></p>
<p><b>Capacitación del personal en la importancia y correcta ejecución de cada paso.</b></p> <p><b>Implementar listas de verificación para asegurar que se cumplan todos los pasos de limpieza y desinfección.</b></p> <p><b>Supervisiones de las prácticas de limpieza y desinfección.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>7</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>112</b></p>

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<p><b>Realización de pruebas de compatibilidad de los materiales con las sustancias y condiciones del proceso según sus especificaciones técnicas.</b>  <b>Documentación y estandarización para futuros diseños o mantenimientos</b></p>	Implementado	7	5	4	140
<p><b>Implementar inspecciones regulares para identificar signos tempranos de corrosión o acumulaciones.</b>  <b>Evaluar el uso de recubrimientos resistentes a químicos o antimicrobianos durante la instalación.</b>  <b>Establecer procedimientos para evaluar y renovar recubrimientos protectores entre cada ciclo de uso.</b></p>	Implementado	6	3	5	90
<p><b>Supervisiones regulares de las prácticas del manejo correcto del equipo.</b>  <b>Creación de protocolos claros y accesibles para el uso del equipo.</b></p>	Implementado	9	4	5	180
<p><b>Implementar un sistema de monitoreo continuo para las variables ambientales críticas.</b></p>					0
<p><b>Establecer un programa de mantenimiento preventivo basado en el tiempo o en la condición del equipo.</b>  <b>Llevar registros detallados del estado y la vida útil de cada componente del equipo.</b>  <b>Capacitar al personal para identificar señales tempranas de desgaste o mal funcionamiento.</b></p>	Implementado	6	4	5	120

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<p><b>Crear listas de verificación exhaustivas de los procedimientos de instalación y mantenimiento. Capacitaciones rigurosas hacia el personal sobre los procedimientos establecidos.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>6</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>5</b></p>	<p><b>120</b></p>
<p><b>Implementar pruebas regulares para verificar la efectividad del aislamiento.</b></p> <p><b>Estandarizar los procedimientos existentes sobre la instalación y mantenimiento de las barreras de aislamiento.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>6</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>96</b></p>
<p><b>Implementar el mantenimiento preventivo con inspecciones regulares para evaluar el estado de los materiales.</b></p> <p><b>Utilizar recubrimientos o tratamientos adicionales para prolongar la vida útil de los materiales.</b></p> <p><b>De ser necesario sustituir por alternativas más duraderas y resistentes al ambiente operativo.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>6</b></p>	<p><b>3</b></p>	<p><b>4</b></p>	<p><b>72</b></p>
<p><b>Incorporar monitoreo y regulación ambiental en tiempo real para detectar condiciones fuera de rango.</b></p> <p><b>Realizar evaluaciones periódicas de las condiciones ambientales y su impacto en el sistema.</b></p> <p><b>Mejorar el aislamiento físico del sistema con materiales de alta resistencia a variaciones de temperatura y humedad.</b></p>	<p>Implementado</p>	<p><b>7</b></p>	<p><b>6</b></p>	<p><b>5</b></p>	<p><b>210</b></p>

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<p><b>Capacitar al personal para identificar y solucionar problemas relacionados con el flujo de agua.</b></p> <p><b>Realizar limpiezas regulares del sistema para evitar obstrucciones.</b></p> <p><b>Rediseñar componentes que generen cuellos de botella en la circulación del agua.</b></p>	Implementado	7	4	5	140
<p><b>Incorporar tratamientos químicos o físicos periódicos para evitar acumulaciones.</b></p> <p><b>Implementar rutinas de limpieza y desinfección para prevenir la formación de bioincrustaciones.</b></p> <p><b>Realizar estudios de compatibilidad de materiales con el entorno y el proceso operativo.</b></p>	Implementado	4	4	5	80
<p><b>Implementar limpiezas regulares y exhaustivas para evitar acumulaciones en estas zonas.</b></p> <p><b>Incorporar sensores de flujo que ayuden a identificar áreas con baja circulación.</b></p> <p><b>Rediseñar componentes críticos para mejorar la circulación en todas las áreas del sistema.</b></p>	Implementado	5	4	6	120
<p><b>Establecer procedimientos operativos claros para la preparación, aplicación y almacenamiento de cualquier sustancia química involucrada en la operación y mantenimiento del sistema, minimizando errores humanos.</b></p>	Implementado	5	6	6	180

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<p>Establecer una rutina de limpieza y mantenimiento específica para evitar la acumulación.</p> <p>Establecer una dosificación precisa basada en las necesidades específicas del cultivo de microalgas, evitando excesos que contribuyan a la formación de sedimentos o precipitados.</p> <p>Implementar análisis periódicos del medio de cultivo para identificar y controlar la acumulación de compuestos no absorbidos por las microalgas (como fosfatos o nitratos residuales).</p>	Implementado	4	4	5	80
<p>Implementar bombas o compresores de mayor potencia adicionales para mejorar la circulación.</p> <p>Realizar limpiezas regulares y revisar obstrucciones en el sistema de circulación de aire.</p>	Implementado	4	4	6	96
<p>Evaluar y ajustar la dosificación de nutrientes para evitar el exceso que favorezca a organismos competidores. Regular las condiciones operativas para favorecer el crecimiento del organismo objetivo.</p> <p>Implementar análisis microbiológicos para detectar la presencia de microorganismos no deseados.</p>	Implementado	4	3	4	48
<p>Mantenimiento de los sistemas de iluminación.</p> <p>Ajuste de la geometría del sistema para maximizar la exposición lumínica.</p>	Implementado	5	4	5	100
<p>Implementar procedimientos estándar de limpieza.</p> <p>Capacitación al personal en técnicas de limpieza y uso adecuado de productos desinfectantes.</p> <p>Realizar inspecciones regulares y pruebas microbiológicas para evaluar la efectividad de las limpiezas realizadas.</p>	Implementado	4	4	4	64

## 4.4 FASE 3: DISEÑO DE DETALLE

En la fase de “diseño a detalle” se realiza una especificación de los requisitos técnicos y operativos, se seleccionan los materiales adecuados para soportar las condiciones del cultivo y se integran sistemas de control y monitoreo que mejoran la circulación del medio y la exposición a la luz, conforme al análisis realizado en el apartado anterior.

### 4.4.1 HoQ

Con las causas potenciales de falla ya organizadas, se da el siguiente paso: utilizarlas como base para construir la Casa de la Calidad que forma parte del Despliegue de la Función de Calidad. En esta primera fase, se establecen relaciones entre las necesidades del cliente y las especificaciones técnicas del producto. Esto significa conectar los requerimientos clave del fotobiorreactor con los parámetros técnicos que permitan optimizarlos, asegurando un diseño más eficiente y alineado con los objetivos del proyecto.

### 4.4.2 Necesidades del cliente

El primer paso en la Casa de la Calidad es definir los QUÉ, es decir, los requerimientos clave del fotobiorreactor desde la perspectiva del usuario o del proceso. Estos representan las necesidades esenciales que deben cumplirse para garantizar su eficiencia, durabilidad y funcionalidad.

**Tabla 13. Lista de necesidades del cliente, los “QUE”**

Función Primaria	Función Secundaria	Peso/ Importancia (1-10)	Peso Relativo (%)
<b>Integridad estructural y materiales</b>	Resistencia a variaciones de presión.	10	3.311258278
	Materiales duraderos y resistentes al desgaste.	10	3.311258278
	Compatibilidad química de materiales.	8	2.649006623
	Sellado eficiente y hermético.	10	3.311258278
	Recubrimientos protectores adecuados.	6	1.986754967
	Circulación eficiente del medio.	10	3.311258278
	Flujo de agua constante y óptimo.	10	3.311258278
	Aislamiento resistente a cambios ambientales.	8	2.649006623

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Diseño para facilidad de uso y mantenimiento</b>	Ensamblaje intuitivo y con mínima posibilidad de error.	8	2.649006623
	Limpieza completa y efectiva.	10	3.311258278
	Facilidad para cumplir protocolos de limpieza.	8	2.649006623
	Proceso de limpieza y desinfección claro.	10	3.311258278
	Protocolos claros para la desinfección.	8	2.649006623
	Eliminación de puntos muertos y buena circulación.	10	3.311258278
	Acceso fácil y seguro para operación y mantenimiento.	8	2.649006623
	Mantenimiento sencillo y programable.	8	2.649006623
	Fácil identificación y reemplazo de piezas.	8	2.649006623
<b>Control de calidad y monitoreo</b>	Monitoreo regular de microorganismos.	8	2.649006623

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Capacitación y operación segura</b>	Control eficiente de densidad celular.	8	2.649006623
	Minimización de bioincrustaciones y sedimentos.	10	3.311258278
	Reducción de acumulación de nutrientes no deseados.	8	2.649006623
	Control del uso de líquidos esterilizados.	8	2.649006623
	Puntos de acceso adecuados para sensores.	8	2.649006623
	Recubrimientos resistentes al ambiente operativo.	6	1.986754967
<b>Control de la calidad</b>	Capacitación en limpieza y desinfección.	8	2.649006623
	Capacitación en mantenimiento y operación.	8	2.649006623
	Procedimientos claros para manejo de químicos.	8	2.649006623
	Documentación de los procesos de aislamiento.	6	1.986754967

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Optimización del ambiente de cultivo</b>	Modificaciones planificadas y respaldadas.	6	1.986754967
	Documentación y definición de procedimientos de instalación/mantenimiento.	8	2.649006623
	Minimización de errores en fabricación y ensamblaje.	6	1.986754967
	Iluminación uniforme y suficiente.	8	2.649006623
	Aireación confiable y adecuada.	10	3.311258278
	Equipo de circulación eficiente.	10	3.311258278
<b>Optimización del ambiente de cultivo</b>	Flujo de agua uniforme en todas las áreas.	10	3.311258278
	Control eficiente de disponibilidad de nutrientes.	8	2.649006623

Fuente: Elaboración Propia

En la Casa de la Calidad, los QUÉ representan los requerimientos clave que el fotobiorreactor debe cumplir para garantizar su desempeño. En este caso, en la Tabla 14 se han identificado funciones primarias y secundarias, cada una con un peso de importancia y un peso relativo que reflejan su impacto en el diseño. Entre los aspectos más relevantes se encuentran la integridad estructural, la resistencia a variaciones de

presión, la compatibilidad química de los materiales y la eficiencia del sellado. Estos factores servirán como base para establecer las relaciones con los parámetros técnicos que permitirán optimizar el sistema.

#### 4.4.3 Atributos medibles

Definidos los QUÉ, el siguiente paso es establecer los CÓMO, es decir, los parámetros técnicos que permitirán cumplir estos requerimientos. Aspectos como la selección de materiales, los métodos de fabricación y las estrategias de sellado serán clave para optimizar la resistencia estructural, la compatibilidad química y la eficiencia del sistema.

**Tabla 14. Características medibles, los “CÓMO”**

Métrica No.	CÓMO	Objetivo/Unidad
1	Establecer límites operativos y pruebas de resistencia.	Validar límites operativos asegurando un desplazamiento $\leq 1.767$ mm.
2	Seleccionar materiales de alta resistencia y baja degradación.	Seleccionar materiales con compresión controlada $\geq 65$ Kpa, baja absorción de agua y estabilidad química.
3	Realizar pruebas de compatibilidad de los materiales.	Evaluar compatibilidad de adhesivos tras 48 h, observando cambios en sus propiedades.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

4	Usar cianoacrilato como sellador principal y silicona como sellado de refuerzo.	Verificar hermeticidad con pruebas de estanqueidad cualitativas tras 72 horas de exposición.
5	Aplicar recubrimientos anticorrosivos y antimicrobianos.	Seleccionar y validar recubrimientos resistentes a la corrosión y antimicrobianas tras 2 ciclos de exposición a humedad.
6	Optimizar el diseño para mejorar la circulación del medio.	Optimizar circulación del medio mediante ajustes geométricos y observación de flujo uniforme en un ciclo de prueba
7	Implementar controles de flujo y bombas adecuadas.	Seleccionar y validar bombas y válvulas para asegurar una distribución adecuada del medio de al menos 160 L/ min.
8	Usar materiales aislantes y diseñar estructura resistente.	Escoger materiales estructurales y aislantes y verificar su desempeño en condiciones operativas en 72 horas.
9	Definir procesos de ensamblaje y elaborar manuales detallados.	Elaborar manuales técnicos con al menos cinco procedimientos estándar.
10	Facilitar accesos para limpieza y usar superficies no porosas.	Mejorar accesibilidad y limpieza con materiales no porosos y ajustes en el diseño.
11	Establecer protocolos operativos y brindar capacitación al personal.	Desarrollar 2 diagramas de flujo general como material de capacitación accesible para consulta y entrenamiento.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

12	Documentar y simplificar los pasos críticos de limpieza.	Establecer un protocolo de limpieza de 16 pasos que garantice uniformidad y eficacia.
13	Definir métodos específicos y productos adecuados.	Definir productos de limpieza con eficacia $\geq 90\%$ y compatibilidad con materiales del sistema.
14	Diseñar el sistema para evitar acumulaciones y zonas estancadas.	Optimizar geometría del sistema evitando estancamientos mayores a 1 mm.
15	Diseñar puntos de acceso estratégicos y seguros.	Mejorar el acceso para mantenimiento y documentar recomendaciones para futuros diseños.
16	Implementar un plan de mantenimiento periódico y herramientas adecuadas.	Planificar mantenimiento cada 4 meses con herramientas adecuadas.
17	Homologar piezas y establecer procedimientos documentados de reemplazo.	Utilizar piezas con variabilidad $\leq 2\%$ en dimensiones clave, conforme a especificaciones técnicas.
18	Implementar sensores y análisis periódicos.	Seleccionar sensores adecuados considerando precisión y frecuencia de medición de $\pm 2\%$ a $\pm 3\%$ de variación.
19	Ajustar condiciones del medio y monitorear crecimiento.	Registrar y monitorear microalgas semanalmente con observación visual y medición indirecta.
20	Usar materiales antiadherentes y estrategias de limpieza.	Seleccionar materiales antiadherentes y evaluar acumulación de residuos en uso de 2 meses operativos.

**CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA**

21	Optimizar la dosificación de nutrientes y flujo del medio.	Evaluar dosificación para futura automatización, asegurando precisión y estabilidad con variaciones $\pm 1\%$ .
22	Protocolos definidos de esterilización y manipulación.	Implementar protocolos de esterilización de $\geq 3\text{-log}$ basados en buenas prácticas de limpieza y desinfección.
23	Diseñar puntos de medición estratégicos.	Optimizar el punto de medición para mejorar funcionalidad.
24	Aplicar tratamientos específicos según condiciones ambientales.	Reducir contaminantes visibles mediante tratamientos adecuados y seguimiento del medio en uso de 2 meses operativos.
25	Desarrollar guías prácticas y sesiones de capacitación sobre limpieza y desinfección.	Documentar y capacitar en limpieza y desinfección con materiales accesibles.
26	Capacitar con manuales interactivos y prácticas guiadas.	Generar manuales interactivos con al menos cinco prácticas guiadas.
27	Definir lineamientos de seguridad y manipulación.	Establecer protocolos de seguridad para manipulación de químicos en un manual
28	Definir técnicas y materiales específicos para aislamiento.	Seleccionar materiales aislantes que mejoren la hermeticidad y resistencia del fotobiorreactor, asegurando que soporten hasta 1.5 psi en pruebas de hermeticidad.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

29	Implementar revisiones técnicas antes de modificaciones.	Realizar ≥2 revisiones técnicas antes de modificaciones significativas.
30	Generar manuales detallados y procedimientos estándar.	Crear manuales estructurados con al menos dos secciones.
31	Documentar criterios de evaluación y buenas prácticas para replicabilidad del diseño.	Definir criterios de evaluación para futuras optimizaciones del sistema.
32	Diseñar distribución óptima de luz en el sistema.	Distribuir iluminación con intensidad ≥ 8000 lux en áreas clave.
33	Seleccionar y ajustar sistemas de aireación según especificaciones técnicas y observaciones en la distribución de burbujas y flujo de aire.	Evaluar sistemas de aireación asegurando distribución homogénea de entre 10L/min y 30L/min del aire en el medio.
34	Seleccionar bombas adecuadas según eficiencia energética y compatibilidad con el sistema.	Eficiencia energética de 10.94 W/m <sup>3</sup>
35	Distribuir salidas y entradas de aire estratégicamente.	Optimizar distribución de aire de entre 3 y 6 L/min por cada difusor, evitando zonas de estancamiento.
36	Establecer una dosificación controlada de nutrientes y dar seguimiento mediante monitoreo	Fijar la dosificación de nutrientes en 2.4 g/L, asegurar una aplicación uniforme y mantener registros de monitoreo.

Fuente: Elaboración Propia

Para garantizar que los requerimientos del fotobiorreactor se cumplan de manera efectiva, se han definido estrategias técnicas clave (CÓMO). Estas incluyen la selección de materiales de alta resistencia, la aplicación de recubrimientos protectores, el uso de adhesivos especializados y la validación de límites operativos mediante pruebas específicas. Cada uno de estos parámetros cuenta con criterios de evaluación medibles,

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

asegurando que las soluciones implementadas optimicen la funcionalidad y durabilidad del sistema tal y como se puede ver en la Tabla 15.

La matriz de relaciones es el núcleo de la Casa de la Calidad, ya que vincula los QUÉ con los CÓMO, permitiendo identificar el impacto de cada parámetro técnico en los requerimientos clave del fotobiorreactor. Este análisis ayuda a priorizar estrategias de optimización y facilita la toma de decisiones enfocadas en mejorar la eficiencia, durabilidad y desempeño del sistema.

Entre los aspectos más relevantes que se analizan en la matriz se incluyen la resistencia a variaciones de presión, la durabilidad de los materiales, la eficiencia del sellado, la circulación y flujo del medio, la limpieza efectiva, la minimización de bioincrustaciones, y la confiabilidad del sistema de aireación. Estos elementos se detallan en la Tabla 16, la cual resume los principales puntos evaluados. La matriz completa HoQ puede consultarse en el Anexo C. Matriz HoQ

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

**Tabla 15. Matriz de relación QUÉ vs CÓMO**

Fila #	Columna #	Dirección de Mejora: Minimizar (▼), Maximizar (▲), Objetivo (x)	Características de la Calidad ("Requerimientos Funcionales" o "COMOS")											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estructura, interacciones y pruebas de resistencia.														
1	9	3.3	10.0	Resistencia a variaciones de presión	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
2	9	3.3	10.0	Materiales duraderos y resistentes al desgaste	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
3	9	2.6	8.0	Compatibilidad química de materiales	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
4	9	3.3	10.0	Selado eficiente y hermético.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5	9	2.0	6.0	Recubrimientos protectores adecuados	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
6	9	3.3	10.0	Circulación eficiente del medio	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
7	9	3.3	10.0	Flujo de agua constante y óptimo	▲	▲	▲	○	○	○	○	○	○	
8	9	2.6	8.0	Asentamiento resistente a cambios ambientales	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
9	9	2.6	8.0	Ensamblaje intuitivo y con mínima posibilidad de error	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
10	9	3.3	10.0	Limpieza completa y efectiva	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
11	9	2.6	8.0	Facilidad para cumplir protocolos de limpieza	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
12	9	3.3	10.0	Proceso de limpieza y desinfección claro	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
13	9	2.6	8.0	Procedimientos estandarizados de desinfección	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
14	9	3.3	10.0	Eliminación de puntos muertos y buena circulación	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
15	9	2.6	8.0	Acceso fácil y seguro para operación y mantenimiento	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
16	9	2.6	8.0	Mantenimiento sencillo y programable	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
17	9	2.6	8.0	Fácil identificación y reemplazo de piezas.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
18	9	2.6	8.0	Monitoreo regular de microorganismos.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
19	9	2.6	8.0	Control eficiente de densidad celular	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
20	9	3.3	10.0	Minimización de bionanquilamientos y sedimentos.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
21	9	2.6	8.0	Reducción de acumulación de nutrientes no deseados.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
22	9	2.6	8.0	Control del uso de líquidos esterilizados.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
23	9	2.6	8.0	Puntos de acceso adecuados para personas	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
24	9	2.0	6.0	Recubrimientos resistentes al ambiente operativo.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
25	9	2.6	8.0	Capacitación en limpieza y desinfección.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
26	9	2.6	8.0	Capacitación en mantenimiento y operación.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
27	9	2.6	8.0	Procedimientos claros para manejo de químicos.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
28	9	2.0	6.0	Estandarización de procesos de aislamiento.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
29	9	2.0	6.0	Modificaciones planificadas y respaldadas.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
30	9	2.8	8.0	Documentación y estandarización en instalación/mantenimiento.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
31	9	2.0	6.0	Ensambles fiables y ensamble experimental.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
32	9	2.6	8.0	Iluminación uniforme y suficiente.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
33	9	3.3	10.0	Aireación controlada y adecuada.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
34	9	3.3	10.0	Equipo de circulación eficiente.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
35	9	3.3	10.0	Flujo de agua uniforme en todas las áreas.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
36	9	2.6	8.0	Control eficiente de disponibilidad de nutrientes	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Objetivo o valor límite														
51.707 mm														
2.614 Wh														
48 Wh														
72 hrs														
2 años operativo														
100 Lumen														
72 hrs de operación														
5 procedimientos														
Ajustar el diseño														
Diseño estructural y operación de acuerdo a los parámetros														
2.605%														
> 1 mm														
1 mm/centro														
5.2%														
52% ± 5%														
1 mm/centro														
Evaluación por 2 niveles														
variancia ± 1%														
2.24kg														
1 punto de medición														
Sobrepeso por 2 niveles														
Usos industriales														
5 procedimientos														
1 mm/centro														
2.800 KWh														
10.0Wh - 20.0Wh														
10.0Wh3														
2.6 Unidades cada día														
2.4 g/L														

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4.4 Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas establecen los criterios esenciales para garantizar la eficiencia, seguridad y durabilidad del sistema. Cada requisito responde a una necesidad operativa específica, asegurando que los materiales, procesos y componentes cumplan con estándares de calidad que optimicen la estabilidad estructural, la compatibilidad de materiales, el flujo del medio, el mantenimiento preventivo y la precisión en la medición. No obstante, las unidades y valores definidos sirven como referencia y pueden ajustarse conforme avancen las pruebas y evaluaciones experimentales. Debido a las limitaciones

de las unidades y valores definidos sirven como referencia y pueden ajustarse conforme avancen las pruebas y evaluaciones experimentales. Debido a las limitaciones

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

del proyecto, es fundamental mantener un enfoque flexible que permita adaptar los criterios a las condiciones reales de operación, asegurando soluciones viables y efectivas dentro del marco disponible (Tabla 17).

**Tabla 16. Lista de Especificaciones técnicas**

Especificación Técnica	Justificación
Validar límites operativos asegurando un desplazamiento $\leq 1.767$ mm.	Establecer un límite de desplazamiento permite garantizar la estabilidad estructural del sistema, minimizando el riesgo de fallas mecánicas y asegurando un funcionamiento seguro.
Seleccionar materiales con compresión controlada $\geq 65$ KPa, baja absorción de agua y estabilidad química.	La resistencia a la compresión y la estabilidad química aseguran que los materiales mantengan su integridad estructural y funcionalidad en ambientes operativos exigentes.
Evaluar compatibilidad de adhesivos tras 48 h, observando cambios en sus propiedades.	Realizar pruebas de compatibilidad permite seleccionar adhesivos adecuados que mantengan su adhesión y resistencia con el tiempo, evitando degradaciones prematuras.
Verificar hermeticidad con pruebas de estanqueidad cualitativas tras 72 horas de exposición.	Garantizar la hermeticidad previene filtraciones y fugas que podrían afectar el desempeño y la seguridad del sistema.
Seleccionar y validar recubrimientos resistentes a la corrosión y antimicrobianos tras 2 ciclos de exposición a humedad.	Los recubrimientos seleccionados deben demostrar resistencia a la corrosión y crecimiento microbiano para extender la vida útil del sistema y reducir el mantenimiento.
Optimizar circulación del medio mediante ajustes geométricos y observación de flujo uniforme en un ciclo de prueba.	Un flujo homogéneo es clave para garantizar una correcta distribución del medio y maximizar la eficiencia del proceso.
Seleccionar y validar bombas y válvulas para asegurar una distribución adecuada del medio de al menos 160 L/min.	Garantizar la capacidad de distribución del sistema evita obstrucciones y mantiene un rendimiento óptimo en la operación.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Escoger materiales estructurales y aislantes y verificar su desempeño en condiciones operativas en 72 horas.	La selección adecuada de materiales estructurales y aislantes es esencial para asegurar la resistencia mecánica y la eficiencia térmica en la operación.
Elaborar manuales técnicos con al menos cinco procedimientos estándar.	La documentación técnica bien estructurada facilita el mantenimiento, la operación y la capacitación, asegurando la correcta implementación de los procedimientos.
Mejorar accesibilidad y limpieza con materiales no porosos y ajustes en el diseño.	La utilización de materiales no porosos facilita la limpieza y reduce la acumulación de contaminantes, mejorando la higiene y el mantenimiento del sistema.
Desarrollar 2 diagramas de flujo general como material de capacitación accesible para consulta y entrenamiento.	La incorporación de elementos visuales en los procesos mejora la comprensión del personal y reduce errores operativos.
Establecer un protocolo de limpieza de 16 pasos que garantice uniformidad y eficacia.	Un procedimiento detallado garantiza una limpieza adecuada y consistente en todas las operaciones.
Definir productos de limpieza con eficacia $\geq 90\%$ y compatibilidad con materiales del sistema.	Asegurar que los agentes de limpieza sean efectivos sin comprometer la integridad de los materiales mejora la durabilidad del equipo.
Optimizar geometría del sistema evitando estancamientos mayores a 1 mm.	Un diseño optimizado evita la acumulación de residuos y favorece un flujo eficiente del medio.
Mejorar el acceso para mantenimiento y documentar recomendaciones para futuros diseños.	Diseñar componentes accesibles reduce tiempos de mantenimiento y facilita intervenciones correctivas.
Planificar mantenimiento cada 4 meses con herramientas adecuadas.	Un plan de mantenimiento programado previene fallas inesperadas y prolonga la vida útil del sistema.
Utilizar piezas con variabilidad $\leq 2\%$ en dimensiones clave, conforme a especificaciones técnicas.	Mantener tolerancias estrictas en las piezas permite ensamblajes precisos y mejora la compatibilidad de componentes.
Seleccionar sensores adecuados considerando precisión y frecuencia de medición de $\pm 2\%$ a $\pm 3\%$ de variación.	La correcta selección de sensores asegura datos confiables para el monitoreo del sistema.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Registrar y monitorear microalgas semanalmente con observación visual y medición indirecta.	Un monitoreo periódico permite evaluar el crecimiento y detectar problemas a tiempo, asegurando condiciones óptimas para la producción.
Seleccionar materiales antiadherentes y evaluar acumulación de residuos en uso de 2 meses operativos.	Materiales antiadherentes reducen la acumulación de residuos, minimizando la contaminación y mejorando la eficiencia del sistema.
Evaluar dosificación para futura automatización, asegurando precisión y estabilidad con variaciones $\pm 1\%$ .	Una dosificación precisa es clave para la automatización y garantiza procesos consistentes y repetibles.
Implementar protocolos de esterilización de $\geq 3\text{-log}$ basados en buenas prácticas de limpieza y desinfección.	Asegurar una esterilización efectiva previene la proliferación de contaminantes y mantiene la calidad del sistema.
Optimizar el punto de medición para mejorar la funcionalidad.	Una correcta ubicación de los puntos de medición garantiza datos precisos y facilita el control del sistema.
Reducir contaminantes visibles mediante tratamientos adecuados y seguimiento del medio en uso de 2 meses operativos.	Implementar controles de calidad y tratamiento del medio minimiza impurezas y mejora la eficiencia.
Documentar y capacitar en limpieza y desinfección con materiales accesibles.	La capacitación garantiza la correcta aplicación de procedimientos y mejora el desempeño operativo.
Generar manuales interactivos con al menos cinco prácticas guiadas.	Manuales interactivos facilitan el aprendizaje y aseguran una correcta implementación de procesos.
Establecer protocolos de seguridad para manipulación de químicos en un manual.	Contar con protocolos claros minimiza riesgos y protege la seguridad del personal.
Seleccionar materiales aislantes que mejoren la hermeticidad y resistencia del fotobiorreactor, asegurando que soporten hasta 1.5 psi en pruebas de hermeticidad.	Materiales adecuados garantizan la eficiencia del sistema y su integridad estructural.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Realizar $\geq 2$ revisiones técnicas antes de modificaciones significativas.	Revisiones previas evitan errores en modificaciones y aseguran mejoras efectivas.
Crear manuales estructurados con al menos dos secciones.	La organización de la documentación facilita la consulta y mejora la eficiencia del aprendizaje.
Definir criterios de evaluación para futuras optimizaciones del sistema.	Establecer parámetros claros de evaluación permite mejorar la eficiencia y fiabilidad del sistema con base en datos concretos.
Distribuir iluminación con intensidad $\geq 8000$ lux en áreas clave.	Asegurar una iluminación óptima mejora el rendimiento de los procesos fotodependientes y la visibilidad en operaciones clave.
Evaluar sistemas de aireación asegurando distribución homogénea de entre 10L/min y 30L/min del aire en el medio.	Una aireación eficiente es esencial para mantener condiciones óptimas en el medio de cultivo, evitando zonas de baja oxigenación.
Garantizar eficiencia energética de 10.94 W/m <sup>3</sup> .	Optimizar el consumo energético reduce costos operativos y minimiza el impacto ambiental del sistema.
Optimizar distribución de aire de entre 3 y 6 L/min por cada difusor, evitando zonas de estancamiento.	Una distribución de aire homogénea mejora la calidad del medio y evita problemas en el sistema biológico.
Fijar la dosificación de nutrientes en 2.4 g/L, asegurar una aplicación uniforme y mantener registros de monitoreo.	Asegurar una dosificación uniforme garantiza la disponibilidad de nutrientes necesarios para el crecimiento óptimo del sistema biológico.

Fuente: Elaboración Propia

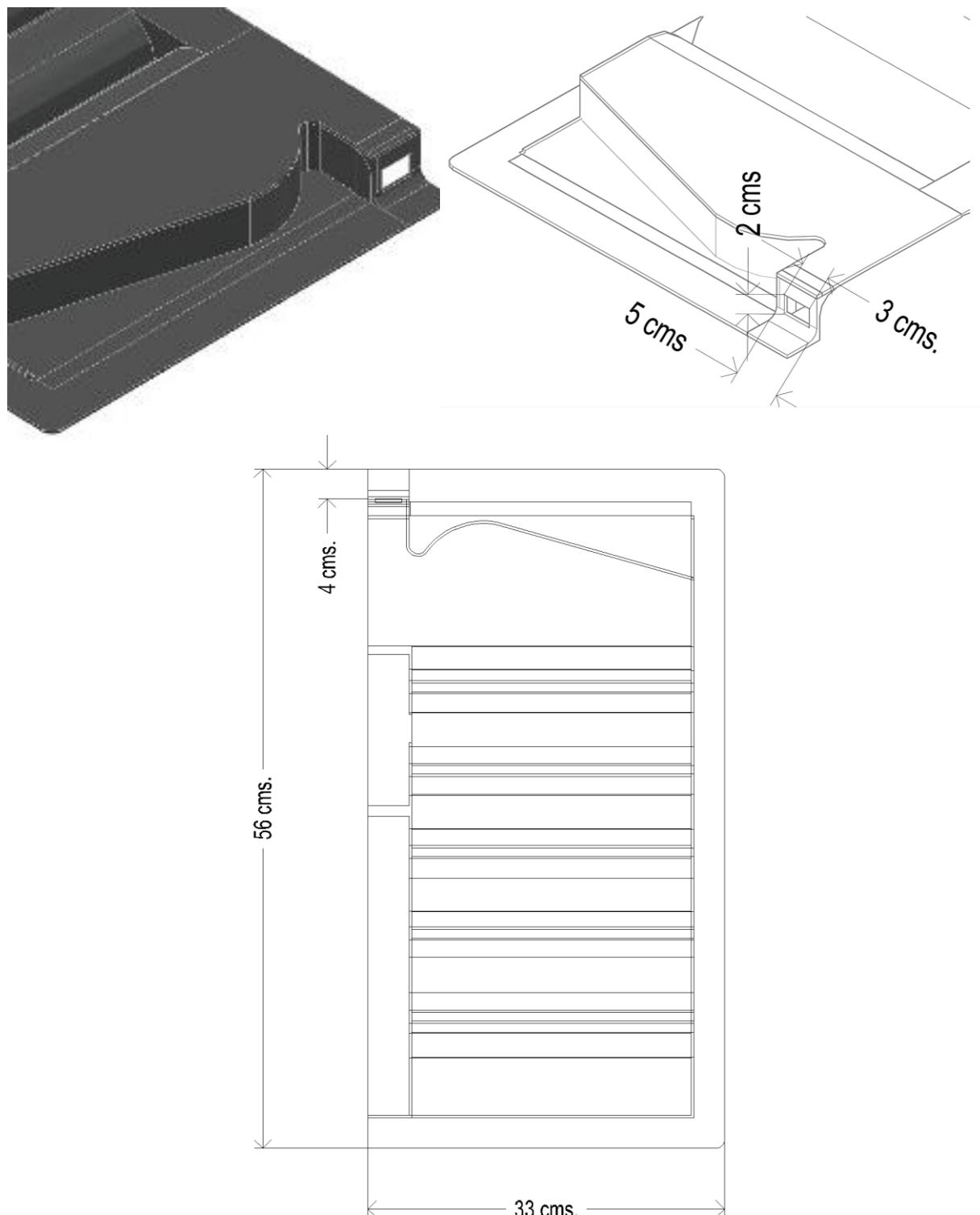
## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Uno de los principales retos metodológicos durante la implementación de la matriz HoQ fue interpretar correctamente las necesidades del usuario y traducirlas en características técnicas del prototipo. En algunos casos, estas necesidades eran generales o difíciles de medir directamente, por lo que fue necesario realizar varios ajustes hasta lograr relaciones técnicas coherentes. Adicionalmente, hubo que decidir qué tan fuerte debía ser el vínculo entre cada necesidad y las posibles soluciones, priorizando aquellas que realmente impactaban en la funcionalidad y el desempeño del fotobiorreactor. Esta reflexión permitió enfocar el proyecto en los aspectos clave para su mejora operativa.

Como parte del proceso de optimización del fotobiorreactor y con base en las especificaciones técnicas resultantes de la HoQ, se identificaron mejoras clave para facilitar su operación y mantenimiento. Entre ellas, se encuentra la modificación de ciertos elementos estructurales para mejorar su funcionalidad sin comprometer la integridad del diseño. Estas mejoras no fueron seleccionadas de forma aislada, sino que se respaldaron a través del uso combinado de herramientas de análisis y priorización.

La integración del Diagrama de Ishikawa, el AMEF y la matriz de la Casa de la Calidad del QFD permitió abordar el problema desde distintos ángulos y facilitó la toma de decisiones con mayor impacto en términos de desempeño, confiabilidad y satisfacción del usuario. Este enfoque metodológico aportó solidez al proceso de mejora del fotobiorreactor y permitió una mayor justificación técnica en cada decisión implementada.

#### 4.4.5 Planos CAD



**Figura 13. Modificación de orificio en la placa del fotobioreactor.**

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

El orificio en cuestión no cuenta con un registro documentado sobre su origen ni función específica dentro del diseño original. No obstante, en intervenciones posteriores al fotobiorreactor, se ha empleado para diversas tareas operativas, lo que sugiere que su incorporación pudo haber ocurrido después de la presentación inicial del proyecto. (Figura 13)

Dado que sus dimensiones originales dificultaban la realización de estas actividades, se optó por ampliarlo con el fin de mejorar su accesibilidad y funcionalidad. Esta modificación se llevó a cabo sin afectar la integridad estructural ni otras características de la placa, asegurando que continúe cumpliendo con los requerimientos del sistema. En la sección XIII.1.1 Modificación del orificio del panel frontal, se dan más detalles.

### **4.4.6 Documentación de los principales procesos**

#### **4.4.6.1 Manuales de procedimiento**

Este conjunto de manuales tiene como propósito definir y documentar los procedimientos relacionados con el diseño, operación y mantenimiento de un fotobiorreactor (FBR). Cada manual aborda un tópico específico: ensamble del FBR, esterilización del material de laboratorio, mantenimiento del FBR, mantenimiento del molde para termoformado y termoformado de placas de acrílico.

Estos documentos buscan garantizar la eficiencia operativa, la seguridad en los procesos y la calidad en los resultados, al tiempo que sirven como referencia para la capacitación y el correcto desarrollo de las actividades técnicas. Se recomienda su consulta periódica y actualización para mantenerlos alineados con las necesidades del proyecto y las mejores prácticas. Estos se encuentran en el Anexo D

#### **4.4.6.2 Diagrama de flujo - Diagrama de procesos**

Para proporcionar una visión clara y estructurada de los procesos clave relacionados con el fotobiorreactor, se han desarrollado dos diagramas de flujo que desglosan detalladamente las principales etapas involucradas en su mantenimiento, ensamble y fabricación de componentes.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

El primer diagrama abarca desde el desensamblaje del sistema, lo que a su vez constituye el mantenimiento preventivo del fotobiorreactor, hasta su posterior ensamblaje y puesta en marcha. Este flujo de trabajo permite visualizar con precisión cada paso requerido para garantizar que el sistema funcione correctamente después de su intervención, asegurando tanto la integridad estructural como el rendimiento esperado.

El segundo diagrama se enfoca en los procedimientos relacionados con la fabricación de componentes esenciales para el fotobiorreactor. Incluye las actividades necesarias para el mantenimiento del molde utilizado en el termoformado, el corte de placas de acrílico destinadas a este proceso y la propia transformación térmica del material. Este conjunto de operaciones resulta fundamental para la obtención de paneles con las características adecuadas en términos de forma y calidad, asegurando la eficiencia del ensamblaje posterior.

Ambos diagramas permiten identificar la secuencia lógica de cada actividad, facilitando la comprensión de los procedimientos y sirviendo como referencia para su correcta ejecución. Para su consulta detallada, se encuentran disponibles en el Anexo E.

### 4.4.6.3 Tablas de tiempo

A partir de los diagramas de flujo desarrollados, se elaboraron tablas en las que se registran los tiempos específicos de cada proceso. Esta recopilación de datos permite un análisis detallado y una comparación directa con los registros previos, facilitando la evaluación del impacto de las mejoras implementadas.

El propósito de esta revisión tiene dos objetivos: por un lado, analizar los ajustes aplicados al contenedor de microalgas del sistema y, por otro, evaluar los cambios en los procesos operativos relacionados con el fotobiorreactor. Esta comparación resulta clave para medir la efectividad de las modificaciones realizadas y determinar si han optimizado la eficiencia del sistema en términos de tiempos y procedimientos.

Los resultados obtenidos a partir de este análisis se detallan en el siguiente capítulo, correspondiente a la **FASE 4: PRUEBAS Y REFINAMIENTO**, donde se presentan las evaluaciones y ajustes finales derivados de las mediciones realizadas. Además, se pueden consultar en el Anexo F.

### 4.4.6.4 Fichas técnicas del material utilizado

En el desarrollo de las mejoras al fotobiorreactor GBB19, se seleccionaron materiales que garantizan tanto la funcionalidad como la disponibilidad inmediata, considerando las restricciones previamente establecidas. Entre estos materiales se encuentran placas de acrílico, que ya formaban parte de los recursos disponibles, así como adhesivo de cianoacrilato, solera de hule espuma (de etileno-propileno) y sellador de curado (silicón) acético transparente, entre otros. Cada material seleccionado responde a propiedades específicas que permiten cubrir los requerimientos del diseño en el corto plazo. Para respaldar su correcta aplicación dentro del sistema, se dispone de fichas técnicas detalladas, las cuales pueden consultarse en el anexo G.

### 4.4.7 Partes, formas, medidas y funciones del FBR analizadas

#### 4.4.7.1 Contenedor de microalgas

El contenedor (Figura 14), con una capacidad de 23 litros de agua, está compuesto por dos paneles ondulados de acrílico, unidos por una tira de hule espuma que sella la estructura. Cada panel consta de dos placas conectadas en sus bordes mediante una tira de acrílico. Para su ensamble se emplearon adhesivos como cianocrilato y silicón acético, asegurando una unión resistente. En su interior, se encuentran difusores de aire de distintos tipos, incluyendo piedras porosas en presentaciones cilíndricas o rectangulares, que pueden alcanzar los 30 cm de longitud, así como modelos de caucho en forma de tira para una distribución más uniforme del oxígeno. Además, cuenta con sensores para el monitoreo de variables clave, como temperatura, pH y concentración de oxígeno disuelto.



**Figura 14.** Contenedor de microalgas del FBR con difusores de aire.

Fuente: Elaboración propia

### Función

Su función principal es contener las microalgas a lo largo de todo el proceso de escalamiento, permitiendo su crecimiento y adaptación hasta alcanzar el volumen requerido para su uso en etapas posteriores. Este contenedor garantiza condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos, asegurando una adecuada distribución de gases y parámetros controlados. Las mejoras propuestas están dirigidas a optimizar su diseño y funcionamiento, con el objetivo de incrementar la eficiencia del sistema y favorecer un escalamiento más controlado y homogéneo.

#### 4.4.8 Cumplimiento de las fases metodológicas

Durante el desarrollo del presente proyecto se siguió de manera estructurada la metodología de diseño y desarrollo de productos propuesta por Ulrich y Eppinger. Esta metodología se dividió en cinco fases que permitieron analizar, conceptualizar, rediseñar, evaluar y documentar mejoras en el fotobiorreactor tipo airlift de panel ondulado. La elección de esta metodología respondió a la necesidad de estructurar el desarrollo del producto en etapas bien definidas, lo que facilitó la toma de decisiones, la documentación del proceso y la evaluación de propuestas con base en criterios funcionales, técnicos y centrados en el usuario.

A diferencia de enfoques más tradicionales, este marco metodológico permitió reducir riesgos en etapas posteriores al asegurar el cumplimiento de los requerimientos desde fases tempranas. Aunque fue posible aplicar la metodología en su totalidad, se presentaron algunas limitaciones derivadas de los recursos disponibles, lo que obligó a simplificar ciertos procesos, como la validación formal de parámetros técnicos. No obstante, el enfoque estructurado permitió orientar el desarrollo con mayor claridad y justificación técnica.

A continuación, se presenta una síntesis en la Tabla 18 del cumplimiento de cada fase dentro del contexto específico del proyecto.

**Tabla 17. Implementación de la metodología de diseño y desarrollo de productos en el prototipo PBR-GBB19.**

FASE METODOLÓGICA	APLICACIÓN EN EL PROYECTO
<b>Fase 0: Diagnóstico inicial</b>	<p>Se realizó la toma de tiempos y movimientos de las actividades actuales asociadas al ensamblaje y operación del fotobiorreactor. Esta información permitió identificar procesos críticos, variaciones y oportunidades de mejora.</p>

<b>Fase 1: Identificación de necesidades y análisis funcional (Planeación)</b>	Se aplicaron herramientas de ingeniería como diagramas de Ishikawa y el Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) para analizar causas raíz y evaluar modos de fallo en el sistema, estableciendo prioridades de intervención.
<b>Fase 2: Desarrollo de conceptos y priorización (Diseño a nivel sistema)</b>	Se realizó un análisis de las alternativas de mejora sugeridas con base en los resultados del AMEF, priorizando aquellas de mayor viabilidad técnica y mayor impacto en el desempeño operativo del sistema.
<b>Fase 3: Diseño de detalle</b>	Se aplicó la matriz de despliegue de la calidad (HoQ) para alinear los nuevos requerimientos del usuario con soluciones técnicas. Se elaboraron manuales, diagramas de flujo, fichas técnicas, y se definieron partes, medidas, formas y funciones del FBR.
<b>Fase 4: Pruebas y refinamiento</b>	Tras la implementación de las mejoras seleccionadas, se evaluó su funcionamiento a través de observación directa, un análisis de los tiempos de ejecución y la validación correspondiente durante la puesta en marcha. Los resultados fueron documentados y se analizaron los impactos funcionales obtenidos.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.5 FASE 4: PRUEBAS Y REFINAMIENTO

Aunque en algunos enfoques la “puesta en marcha” puede considerarse una actividad complementaria, en el contexto de este proyecto se integró como una fase de validación operativa. Esto se debe a que permitió observar el funcionamiento real del fotobiorreactor durante un periodo prolongado, posterior a la implementación de mejoras, bajo condiciones controladas pero representativas de su uso previsto.

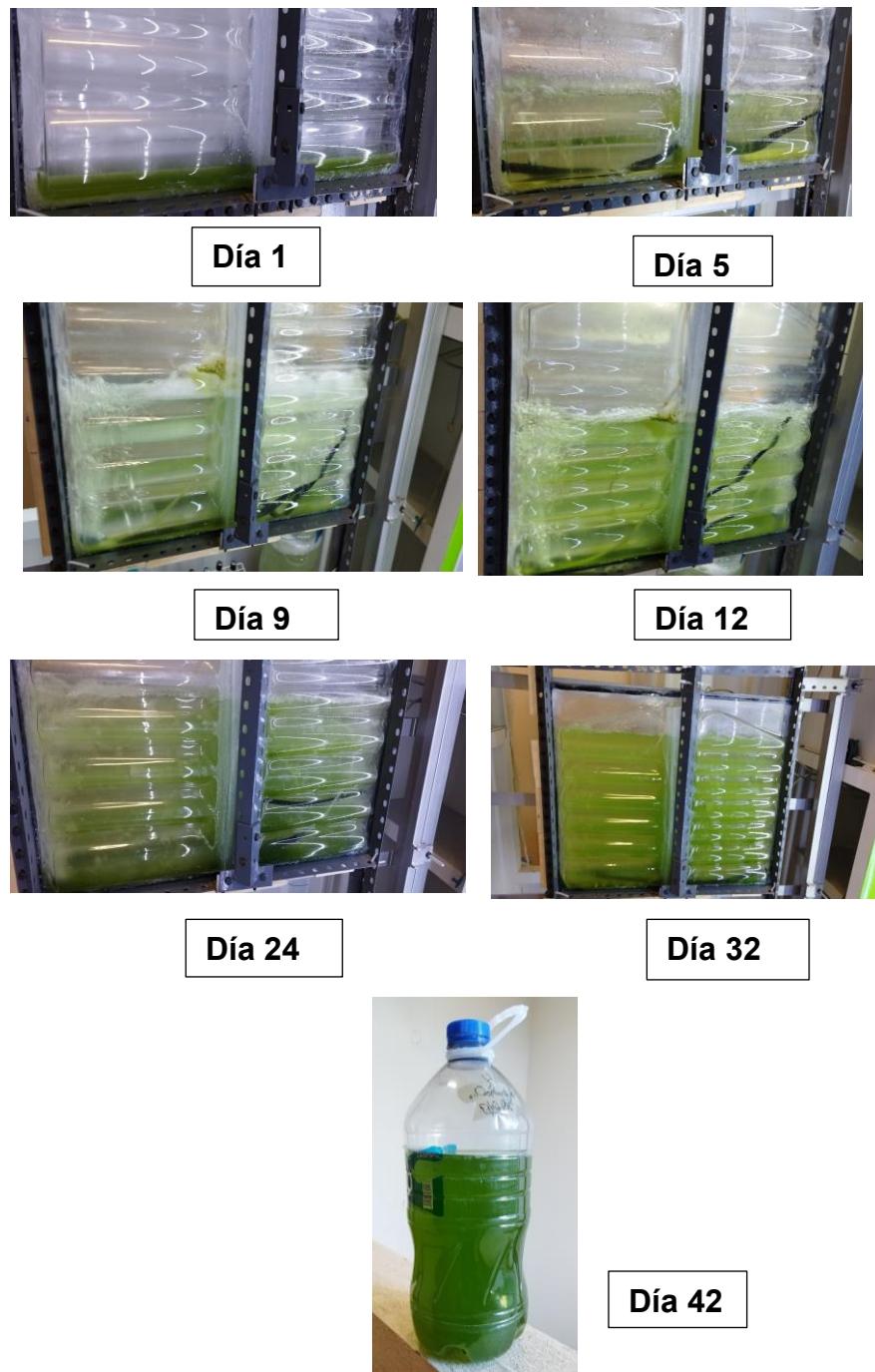
Desde esta perspectiva, la puesta en marcha no se limitó al montaje físico del sistema, sino que se empleó como herramienta para validar la eficacia de las modificaciones realizadas, evaluar la confiabilidad del sistema y detectar posibles ajustes finales.

Por tanto, su inclusión no representa una actividad aislada, sino la culminación lógica del proceso de diseño, mejora y verificación, en línea con los principios de mejora continua planteados en la metodología. Esta validación práctica responde directamente a los objetivos de la Fase 4: Pruebas y Refinamiento descrita por Ulrich y Eppinger, donde se busca confirmar el desempeño del producto mediante pruebas funcionales antes de su liberación definitiva.

En este marco, la fase 4 se enfocó en implementar las mejoras definidas y evaluar su impacto en el funcionamiento del fotobiorreactor. Mediante un nuevo análisis comparativo de tiempos, se contrastó el desempeño del sistema modificado respecto al modelo original, identificando si las modificaciones facilitaron su operación y mejoraron aspectos relevantes. Esta etapa permitió validar la efectividad de las soluciones aplicadas y cerrar el ciclo de mejora propuesto.

### 4.5.1 Validación de las mejoras implementadas

Para validar su eficacia, se llevaron a cabo pruebas operativas desde el 18 de octubre hasta el 28 de noviembre de 2024, acumulando un total de 42 días de funcionamiento. Durante este periodo, tras 1008 horas de trabajo (Figura 15), no se detectaron fallas evidentes, lo que sugiere una mejora significativa en la confiabilidad del sistema.



**Figura 15. Cinética de crecimiento**

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Como referencia comparativa, se retoman los resultados del trabajo de la ingeniera Lizbeth Santiago Martínez, titulado “*Diseño y manufactura de un sedimentador para la cosecha de microalgas*” [45]. Aunque su estudio no empleó directamente un fotobiorreactor, el cultivo utilizado fue generado en el FBR-GBB19 tras 42 días de operación continua.

Los resultados obtenidos se contrastaron con los reportados por los ingenieros Gerardo Rubén Rodríguez Camacho y Gerardo Ballesteros Briseño (Tabla 19), quienes trabajaron con fotobiorreactores de diseño similar. La comparación se centró en dos indicadores:

- La **concentración de biomasa**, expresada en miligramos por litro (mg/L).
- La **concentración de microalgas**, entendida como el recuento celular (células/mL).

Aunque Rodríguez y Ballesteros reportaron concentraciones celulares más altas (**1.67 x 10<sup>7</sup>** y **2.2 x 10<sup>7</sup>** de células/mL respectivamente) derivados de un volumen muestra de **10 mL**, sus concentraciones de biomasa fueron menores: **445 mg/L** y **706 mg/L**. En contraste, Lizbeth obtuvo una concentración celular de **1.05 x 10<sup>7</sup>** de células/mL, pero una biomasa de **6200 mg/L (6.2 g/L)** en una muestra de solo **1 mL**.

Estas diferencias sugieren que el cultivo empleado por Lizbeth contenía células de mayor tamaño o con mayor densidad de biomasa, posiblemente debido a diferencias en la cepa o en las condiciones de operación. Esta observación subraya la importancia de evaluar tanto el número de células como la biomasa total al valorar el rendimiento de un sistema. La comparación con estos trabajos aporta un marco técnico útil para validar las mejoras implementadas en el diseño y ensamblaje del fotobiorreactor.

**Tabla 18. Datos de concentración**

Investigador	Volumen de muestra (mL)	Concentración (mg/L)	Cantidad total en muestra (mg)	Concentración de microalgas (células/mL)
Lizbeth Santiago Martínez	1	6200	6200	10500000
Gerardo Rubén Rodríguez Camacho	10	445	4450	16700000
Gerardo Ballesteros Briseño	10	706	7060	22000000

Fuente: Elaboración propia con información basada en [9], [10], [45]

#### 4.5.1.1 Modificación del orificio del panel frontal

En el marco de las mejoras implementadas en el diseño del fotobiorreactor, se realizó un ajuste significativo en el orificio ubicado en el panel frontal del contenedor de microalgas. Este orificio, que inicialmente tenía dimensiones aproximadas de 2.1 cm x 1.5 cm, fue ampliado a 3 cm x 2 cm mediante el uso de una lima plana, con el objetivo de optimizar su funcionalidad. En la figura 16 se muestra este orificio, diseñado para la instalación de sensores y la extracción de muestras. Como se observa con el difusor de aire de piedra tipo cilíndrica, las dimensiones originales dificultaban su inserción en el contenedor de microalgas que una vez ensamblado, limitaban la maniobrabilidad y complicaban el uso adecuado de herramientas.

Cabe destacar que este orificio no estaba identificado en los diseños iniciales ni en las propuestas presentadas por el ingeniero Gerardo Ballesteros, lo que generó incertidumbre respecto a si formaba parte de los planos originales o si fue un ajuste incorporado durante una etapa posterior del desarrollo del prototipo. Sin embargo, su ampliación ha resultado esencial para garantizar un acceso más eficiente, facilitando la

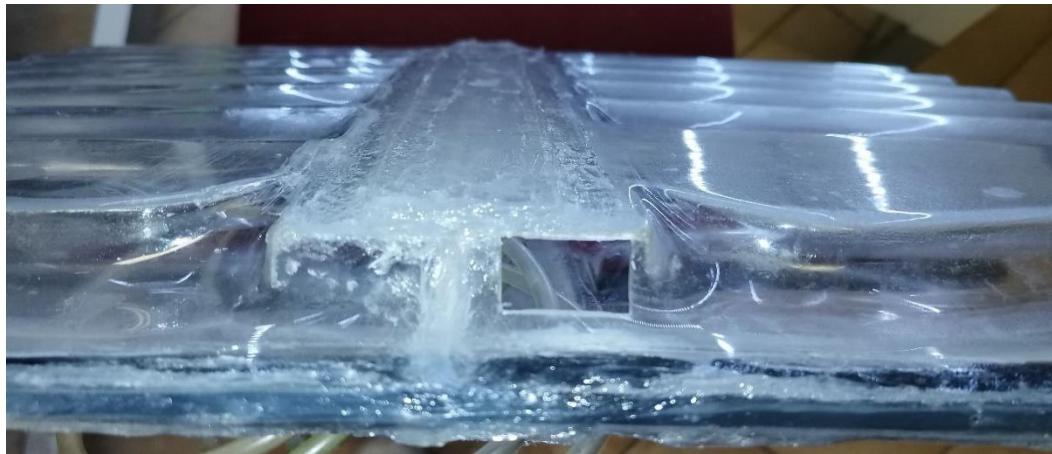
instalación de sensores, mangueras y la reubicación estratégica de los difusores de aire, además de simplificar su manipulación en tareas de mantenimiento y procesos relacionados con la extracción de microalgas.



**Figura 16. Vista del orificio en el panel frontal del contenedor de microalgas del FBR.**

Fuente. Elaboración propia

El orificio en el panel frontal del contenedor de microalgas del FBR, ahora modificado, presenta dimensiones optimizadas que permiten una mayor maniobrabilidad y facilitan la manipulación de herramientas y componentes esenciales (Figura 17).

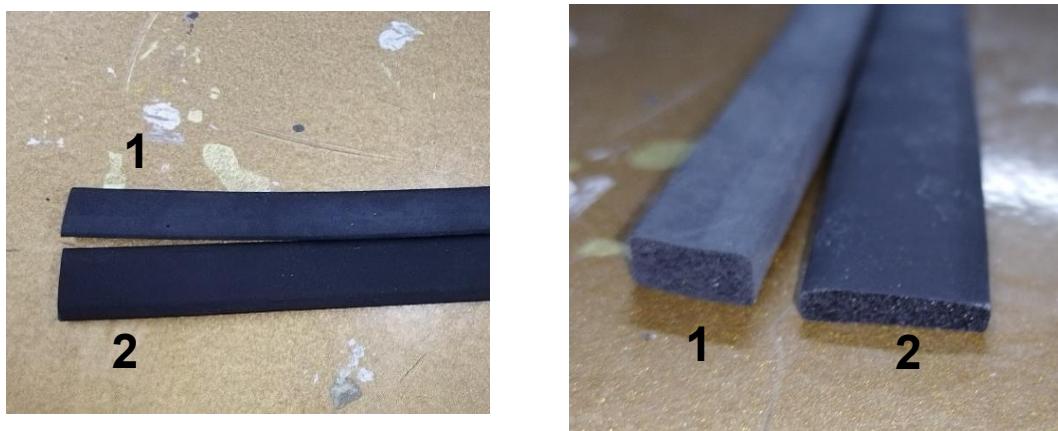


**Figura 17. Orificio modificado en el panel frontal del contenedor.**

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.5.1.2 Ajuste de dimensiones de las soleras de hule espuma**

Por otro lado, se implementaron ajustes en las dimensiones de la solera de hule espuma (de etileno-propileno) utilizada para el sellado del contenedor de microalgas. Originalmente, se empleaba una solera de  $\frac{1}{4}$ " x  $\frac{1}{2}$ ", pero se identificó que su ancho incrementaba la separación entre los paneles a aproximadamente 1 cm, lo que afectaba negativamente la circulación de aire dentro del fotobiorreactor durante su operación, pues limitaba el alcance de la columna de burbujeo. Para resolver este problema, se sustituyó por una solera de  $\frac{1}{8}$ " x  $\frac{3}{4}$ ", optimizando su desempeño en el montaje del contenedor de microalgas del FBR (Figura 18). Este cambio permitió reducir la distancia entre paneles a aproximadamente 0.7 cm, mejorando la estanqueidad y garantizando un soporte estructural más eficiente para las condiciones de operación.



**Figura 18. Comparativa de las soleras de hule espuma (de etileno-propileno).**

Fuente: Elaboración propia

La comparativa del grosor resultante tras la unión de los paneles de acrílico con las soleras de hule espuma permite evaluar la uniformidad y consistencia del ensamble, asegurando que el sellado sea adecuado y que no haya variaciones que comprometan la integridad estructural o la funcionalidad del fotobiorreactor. Este análisis es clave para verificar el ajuste de los materiales, identificar posibles compresiones irregulares y garantizar que el espesor final cumpla con las especificaciones requeridas para un desempeño óptimo del sistema (Figuras 19 y 20).



**Figura 19. Soleras de hule espuma (de etileno-propileno) adheridas a las placas de acrílico.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 20. Comparativa del grosor resultante tras la unión de los paneles de acrílico con las soleras de hule espuma (de etileno-propileno) instaladas.**

Fuente Elaboración propia.

#### **4.5.1.3 Mantenimiento del molde de mdf previo al termoformado**

Finalmente, se implementaron mejoras en el proceso de manufactura del contenedor de microalgas mediante el mantenimiento del molde de MDF utilizado para el termoformado de las placas de acrílico (Figura 21). Mantener este molde en óptimas condiciones es fundamental para garantizar precisión dimensional y una superficie homogénea en las piezas formadas. El mantenimiento preventivo evita deformaciones, acumulación de residuos y desgaste, asegurando una distribución uniforme del calor y la presión durante el termoformado. Gracias a estas acciones, se minimizan defectos como burbujas o

irregularidades en la superficie, lo que mejora la eficiencia del proceso, optimiza el ensamblaje del contenedor y contribuye a un mejor desempeño general del sistema.



**Figura 21. Molde de MDF empleado en el termoformado de placas de acrílico, antes y después del mantenimiento preventivo.**

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.5.1.4 Sustitución de silicón acético por cianocrilato en la unión de soleras y paneles de acrílico**

Durante las modificaciones realizadas al sistema, se detectaron fallas en el adhesivo inicialmente utilizado, silicón acético transparente. Aunque este material era efectivo para recubrir los bordes y uniones del contenedor de microalgas, ofreciendo estabilidad básica, mostró limitaciones significativas como adhesivo principal. Su uso exclusivo en las uniones incrementaba las probabilidades de fuga y filtración de agua entre las soleras de hule espuma (de etileno-propileno), además de favorecer la acumulación de

bioincrustaciones, especialmente en la parte inferior central del contenedor (Figura 22). Este comportamiento se debía a la presión ejercida por el agua en esta zona y a la falta de circulación de aire causada por la separación entre los paneles, lo que comprometía la funcionalidad del sistema.



**Figura 22. Acumulación de bioincrustaciones en la parte inferior del contenedor.**

Fuente: Elaboración propia.

Para solucionar este inconveniente, se implementó cianoacrilato como adhesivo principal en las soleras de hule espuma, lo que generó una notable mejora en las condiciones del ensamblaje. Tras este cambio, no se presentaron fugas ni filtraciones de agua entre las soleras, y la acumulación de bioincrustaciones se redujo significativamente, especialmente en la parte inferior central del contenedor (Figura 23). Esto demostró la efectividad de las mejoras realizadas, garantizando una unión más resistente y un sistema más confiable en condiciones operativas. Mientras tanto, el silicón acético

continuó utilizándose de manera complementaria para recubrir los bordes y uniones, asegurando una mayor estabilidad general y prolongando la vida útil del fotobiorreactor.



**Figura 23. Contenedor de microalgas con soleras de hule espuma unidas con cianoacrilato.**

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.2 Análisis de tiempos de las mejoras implementadas

Para evaluar el impacto de los cambios implementados en los procesos del fotobiorreactor, se realizaron mediciones repetidas en cada etapa, obteniendo tiempos actualizados bajo condiciones reales de operación. Como punto de partida, se tomaron como referencia los registros previos documentados por los ingenieros Gerardo Ballesteros Briseño y Gerardo Rubén Rodríguez Camacho, quienes recopilaron datos en versiones anteriores del sistema.

Sin embargo, a diferencia de esos registros iniciales, enfocados principalmente en la ejecución puntual de las tareas, en esta nueva documentación se amplió el alcance de cada medición, incorporando acciones complementarias como la validación de componentes, revisión dimensional, pruebas de sellado y verificación de adhesión, entre otras. Además, los tiempos registrados en este estudio corresponden, en su mayoría, a un escenario de mantenimiento estructural completo, es decir, al ensamblaje desde cero del contenedor del fotobiorreactor.

Esto implicó integrar etapas adicionales como el mantenimiento del molde de MDF, el corte de placas acrílicas y el termoformado, brindando una visión más integral del proceso y actualizando así la evaluación desarrollada previamente por los ingenieros.

Estos registros se obtuvieron con la participación de un solo operador, dadas las restricciones logísticas y de tiempo. Sin embargo, la naturaleza manual y delicada de las actividades, muchas de ellas realizadas en espacios reducidos o sobre materiales frágiles, hacía poco recomendable la intervención de más personas, ya que podría haber dificultado o entorpecido ciertas tareas.

Asimismo, el manejo de materiales sensibles como el acrílico termoformado exigió un ritmo de trabajo pausado y meticoloso, tanto para evitar errores como para asegurar la calidad de cada operación. Las herramientas disponibles no contemplaban automatizaciones especializadas, lo que incrementó la duración de ciertas tareas, pero garantizó su correcta ejecución. A esto se suman las condiciones particulares del sistema biológico involucrado: al trabajar con organismos unicelulares vivos, se adoptaron medidas de precaución adicionales durante la puesta en marcha para evitar pérdidas de cultivo. Dada la disponibilidad limitada del inóculo en ese momento, fue necesario extremar cuidados en cada fase.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

En este contexto, los tiempos reportados a continuación deben interpretarse como representativos de actividades puntuales clave dentro de cada etapa, más que como una estimación general del esfuerzo requerido. Para facilitar su análisis, se han agrupado en dos bloques diferenciados: el primero corresponde a las actividades realizadas durante la fabricación o mantenimiento estructural completo del sistema; y el segundo, al mantenimiento operativo entre ciclos de cultivo, cuando el sistema ya ha sido instalado previamente.

Es importante señalar que los tiempos más detallados, junto con sus desgloses y observaciones específicas, se encuentran disponibles en los Anexos E y F. En dichos anexos se documentan también las actividades previas de preparación, limpieza, desinfección, inspección, ajustes menores y otras acciones complementarias que forman parte integral del funcionamiento del fotobiorreactor bajo condiciones reales de operación. Además, el resumen de estos tiempos puede consultarse en la Tabla 19, correspondientes al mantenimiento estructural completo.

**Tabla 19. Tiempos registrados durante el mantenimiento estructural completo del fotobiorreactor**

Etapa	Tiempo registrado (Horas y minutos)	Observaciones
Desmontaje	1 hora y 5 minutos	No contaba con registros previos; corresponde al desmontaje controlado del sistema.
Montaje	3 horas y 5 minutos	Armado completo de componentes, incluyendo el ajuste preciso de la estructura metálica y la integración de elementos funcionales bajo condiciones de alineación y sellado específicas.

## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

<b>Puesta en marcha</b>	17 minutos	Implica la habilitación del sistema para iniciar el cultivo, asegurando que las condiciones básicas de operación se encuentren en estado funcional y estable.
<b>Mantenimiento al molde de MDF</b>	7 horas y 3 minutos	Incluye dos moldes trabajados manualmente; la geometría compleja exigió mayor tiempo.
<b>Corte de placa de acrílico</b>	35 minutos	Obtención de 4 placas mediante corte manual; se priorizó preservar la integridad del material.
<b>Termoformado</b>	9 minutos	Tiempo por una sola placa; se utilizaron herramientas específicas para evitar daños en el material.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, con base en el comportamiento observado durante los 42 días de operación continua del sistema mejorado, se estimaron los tiempos correspondientes al mantenimiento parcial que tendría lugar entre cada ciclo de cultivo. A diferencia del mantenimiento estructural completo, esta intervención no implica el desmontaje integral del sistema, ya que las mejoras implementadas han incrementado la durabilidad de los componentes clave y reducido la necesidad de intervención profunda.

En este escenario, solo se contemplan tres etapas específicas: desmontaje, montaje y puesta en marcha, ejecutadas de forma más rápida y focalizada. Además de incluir inspecciones y ajustes menores, estas acciones permiten restablecer las condiciones óptimas del sistema con una carga operativa considerablemente menor y sin requerir procesos como el corte o el termoformado de placas. Los tiempos asociados a estas actividades se presentan en la Tabla 20.

**Tabla 20. Tiempos registrados durante el mantenimiento entre ciclos de operación del fotobiorreactor**

Etapa	Tiempo registrado (Horas y minutos)	Observaciones
<b>Desmontaje</b>	48 minutos	Remoción parcial de componentes para inspección y limpieza; intervención menor.
<b>Montaje</b>	1 hora y 45 minutos	Incluye la reinstalación de componentes operativos y el ajuste cuidadoso sobre la estructura metálica, cuya configuración requiere precisión para asegurar la estabilidad del sistema.
<b>Puesta en marcha</b>	17 minutos	Activación y verificación básica del sistema tras limpieza; sin ajustes mayores.

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este proyecto de investigación se evaluaron y mejoraron los procesos de manufactura de un fotobiorreactor de panel ondulado, aplicando herramientas de ingeniería industrial y la metodología de Diseño y Desarrollo de Productos de Ulrich y Eppinger. Se utilizaron técnicas como el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF), la Casa de la Calidad (HoQ) y el Diagrama de Ishikawa, que permitieron identificar y abordar fallos estructurales y operativos del sistema.

Se concluye que la implementación de materiales más resistentes, la optimización del sellado y la definición precisa de procedimientos de limpieza y mantenimiento contribuyen significativamente a reducir los problemas de bioincrustaciones y contaminación biológica. Las decisiones técnicas se orientaron a mejorar la funcionalidad, eficiencia y confiabilidad del sistema.

Las modificaciones realizadas al diseño original corrigieron deficiencias en el ensamblaje y mejoraron la repetibilidad del proceso de manufactura, asegurando un rendimiento más estable. Con estas mejoras, el fotobiorreactor fortalece las investigaciones del Grupo de trabajo en “Energías Renovables y Productos Sustentables”, integrado por el M.C. Moisés Manzano Herrera, el Dr. José Alfredo Carazo Luna, el Dr. Rogelio Valadez Blanco y la Dra. Paula Cecilia Guadarrama Mendoza, alineándose con su objetivo de optimizar la producción de biomasa de microalgas para aplicaciones energéticas y sustentables. Asimismo, los hallazgos obtenidos abren nuevas oportunidades para implementar sistemas de monitoreo automatizados, lo que facilitaría su escalamiento en futuras investigaciones.

Se alcanzaron todos los objetivos establecidos, demostrando que es posible evaluar y mejorar las operaciones de procesamiento y operaciones de ensamble de este tipo de sistema mediante la metodología aplicada.

Aunque no se desarrolló un fotobiorreactor completamente nuevo, el trabajo realizado constituye un proceso de rediseño funcional. A partir de la evaluación del prototipo existente, se identificaron áreas críticas de mejora y se implementaron cambios estructurales, materiales y operativos que impactaron positivamente en su desempeño.

En este sentido, el uso del término “rediseño” es pertinente dentro del marco metodológico seguido.

Si bien este proyecto se centró en mejoras específicas al fotobiorreactor tipo airlift, las soluciones propuestas pueden servir como base para desarrollar tecnologías más accesibles para el cultivo de microalgas con fines bioenergéticos o alimentarios. La facilidad de mantenimiento, el control del flujo y la documentación técnica generada permiten su adaptación y escalamiento en contextos donde se requiere tecnología funcional, de bajo costo y fácil implementación, especialmente en entornos rurales o educativos. Además, este trabajo se consolidó como una experiencia formativa integral, al vincular conocimientos de ingeniería industrial con una problemática ambiental actual.

Los fotobiorreactores tipo airlift de panel ondulado siguen siendo una alternativa viable y sostenible para la producción de biomasa, compuestos de interés y el tratamiento de aguas. Su potencial en sectores como la biotecnología, la educación y la agricultura se incrementará conforme se optimicen sus diseños y se reduzcan los costos de implementación. Estas mejoras facilitarán su adopción en contextos productivos y académicos, promoviendo el aprovechamiento sustentable de los cultivos de microalgas en el mediano plazo.

### 5.1 Trabajos futuros

- Producción en serie de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas.
- Puesta en marcha de una planta piloto para el cultivo de microalgas.
- Conservación y escalamiento de otras cepas que se puedan utilizar en futuras aplicaciones.
- Creación de contenido multimedia sobre el fotobiorreactor, incluyendo mantenimiento, ensamble, puesta en marcha y escalamiento de microalgas, para futuros proyectos.
- Desarrollo de manuales técnicos adaptados al contexto de la región y promover el vínculo con cooperativas o emprendimientos interesados en el cultivo de microalgas, ya sea con fines energéticos o alimentarios.

## 5.2 Recomendaciones

- Explorar alternativas al uso de la solera de hule espuma por otro tipo de unión mecánica, como juntas de silicona, empaques de neopreno, cintas de espuma de alta densidad o selladores, según la disponibilidad de materiales y el nivel de hermeticidad requerido.
- Evaluar opciones para aumentar la presión de vacío de la termoformadora actual, asegurando que la geometría del molde se replique correctamente en la placa de acrílico.
- Adquirir una termoformadora con un área de trabajo mayor que la actual, por ejemplo de la marca **MATER Termoformadoras**, modelo **2 x 3**, tipo **semiautomática**, cuya área de trabajo es de **60 x 90 cm**.
- Evaluar materiales alternativos al MDF para la manufactura del molde, considerando resistencia térmica, durabilidad y facilidad de mecanizado, como aluminio, resinas epóxicas o impresión 3D con filamentos de alta temperatura.
- Considerar otras técnicas de manufactura para la fabricación del contenedor de microalgas del fotobiorreactor, priorizando métodos viables con los recursos disponibles en la universidad, como termoformado optimizado, impresión 3D con materiales resistentes o moldeo por vacío.
- Organizar campañas o actividades para involucrar a más personal en el proyecto 'Energías Renovables y Productos Sustentables', fomentando la colaboración a través de talleres, conferencias, demostraciones prácticas y redes de trabajo interdisciplinarias.
- Promover la transferencia del conocimiento generado en este proyecto mediante la organización de talleres, demostraciones prácticas y capacitaciones, en colaboración con universidades, centros de formación técnica o instituciones locales, con el fin de vincular sus resultados con el sector productivo de la región Mixteca.



## REFERENCIAS

- [1] A. de las M. Grijalva Endara, M. E. Jiménez Heinert, y H. X. Ponce Solórzano, "Contaminación del agua y aire por agentes químicos", *RECIMUNDO; Editorial Saberes del Conocimiento, Guayaquil, Ecuador*, vol. 4, núm. 4, pp. 79–93, oct. 2020, doi: 10.26820/recimundo/4.
- [2] I. J. Zegarra Tello, C. F. Cabrera Carranza, y R. Moore Torres, "Tendencias y escenarios de la contaminación del aire por origen automotriz en Lima Metropolitana", *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas. Lima, Perú.*, vol. 24, núm. 47, pp. 211–219, jun. 2021, doi: 10.15381/iigeo.v24i47.20640.
- [3] Â. P. Matos, "The Impact of Microalgae in Food Science and Technology", *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society. Santa Catarina, Florianópolis, Brazil*, vol. 94, núm. 11, pp. 1333–1350, nov. 2017, doi: 10.1007/s11746-017-3050-7.
- [4] A. López-Sánchez *et al.*, "Microalgae-based livestock wastewater treatment (MbWT) as a circular bioeconomy approach: Enhancement of biomass productivity, pollutant removal and high-value compound production", el 15 de abril de 2022, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114612.
- [5] M. De Gregorio, *Energía de las Algas: Presente y Futuro*. España: Ministerio de Ciencia e Innovación, BioPlat, 2009.
- [6] A. L. Flores Rosales, "Propiedades y beneficios del uso de las microalgas para la producción de biodiesel", Trabajo de Investigación para optar el grado de: Bachiller en ingeniería ambiental, Universidad Científica del Sur , Lima, Perú, 2020.
- [7] A. Maghzian, A. Aslani, y R. Zahedi, "Review on the direct air CO<sub>2</sub> capture by microalgae: Bibliographic mapping", el 1 de noviembre de 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.egyr.2022.02.125.
- [8] A. Hernández Pérez y J. I. Labbé, "Microalgas, cultivo y beneficios", *Rev Biol Mar Oceanogr*, vol. 49, núm. 2, pp. 157–173, ago. 2014, doi: 10.4067/S0718-19572014000200001.

- [9] G. R. Rodríguez Camacho, “Diseño y manufactura de un fotobiorreactor para el cultivo de microalgas”, Tesis para obtener el título de: Ingeniero Industrial, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Heroica Ciudad de Huajuapan de León, Oaxaca, 2017.
- [10] G. Ballesteros Briseño, “Manufactura de un fotobiorreactor tipo ‘airlift’ para mejorar la eficiencia productiva en la generación de biomasa algal”, Tesis para obtener el grado de: Maestro en Tecnología Avanzada de Manufactura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Heroica Ciudad de Huajuapan de León, Oaxaca, 2019.
- [11] L. Carlos Fernández-Linares, J. Montiel-Montoya, ; Aarón Millán-Oropeza, Y. Jesús, y A. Badillo-Corona, “Producción de biocombustibles a partir de microalgas”.
- [12] C. Freire-Vinuela, K. Meneses, y G. Cuesta, “América Latina: ¿Un paraíso de la contaminación ambiental?”, *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 55, núm. 2, pp. 1–18, jul. 2021, doi: 10.15359/rca.55-2.1.
- [13] Cuadernos de la red Iberomasa, “Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético. trabajos de investigación 2020”, *Red Iberomasa*, VALENCIA, ESPAÑA, pp. 229–273, 2020.
- [14] L. Gómez Luna, L. Tormos Cedeño, y Y. Ortega Díaz, “Cultivo y aplicaciones de Chlorella Vulgaris: principales tendencias y potencialidades en la agricultura”, *Tecnología química*, vol. 42, núm. 1, pp. 70–94, abr. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://orcid.org>
- [15] S. O. Cinar, Z. K. Chong, M. A. Kucuker, N. Wieczorek, U. Cengiz, y K. Kuchta, “Bioplastic production from microalgae: A review”, el 1 de junio de 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ijerph17113842.
- [16] J. E. Sosa-Hernández *et al.*, “Mexican microalgae biodiversity and state-of-the-art extraction strategies to meet sustainable circular economy challenges: High-value compounds and their applied perspectives”, *Mar Drugs*, vol. 17, núm. 3, mar. 2019, doi: 10.3390/md17030174.

- [17] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, Quinta edición. México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2013.
- [18] I. Alsyouf, A. Al-Alami, y A. Saidam, “Implementing product design development methodology for assessing and improving the performance of products”, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 9, núm. 3, pp. 225–234, ago. 2015, doi: 10.1007/s12008-015-0281-4.
- [19] S. E. Melchor González, “Instrumentación de un fotobiorreactor de panel plano tipo airlift para el cultivo de microalgas”, Tesis para obtener el título de ingeniero industrial, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapan de León, Oaxaca, 2017.
- [20] F. F. Cortés Conde, D. Rubio Fernández, y É. M. Gómez Espinosa, “Análisis comparativo de modelos hidrodinámicos y cinéticos para fotobiorreactores airlift”, *ITECKNE*, vol. 10, núm. 1, pp. 57–66, jul. 2013.
- [21] I. Albarracín. *Microalgas: Potenciales Productoras de Biodiesel*. XV SIMPOSIO ELECTRONICO INTERNACIONAL. pp. 1–16, octubre. 2007.
- [22] J. F. Morales Domínguez, *Algunas aplicaciones biotecnológicas en plantas y microalgas*, Primera Edición. Aguascalientes, Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes, 2022.
- [23] O. S. Castillo, S. G. Torres-Badajoz, C. A. Núñez-Colín, V. Peña-Caballero, C. H. Herrera Méndez, y J. R. Rodríguez-Núñez, “Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas Biodiesel production from microalgae: progress and biotechnological prospects”, 2017.
- [24] K. A. Gómez Rengifo, “Aplicación de spirulina en el desarrollo de alimentación humana y animal”, TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN DE LA SEGURIDAD Y CALIDAD ALIMENTARIA, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, Valencia, España, 2020.

- [25] M. V. Oviedo Olvera, J. F. García Trejo, M. I. Nieto Ramírez, M. Tovar Ramírez, B. Parra Pacheco, y C. Gutiérrez Antonio, “Estudio del uso de harinas de microalga y larva de mosca soldado como nuevos insumos para la alimentación de Tilapia”, *Emprennova*, vol. 1, núm. 2, pp. 155–161, dic. 2020.
- [26] A. Martínez Ruiz, “Las microalgas y la salud en la actualidad, una revisión bibliográfica. -Modalidad REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA-”, Trabajo Final de Máster Nutrición y Salud, Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, España, 2021.
- [27] C. Delgado Tejera, “Uso de Microalgas en la Industria Farmacéutica”, Trabajo de Fin de Grado, Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, España, 2020.
- [28] R. S. Cuascota Méndez, “Sistema de medición y adquisición de datos del oxígeno disuelto en biorreactores para microalgas”, Universidad Técnica del Norte - Trabajo de Grado Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Mecatrónica, Ibarra, Ecuador, 2020.
- [29] M. M. Maroneze, C. A. Montenegro Herrera, y A. Martínez Jiménez, “Perspectivas sobre los sistemas de cultivo de microalgas: una revisión crítica”, *BioTecnología*, vol. 25, núm. 5, pp. 11–34, 2021.
- [30] S. D. Chasquibol Calongos, “Revisión de las Técnicas de Producción de Biocombustibles a Partir de Microalgas”, Universidad César Vallejo - Tesis Para Obtener Título Profesional de Ingeniero Ambiental, Lima, Perú, 2021.
- [31] R. O. Pérez García, “Eliminación de nutrientes para el tratamiento biológico de agua residual usando un sistema inmovilizado microalga-bacteria en crecimiento autotrófico, heterotrófico y mixotrófico”, Tesis Para Obterner el Grado de: Maestro en Ciencias, Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S.C., La Paz, Baja California Sur, 2009.
- [32] E. Romero Bermúdez y J. Díaz Camacho, “El uso del diagrama causa-efecto en el análisis de casos”, *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (Méjico)*, vol. XL, núm. 3–4, pp. 127–142, 2010.

- [33] D. D. Burgasí Delgado, D. V. Cobo Panchi, K. T. Pérez Salazar, R. L. Pilacuan Pinos, y M. B. Rocha Guano, “El diagrama de Ishikawa como herramienta de calidad en la educación: una revisión de los últimos 7 años”, *Revista electrónica TAMBARA*, vol. 14, núm. 84, pp. 1212–1230, jul. 2021.
- [34] EDUTEKA, “Diagramas causa-efecto”, <https://eduteka.icesi.edu.co/articulos/diagramas-causa-efecto>. [En línea]. Disponible en: [http://www.educationoasis.com/curriculum/GO/cause\\_effect.htm](http://www.educationoasis.com/curriculum/GO/cause_effect.htm)
- [35] B. Elahi, “Risk Analysis Techniques”, en *Safety Risk Management for Medical Devices*, Elsevier, 2018, 12, pp. 67–120. doi: 10.1016/b978-0-12-813098-8.00012-x.
- [36] I. Silva Urbina, M. Rodríguez Pineda, R. Acosta Rozo, y P. Gómez Monsalve, “Diseño de plan de mantenimiento preventivo para los talleres del centro CIES SENA regional norte de santander utilizando metodología AMEF”, *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 3, pp. 143–154, 2020, [En línea]. Disponible en: <http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/port>
- [37] “Revista de Aplicaciones de la Ingeniería”, *ECORFAN*, vol. 2, núm. 5, pp. 230–238, dic. 2015.
- [38] P. A. Taylor *et al.*, “Prioritizing clinical trial quality assurance for photons and protons: A failure modes and effects analysis (FMEA) comparison”, *Radiotherapy and Oncology*, vol. 182, pp. 1–8, ene. 2023, doi: 10.1016/j.radonc.2023.109494.
- [39] C. Park, C. Kontovas, Z. Yang, y C. H. Chang, “A BN driven FMEA approach to assess maritime cybersecurity risks”, *Ocean Coast Manag*, vol. 235, ene. 2023, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106480.
- [40] “AMFE: Análisis Modal de Fallos y Efectos”, *Librería Hor Dago, Vizcaya, España*.
- [41] M. Bestratén Bellovi y R. Ma. Orriols Ramos, “NTP 679. Análisis modal de fallos y efectos. AMFE.”, Madrid, España, 2004.
- [42] E. S. Olaya Escobar, C. J. Cortés Rodríguez, y O. G. Duarte Velasco, “Despliegue de la función calidad (QFD): beneficios y limitaciones detectados en su aplicación

al diseño de prótesis mioeléctrica de mano”, *Revista Ingeniería e Investigación*, vol. 25, núm. 1, pp. 30–38, abr. 2005, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64325105>

- [43] Y. Akao, “QFD: Past, Present, and Future”, 1997.
- [44] S. L. Silva Chavelas, “Aplicación de herramientas estadísticas en un contexto Seis Sigma a un proceso de servicios de salud”, Tesis Profesional, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, 2006.
- [45] L. Santiago Martínez, “Diseño y manufactura de un sedimentador para la cosecha de microalgas”, Para obtener el título de Ingeniero Industrial, Universidad Tecnológica de la Mixteca, HCA. CD. De Huajuapan de León, Oaxaca, 2024.
- [46] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [47] F. Pérez, M. Morales, y D. López, “Lean Manufacturing aplicado a procesos de ensamble en la industria automotriz,” *Rev. Iberoam. Ing. Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 45–58, 2019.
- [48] C. U. Ugwu, H. Aoyagi, and H. Uchiyama, “Photobioreactors for mass cultivation of algae,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 10, pp. 4021–4028, Jul. 2008.
- [49] N. Zou and A. Richmond, “Light-path length and population density in photobioreactors for microalgal mass production,” *Biomass Bioenergy*, vol. 18, no. 4, pp. 393–402, Apr. 2000.

## ANEXOS

### ANEXO A. TIEMPOS REALIZADOS POR GERARDO RUBÉN RODRÍGUEZ CAMACHO Y GERARDO BALLESTEROS BRISEÑO.

Tabla de tiempos del proceso de ensamblaje del GBB19 por Gerardo Ballesteros Briseño

OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO	TIEMPO ACUMULADO
	(minutos)	(minutos)
Limpieza de placas	15	15
Colocación de componentes	10	25
Pegado de las placas	17	42
Armado de la estructura	26	68
Ensamble	48	116
Montaje del FBR	12	128
Desinfección	120	248
Llenado con inóculo	35	283
<b>TIEMPO TOTAL</b>		<b>4 horas 43 minutos</b>

Tabla de tiempos del proceso general para ensamblar el GRR17 por Gerardo Rubén Rodríguez Camacho.

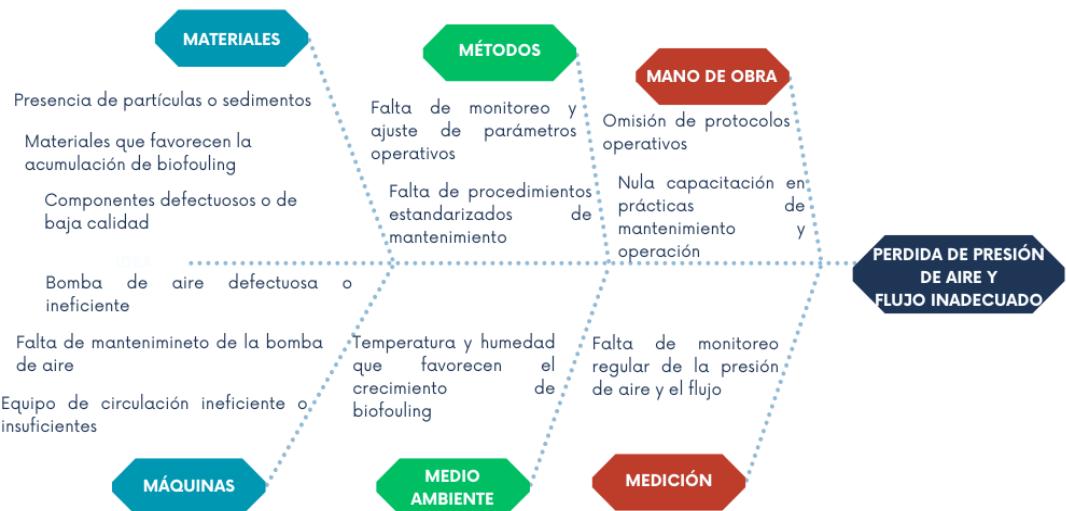
PLAN DE PROCESOS					
No. de parte:		Fbr-t-01	fecha	10-oct-2017	Material
Nombre de parte:		FBR			Acrílico
Original:		GRRC			Cliente
Revisión:		MMH	fecha	10-oct-2017	UTMIX-CA-37
No	Descripción	Estación de trabajo	Preparación	Herramienta	Tiempo
1	Cortar lámina de acrílico	Mesa de trabajo 1	Anexo E. Planeación de procesos	Cortador de acrílico	1 hr
2	Termoformar lámina de acrílico	Termoformadora 1		Termoformadora	15 min
3	Ensamblar láminas de acrílico	Mesa de trabajo 1		Cloruro de metileno	2 hrs
4	Barrenar ensamble	Taladrora 1		Broca 1/4"	1 hr
5	Colocar cinta aisladora	Mesa de trabajo 1		Cinta de neopreno	15 min
6	Unir placas de acrílico	Mesa de trabajo 1		Tornillos	20 min

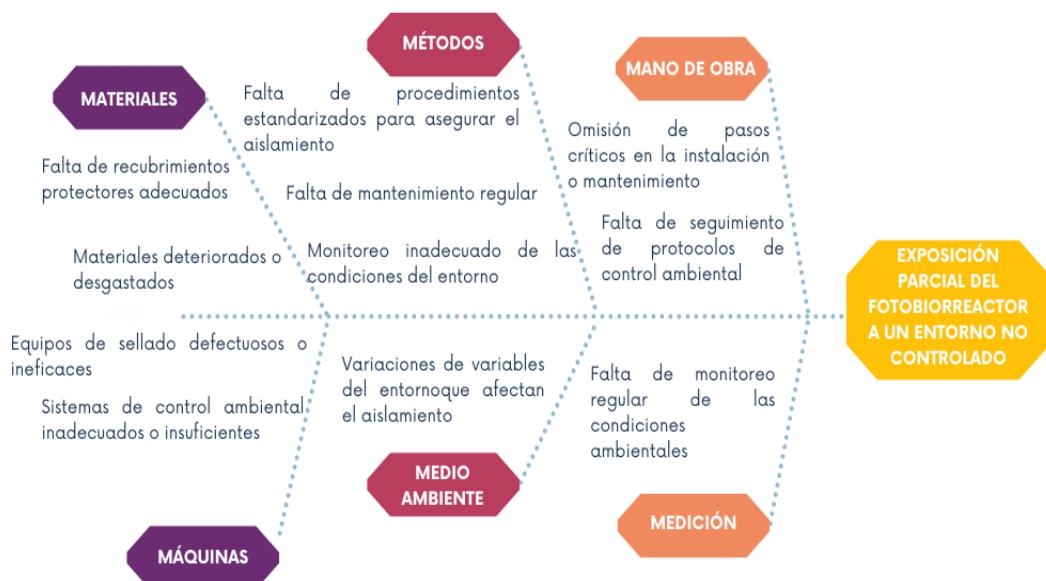
Tabla de tiempo del proceso de termoformado de las placas de acrílico por Gerardo Rubén Rodríguez Camacho.

Núm.	Proceso	Tiempo
1	Estabilizar temperatura de la parrilla	5 min
2	Calentamiento de la placa de acrílico	5 min
3	Presión de vacío	1 min
4	Enfriamiento a temperatura ambiente	10 min
5	Desmolde	10 seg

## ANEXO B. DIAGRAMAS DE ISHIKAWA

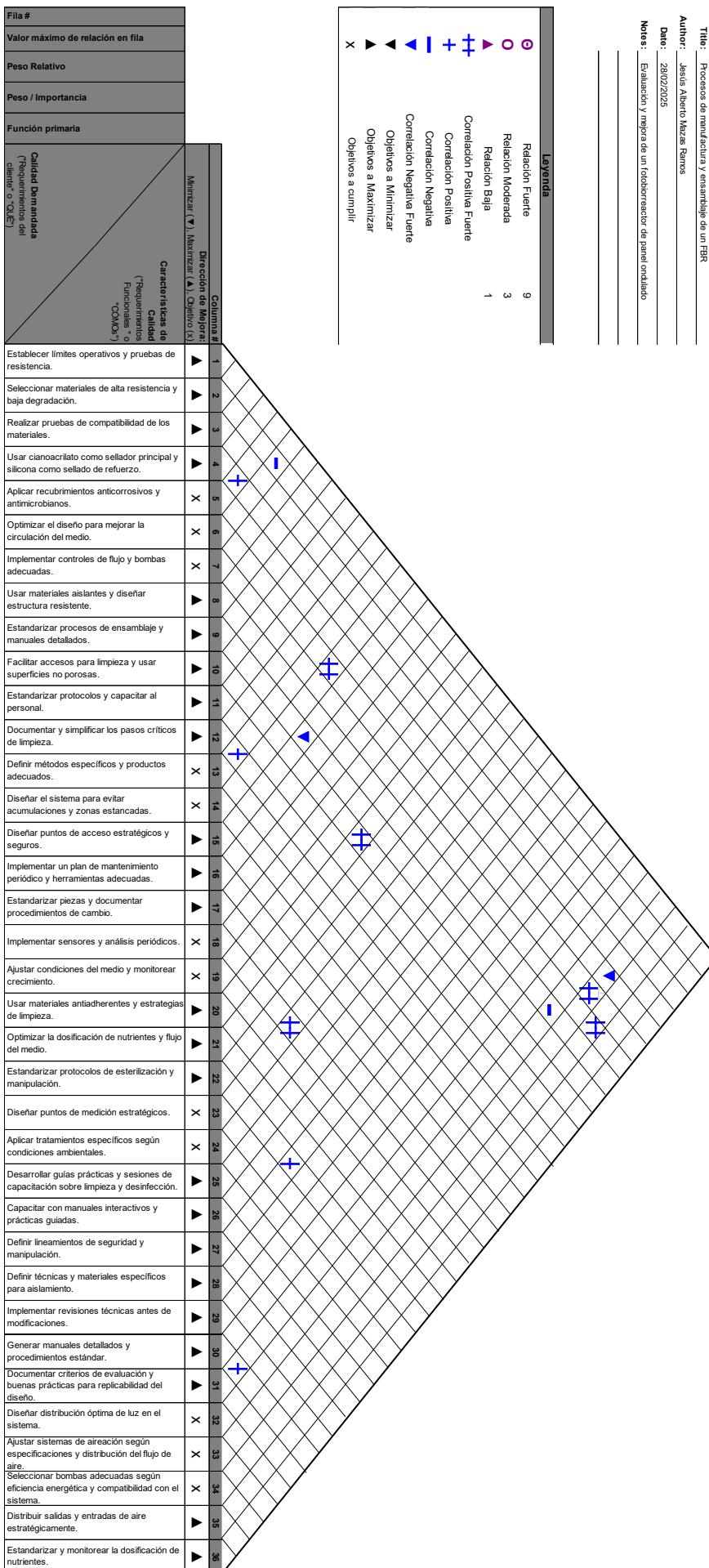












				Columna #	Características de Calidad ("Requerimientos Funcionales" o "CÓMOs")
				Dir. de Mejora: Minimizar (▼), Maximizar (▲), Objetivo (x)	Calidad Demandada ("Requerimientos del cliente" o "QUÉs")
Fila #	Valor máximo de relación en fila	Peso Relativo	Peso / Importancia	Función primaria	Función secundaria
1	9	3.3	10.0	Integridad estructural y materiales	Resistencia a variaciones de presión
2	9	3.3	10.0		Materiales duraderos y resistentes al desgaste
3	9	2.6	8.0		Compatibilidad química de materiales
4	9	3.3	10.0		Sellado eficiente y hermético.
5	9	2.0	6.0		Recubrimientos protectores adecuados
6	9	3.3	10.0		Circulación eficiente del medio
7	9	3.3	10.0		Flujo de agua constante y óptimo
8	9	2.6	8.0		Aislamiento resistente a cambios ambientales
9	9	2.6	8.0		Ensamblaje intuitivo y con mínima posibilidad de error
10	9	3.3	10.0		Limpieza completa y efectiva
11	9	2.6	8.0		Facilidad para cumplir protocolos de limpieza
12	9	3.3	10.0		Proceso de limpieza y desinfección claro
13	9	2.6	8.0		Procedimientos estandarizados de desinfección
14	9	3.3	10.0		Eliminación de puntos muertos y buena circulación
15	9	2.6	8.0		Acceso fácil y seguro para operación y mantenimiento.
16	9	2.6	8.0		Mantenimiento sencillo y programable.
17	9	2.6	8.0		Fácil identificación y reemplazo de piezas.
18	9	2.6	8.0	Control de calidad y monitoreo	Monitoreo regular de microorganismos.
19	9	2.6	8.0		Control eficiente de densidad celular.
20	9	3.3	10.0		Minimización de bioincrustaciones y sedimentos.
21	9	2.6	8.0		Reducción de acumulación de nutrientes no deseados.
22	9	2.6	8.0		Control del uso de líquidos esterilizados.
23	9	2.6	8.0		Puntos de acceso adecuados para sensores.
24	9	2.0	6.0		Recubrimientos resistentes al ambiente operativo.
25	9	2.6	8.0		Capacitación en limpieza y desinfección.
26	9	2.6	8.0		Capacitación en mantenimiento y operación.
27	9	2.6	8.0		Procedimientos claros para manejo de químicos.
28	9	2.0	6.0	Capacitación y operación segura	Estandarización de procesos de aislamiento.
29	9	2.0	6.0		Modificaciones planificadas y respaldadas.
30	9	2.6	8.0		Documentación y estandarización en instalación/mantenimiento.
31	9	2.0	6.0		Reducción de errores en manufactura y ensamblaje experimental.
32	9	2.6	8.0		Illuminación uniforme y suficiente.
33	9	3.3	10.0		Aireación confiable y adecuada.
34	9	3.3	10.0		Equipo de circulación eficiente.
35	9	3.3	10.0		Flujo de agua uniforme en todas las áreas.
36	9	2.6	8.0		Control eficiente de disponibilidad de nutrientes

Fila #	Columna #1											
	Dirección de Mejora											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Valor máximo de relación en fila	▲	▲	▲	▲	×	×	×	×	▲	▲	▲	▲
Peso Relativo	Características de Calidad (Requerimientos o Funcionales o "COMS")											
Peso / Importancia	Función primaria											
Diseño para facilidad de uso y mantenimiento	Calidad Demandada ("Requerimientos del cliente" o "QCL")											
Resistencia a variaciones de presión	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Materiales duraderos y resistentes al desgaste	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Compatibilidad química de materiales	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Sellado suficiente y hermético	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Recubrimientos protectores adecuados	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Circulación eficiente del medio	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Flujo de agua constante y óptimo	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Aislamiento resistente a cambios ambientales	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Embalaje intimo y con mínima posibilidad de error	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Limpieza completa y efectiva	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Facilidad para cumplir protocolos de limpieza	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Proceso de limpieza y desinfección claro	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Procedimientos estandarizados de desinfección	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Eliminación de puntos muertos y buena circulación	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Acceso fácil y seguro para operación y mantenimiento.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Mantenimiento sencillo y programable	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Fácil identificación y reemplazo de piezas.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●



## ANEXO D. MANUALES DE PROCEDIMIENTOS

### Manual de procedimientos para el ensamblaje del fotobiorreactor GBB19

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>

#### OBJETIVO.

- Ensamblar en condiciones ideales el fotobiorreactor.

#### ALCANCE.

- Este procedimiento debe ser adoptado y aplicado por todos los investigadores, estudiantes, docentes, y terceros que desarrollen sus tareas, tanto en forma permanente como temporaria, en el laboratorio.

#### NORMAS DE OPERACIÓN.

- Se seguirán las normas generales del laboratorio de la universidad.
- Ninguna persona ajena al Laboratorio o no instruida en su uso deberá manipular el material y equipo de laboratorio.
- Se deberá tener el cuidado necesario para no dañar las piezas.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 1 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			

 	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <b>FECHA:</b> <b>Diciembre 2023</b>
		<b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> <b>P-EF051223</b>

#### MATERIAL Y/O EQUIPO

- Solera de hule espuma 1/4" x1/2" o 1/8"x3/4"
- Llave española milimétrica de 11 mm
- Tornillos de 11 mm x 1"
- Tuercas para tornillos de 11 mm
- Tubo de silicón transparente para pistola
- Pistola para tubo de silicón
- Esther de Cianocrilato (Resistol 911 ó Kola Loka Brocha)
- Equipo de protección personal
- Tiras de madera de varias medidas
- Prensas tipo "C" de 1" y 2"
- Cuatro placas de acrílico
- Dos tiras de acrílico
- Cuatro mangueras para difusores de aire
- Cuatro difusores de aire
- Perfiles de metal
- Bridas de plástico de 20 o 30 cm

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 2 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			

 	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 <b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b>	

### **TIEMPO DE LA ACTIVIDAD**

Debido a que se deberá dejar intervalos de tiempo largos, esto dependerá del conocimiento, la cantidad de personas involucradas y la habilidad para el ensamble.

### **DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES**

#### 1. Pegado/armado

**Nota1:** Todo proceso/actividad que involucre el uso de pegamentos industriales, debe realizarse utilizando el equipo de seguridad personal, guantes, cubrebocas, lentes de seguridad, etc. Así también, que la actividad se realice en un espacio con suficiente ventilación para evitar intoxicación por los solventes del pegamento.

**Nota2:** Se exhorta a identificar cada cara del tanque y las geometrías que las distingue antes de pegarlas. (Figura 3)

**Nota3:** Se exhorta a rectificar las medidas establecidas para las placas de acrílico, las cuales se encuentran en el apartado de anexos.

1.1. Se pegan las dos placas de acrílico de un mismo lado por su parte de en medio con el silicon transparente, apoyándose de un pedazo de tira de madera para retirar excedentes. (Figura 4)

1.2. Para garantizar que las uniones se peguen bien, se utilizan un par de tiras de madera y se estabilizan con las prensas "C". Se deja secar por 48

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 3 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			

	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 DII&E <small>UTMIX-CD-37</small> <small>INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</small>
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223

horas. (Figura 5)

1.3. Pasado las 48 horas, con una navaja se retira el excedente de silicon que aun existe.

1.4. Con precaución, se coloca una de las caras del tanque exponiendo la parte interior de esta, a la cual se le pegara la solera de hule-espuma y se limpia su contorno con un trapo seco.

**Nota4:** Para adherir la solera, se utilizará el cianocrilato (Resistol 911), aplicando de manera uniforme, formando hilos o líneas rectas cortas. Lo anterior para evitar cometer errores al momento de pegar la solera, pues es un adhesivo de secado rápido y pueden surgir imperfecciones que deriven en retrabajos.

**Nota5:** Los siguientes pasos se sugiere el apoyo de una segunda persona.

1.5. Conforme se va aplicando el adhesivo (éster de cianoacrilato) se va colocando la solera en tramos cortos, hasta completar todo el contorno. Ambas puntas de la solera deberán unirse con un corte en diagonal para cerrar el cuadro. Dejando secar por 15 minutos. (Figura 6)

**Nota6:** Se sugiere que antes de colocar la otra placa de acrílico, se aplique una capa de cianocrilato en la unión entre la placa de abajo y la solera. (Figura 7)

1.6. Para colocar la otra placa de acrílico sobre la placa con la solera ya pegada se sugiere colocar las mangueras de los difusores de aire antes de cerrar las placas por completo. (Figura 8)

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 4 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			

 	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223

Para pegar la segunda placa se repetirá el paso anterior, pero aplicando líneas más largas del adhesivo (ya sea abarcando todo el contorno o a la mitad del contorno), pues al ser una estructura poco flexible y que el adhesivo se seca de manera inmediata se complica más su manejo.

(Figura 9)

**Nota7:** Para unir la segunda cara del tanque, se puede aplicar el cianocrílato en cualquiera de las dos caras de acrílico, pero, preferiblemente aplicar sobre la solera de hule-espuma de la primera cara, pues permitirá mayor visión al manipular la segunda cara de acrílico para centrar y pegarla.

1.7. Una vez colocada la segunda placa de acrílico, se procede a fijar con las diferentes tiras de madera y sujetadas por las prensas "C" por todo el contorno del tanque. Cuidando de no excederse en la presión de las prensas, pues se expone a las placas de acrílico que se puedan romper o que se presione de más la solera y se presenten fugas. Se dejan las prensas por 48 horas. (Figura 10)

1.8. Pasadas las 48 horas, se retiran las prensas "C" y se verifica que el pegado de la solera sea uniforme, de ser necesario se vierte cianocrílato en cada unión de todo el contorno del tanque, evitando así posibles fugas de agua. Se deja secar por 24 horas más.

1.9. Se procede a colocar las dos tiras de acrílico que dan soporte de ambos lados del tanque, esto se realiza vertiendo suficiente silicón transparente

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 5 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			

 	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023  <b>Versión:</b> 1  <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223

por la parte de en medio del tanque, se colocan las tiras ejerciendo presión para que el silicon se esparza uniformemente, se deja secar por un par de horas y se vierte más silicon por todos los lados de las tiras para sellar y de las uniones de en medio de las placas para evitar fugas de agua.

**Nota8: las tiras de acrílico se colocan una después de la otra, esperando las 24 horas recomendables para el secado del silicon.**

- 1.10. Se finaliza colocando una capa de silicon uniforme por todo el contorno del tanque, evitando dejar excesos que puedan afectar o estorbar al momento del montaje. Se deja secar por 24 horas más. (Figura 11)

## 2 Primera prueba de fugas

- 2.1. Se vierten al menos 3 litros de agua y se comienza a girar el tanque para observar posibles fugas de agua. Dejando pasar de 10 a 20 minutos por cada lado, se pueden apoyar con una lámpara. De existir fugas de agua se retira el agua dentro del tanque, se retira el silicon perteneciente al lado en donde hay fugas de agua, se deja secar o se seca con un paño seco y se coloca cianocrilato, se deja secar y se coloca nuevo silicon.

## 3. Montaje

- 3.1. Se monta el tanque que almacena las microalgas, colocando el perfil de metal que corresponde a la parte inferior o la base del FBR, atornillando

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 6 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			

	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 CA II&E <small>UTMCA-37</small> INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223

con los tornillos de 11 mm y las tuercas que lo mantienen sujeto con la llave de 11 mm. Cuidando de no hacer mucha presión pues de hacerlo podría causar que el silicon se desprenda del tanque. De ser necesario apoyarse de unas tiras de madera para dar mayor estabilidad. (Figura 12)

3.2. Se procede a montar en los perfiles laterales, atornillando los perfiles cercanos a la base, utilizando también bridales de plástico para dar estabilidad y poder atornillar el resto de orificios, las bridales al frente como en la parte posterior. Así también el perfil de la parte superior en forma de tira que va atornillado a la estructura que soporta el FBR. (Figura 13)

**Nota9: de ser necesario utilizar tiras de madera para dar soporte a los perfiles laterales y que no desprendan el silicon del tanque. Además de puntualizar que en ocasiones por las dimensiones del tanque, este abarque más área de los perfiles laterales y no será necesario atornillarlo del todo. (Figura 14)**

3.3. Se atornillan los ejes que dan soporte por la parte de en medio y se ajustan por la parte de arriba con cuatro bridales de plástico para dar estabilidad. (Figura 15)

4. Conexión de mangueras a bomba de aire. (Figura 16)

4.1. Se conecta el dispensador de aire de las mangueras a la bomba de aire, dejando libre el número de orificios que se utilizarán.

4.2. Se conectan las mangueras al dispensador de aire.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 7 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			

 	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023  <b>Versión:</b> 1  <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223

4.3. Las mangueras colocadas dentro del FBR se conectan a las mangueras del dispensador con un pequeño conector de perilla.

5. Segunda prueba de fugas de agua y de resistencia.

5.1. Se vierten de 10 a 12 litros de agua dentro del tanque. Y se deja por al menos 72 horas, monitoreándolo cada 12 o 24 horas observando que no existan fugas de agua o grietas en el tanque.

**Nota10: en caso de haber utilizado las tiras de madera, estas serán de gran utilidad para identificar fugas de agua.**

6. Limpieza

6.1. Se colocan los difusores de aire.

6.2. Se vierte 0.4 ml de cloro (Cloralex) por cada litro de agua que hay en el tanque.

6.3. Se enciende la bomba de aire, se abren las perillas de las mangueras de aire y se deja trabajar por 3 horas.

6.4. Pasado ese tiempo, se extrae el agua con cloro y se vierte agua nueva pasada por osmosis inversa o agua potable para enjuagar el interior del tanque y los difusores, se deja trabajar la bomba de aire por 2 horas.

6.5. Se vuelve a extraer el agua y se deja secar al sol por 24 horas.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 8 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			135

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023</p> <p><b>Versión:</b> 1</p> <p><b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>
---	---	---

## ANEXOS

### Esqueleto del FBR



Figura 1. Esqueleto completo del FBR con sus soportes de perfiles metálicos.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 9 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023</p> <p><b>Versión:</b> 1</p> <p><b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>
---	---	---

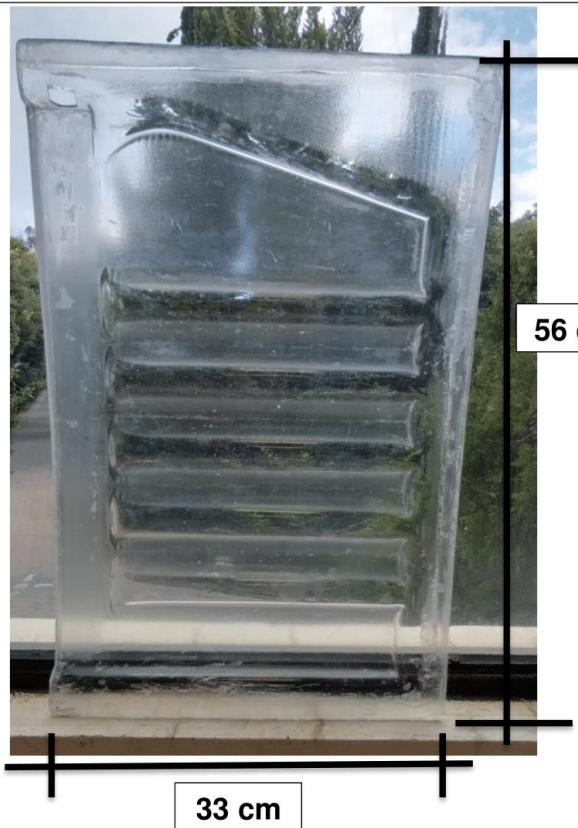


Figura 2. Placa de acrílico termoformada con la geometría del FBR.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 10 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> <b>Diciembre 2023</b></p> <p><b>Versión: 1</b></p> <p><b>CÓDIGO:</b> <b>P-EF051223</b></p>
---	---	---



*Figura 3. Identificar la posición de cada cara antes de unirlas es de suma importancia.*

Elaboró:  Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 11 de 21
---	---------	-----------	-----------------

 	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023</p> <p><b>Versión:</b> 1</p> <p><b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>
---	---	---

**Pegado/ armado**

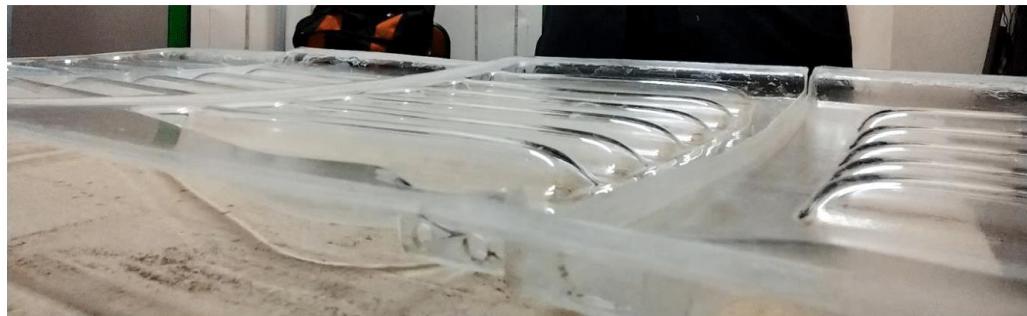


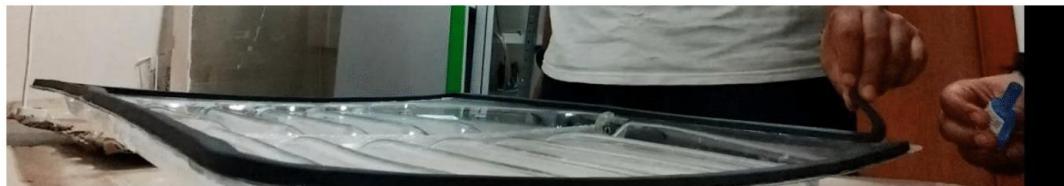
Figura 4. Unión de las placas de acrílico con su respectivo par.



Figura 5. Utilización de prensas tipo "C" aseguran que la unión entre placas sea firme y uniforme.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 12 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>
---	--	---



*Figura 6. Proceso de unión de la solera de hule espuma con el panel de acrílico.*

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 13 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 UTMIX-CA-37 INCENIERIA INDUSTRIAL Y ENTORNO
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223



Figura 7. *Sellado interno entre panel de acrílico y solera de hule espuma.*



Figura 8. *Instalación de las mangueras de los difusores de aire antes de cerrar las placas de acrílico.*

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 14 de 21
Mazas Ramos Jesús Alberto			

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p><b>CA</b> <b>II&amp;E</b> UTMCA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p>
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p><b>FECHA:</b> <b>Diciembre 2023</b></p>



*Figura 9. Aplicación de adhesivo en líneas más largas para fijar la segunda placa, facilitando el ensamblaje.*

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 15 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023</p> <p><b>Versión:</b> 1</p> <p><b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>
---	---	---



Figura 10. Fijación de la segunda placa con tiras de madera y prensas "C", evitando exceso de presión para prevenir daños o fugas. Tiempo de sujeción: 48 horas



Figura 11. Aplicación de una capa uniforme de silicón en todo el contorno del tanque, evitando excesos. Tiempo de secado: 24 horas.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 16 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p>CA II&amp;E UTMCA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p>
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p>FECHA: Diciembre 2023</p>

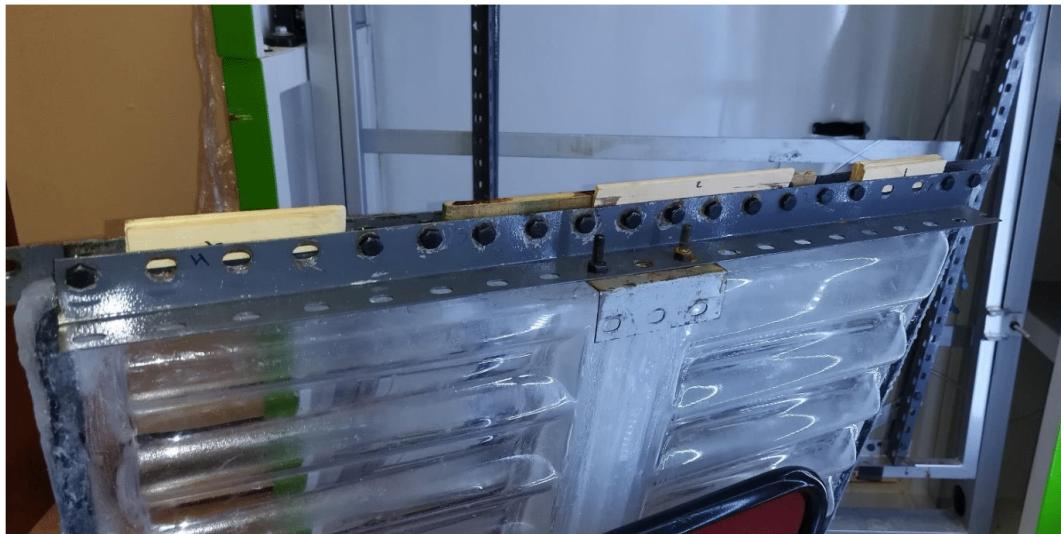


Figura 12. Montaje del tanque de microalgas sobre su base metálica, fijándolo con tornillos y tuercas de 11 mm.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 17 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023</p> <p><b>Versión:</b> 1</p> <p><b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>
---	---	---



*Figura 13. Fijación de los perfiles laterales y superiores con tornillos y bridas de plástico para mayor estabilidad en la estructura del FBR.*

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 18 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>



*Figura 14. Uso de tiras de madera para estabilizar los perfiles laterales y evitar el desprendimiento del silicon. En algunos casos, el tamaño del tanque puede reducir la necesidad de atornillado completo.*

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 19 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p>FECHA: <b>Diciembre 2023</b></p> <p>Versión: 1</p> <p>CÓDIGO: <b>P-EF051223</b></p>
--	---	--



*Figura 15. Fijación de los ejes centrales con tornillos y ajuste superior con cuatro bridas de plástico para mayor estabilidad.*

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 20 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

 	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: ENSAMBLAJE DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023</p> <p><b>Versión:</b> 1</p> <p><b>CÓDIGO:</b> P-EF051223</p>
---	---	---



Figura 16. Conexión de mangueras a bomba de aire

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 21 de 21
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

## Manual de procedimientos para el mantenimiento del fotobiorreactor GBB19

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial</p> <p><b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p><b>CA II&amp;E</b> INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p>FECHA: Diciembre 2023 Versión: 1 CÓDIGO: P-MF051223</p>
--	---	--

### OBJETIVO.

- Mantener el fotobiorreactor limpio y en condiciones ideales.

### ALCANCE.

- Este procedimiento debe ser adoptado y aplicado por todos los investigadores, estudiantes, docentes, y terceros que desarrollen sus tareas, tanto en forma permanente como temporaria, en el laboratorio.

### NORMAS DE OPERACIÓN.

- Se seguirán las normas generales del laboratorio de la universidad.
- Ninguna persona ajena al Laboratorio o no instruida en su uso deberá manipular el material y equipo de laboratorio.
- Se deberá tener el cuidado necesario para no dañar las piezas.

### MATERIAL Y/O EQUIPO

- Manguera
- Llave española milimétrica de 11 mm
- Navaja
- Material de limpieza
- Equipo de protección personal
- Lija de agua grano medio o No. 80
- Lija de agua No. 1000

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 1 de 11
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial</p> <p><b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p>UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223</p>
---	---	--

## TIEMPO DE LA ACTIVIDAD

Aproximadamente 12 horas. Esto dependerá del conocimiento y habilidad para el mantenimiento.

## DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

### 1.0 Apagado

- 1.1 Se apaga la fuente de aire del fotobiorreactor.
- 1.2 Se apaga la fuente de luz del fotobiorreactor.

### 2.0 Desconectado

- 2.1 Se desconectan las mangueras de los difusores de aire que se encuentran dentro del fluido.

### 3.0 Vaciado (Figura 1)

- 3.1 Se realiza mediante una manguera (previamente esterilizada) utilizando la gravedad, se coloca la manguera dentro del FBR hasta el fondo y el resto de manguera se alza y se llena con agua pasada por osmosis inversa o purificada. Se deja correr algo de agua de la manguera hacia el FBR e inmediatamente se baja la manguera apuntando hacia el contenedor (previamente esterilizado) que albergara las microalgas.

### 4.0 Desmontaje (Figura 2)

Se desmonta el tanque que almacena las microalgas, quitando los tornillos que lo mantienen sujeto con la llave de 11 mm y las bridas de plástico con la navaja. De la siguiente manera:

- 4.1 Se destornillan los tornillos y tuercas de los perfiles de soporte de la parte de en medio y se cortan las bridas de plástico que las sujetan. Lo mismo para el perfil plano de la parte de arriba.

- 4.2 Se sacan las tuercas y tornillos de los costados derechos e izquierdos (empezando de arriba hacia abajo), sin destornillar el último tornillo que sujeta al

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 2 de 11
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 CA II&E <small>UTMIX-CA-37</small> <small>INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</small>
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223

perfil base del tanque.

4.3 Se retiran los tornillos que conforman al perfil base del tanque, sin quitar los tornillos de los costados que sujetan al perfil base del marco de perfiles y se saca de la cabina. (Figura 3)

#### 5.0 Desarmado (Figura 4)

5.1 Se vacía el resto de contenido que quedó dentro del tanque, agregando agua y agitando el tanque para enjuagarlo.

5.2 Se procede a separar las dos caras de acrílico que conforman el tanque utilizando la navaja, pasándola por en medio de la solera de hule-espuma o por un costado de la misma, extremando precaución de no rayar las placas por dentro.

5.3 Se separan las dos tiras de acrílico que unen a las dos placas de ambas caras de la parte de en medio. (Figura 5)

5.4 Se desunen ambas placas que conforma las caras del tanque.

#### 6.0 Limpieza (Figura 6)

6.1 Con la navaja se procede a quitar los excedentes de silicon y de la solera de hule espuma.

6.2 Con una lija del no. 80 se procede a quitar los excedentes del pegamento cristalizado extremando precauciones de no cortarse y de no rayar de más las placas de acrílico (se puede ayudar añadiendo agua en la zona a lijar) las cuales se encuentran delimitadas.

6.3 Con una lija del no. 1000 se procede a pulir el área previamente lijada con una lija de grano medio, para quitar impurezas.

6.4 Con agua y jabón líquido se procede a lavar las placas quitando todos los excedentes de residuos orgánicos.

6.5 Con un paño limpio y una solución de agua con cloro en una relación de 1 ml/L, limpiar nuevamente las placas.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 3 de 11
Mazas Ramos Jesús Alberto			

 	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 UTMX-03-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223

6.6 Secar con otro paño limpio y seco o con una manguera de aire de una compresora para retirar los excedentes que haya dejado el paño húmedo.

6.7 Las mangueras de los difusores de aire se limpian con las mismas soluciones de jabón y cloro que las placas de acrílico, pero se utilizan cepillos usados para lavar popotes o recipientes de forma tubular para eliminar contenido no deseado dentro de las mismas.

6.8 Una vez limpias se dejan secar en un recipiente hasta que se utilicen de nuevo.

6.9 Para limpiar la bomba de aire, se retira el tubo de distribución de aire de las mangueras y se lava con las mismas soluciones de jabón y cloro que las placas de acrílico. Al resto de la bomba se le pasa un paño limpio humedecido con agua y cloro sobre su superficie. Si su inactividad es incierta, se recomienda encenderla cada 15 días por al menos un par de horas hasta que se vuelva a utilizar de manera constante. (Figura 7)

6.10 Los perfiles de metal y la estructura que sujeta al FBR, también se deberán limpiar con un paño limpio y húmedo para retirar el excedente de polvo.

#### 7.0 Mantenimiento luces led.

7.1 Realizar un chequeo de las conexiones de las lámparas y las tiras led para asegurar su buen funcionamiento.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 4 de 11
Mazas Ramos Jesús Alberto			

	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 UTMX-CA-37 <b>INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</b>
<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b>		<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223

## Anexos



*Figura 1.* Vaciado del contenido dentro del FBR.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 5 de 11
Mazas Ramos Jesús Alberto			

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial</p> <p><b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>CA II&amp;E</b> UTMR-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p>
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223</p>



*Figura 2.* Desmontaje del contenedor del microalgas.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 6 de 11
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

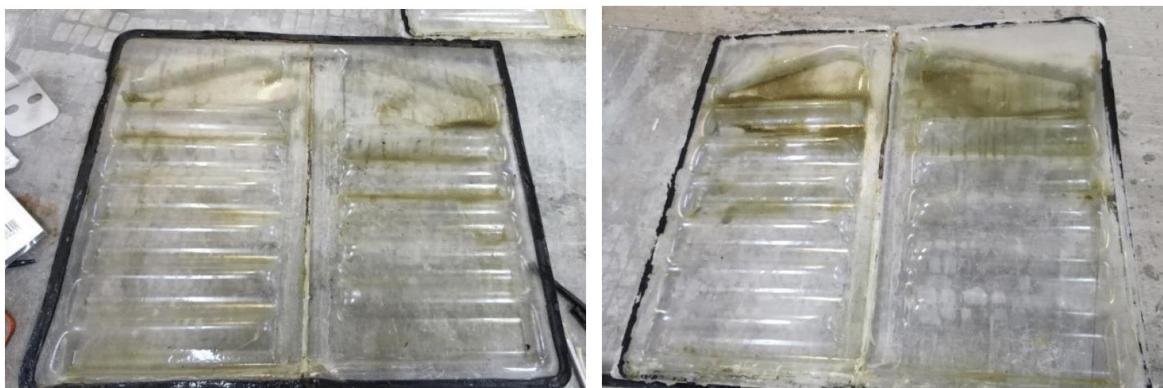
	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p>CA II&amp;E UTM-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223</p>
--	--	--



*Figura 3.* Retiro de los tornillos del perfil base del tanque.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 7 de 11
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

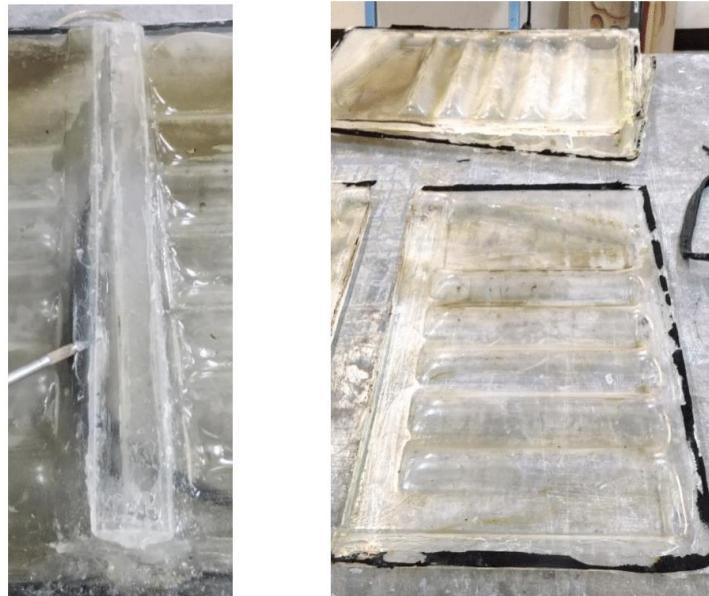
	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p><b>CA</b> <b>II&amp;E</b> UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p>
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223</p>



*Figura 4.* Separación de los paneles con navaja.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 8 de 11
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> <b>Diciembre 2023</b></p> <p><b>Versión: 1</b></p> <p><b>CÓDIGO:</b> <b>P-MF051223</b></p>
---	--	---



*Figura 5.* Separación de las tiras de acrílico que unen las placas centrales en ambas caras.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 9 de 11
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p><b>CA</b> : <b>II&amp;E</b> UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223</p>
---	--	--



*Figura 6.* Proceso de limpieza y preparación de las placas de acrílico

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 10 de 11
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: MANTENIMIENTO DEL FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p>UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MF051223</p>
---	--	--



*Figura 7.* Limpieza y mantenimiento de la bomba de aire.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 11 de 11
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

# Manual de procedimientos para el mantenimiento del molde de MDF

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS:</b> Mantenimiento de molde del FBR</p>	<p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MM051223</p>

## OBJETIVO.

- Preparar de manera adecuada el molde manufacturado de material MDF para su uso en el termoformado de las placas de acrílico que forman parte del fotobiorreactor.

## ALCANCE.

- Este procedimiento debe ser adoptado y aplicado por todos los investigadores, estudiantes, docentes, y terceros que desarrollen sus tareas, tanto en forma permanente como temporaria, en el laboratorio.

## NORMAS DE OPERACIÓN.

- Se seguirán las normas generales del taller de maderas de la universidad.
- Ninguna persona ajena al taller o no instruida en su uso deberá manipular el molde, material y equipo del taller.
- Se deberá tener el cuidado necesario para no dañar los moldes.

## MATERIAL Y/O EQUIPO

- Lijas del No. 220 ó 240, 320 ó 360 y 1000
- 1 Lt sellador de nitrocelulosa (NS-1000\_30)
- Estopa
- Equipo de protección personal
- Pistola p/ pintar de gravedad/pulverizadora
- Diluyente (Thinner)

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 1 de 8
Mazas Ramos Jesús Alberto			

	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 <b>CA II&amp;E</b> <small>UTMIX-CA-31 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</small>
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: Mantenimiento de molde del FBR</b>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MM051223

## TIEMPO DE LA ACTIVIDAD

Aproximadamente 10 horas

## DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

### 1.0 Lijado de los moldes (Figura 2)

**Nota1:** Antes de iniciar con el lijado se deberá limpiar el molde con una estopa húmeda de thinner para retirar el exceso de polvo, suciedad o barniz que este tenga.

**Nota2:** Se exhulta a identificar cada molde que conforman el tanque y las geometrías que las distingue antes de lijarlas.

**Nota3:** Se exhulta a rectificar las medidas establecidas para los moldes de acrílico, las cuales se encuentran en el apartado de anexos.

1.1 Se comienza lijando los moldes con las lijas del número 220 o 240 para retirar el exceso de sellador anterior.

1.2 Se procede a limpiar ambos moldes con thinner, un soplador o una brocha para retirar el exceso de polvo.

### 2.0 Pulido de los moldes

2.1 Para obtener una superficie lisa sin rugosidades se utiliza la lija del número 1000.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 2 de 8
Mazas Ramos Jesús Alberto			

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS:</b> Mantenimiento de molde del FBR</p>	<p><b>CA</b> <b>II&amp;E</b> UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023</p> <p><b>Versión:</b> 1</p> <p><b>CÓDIGO:</b> P-MM051223</p>
--	---	--

### 3.0 Aplicación del sellador de nitrocelulosa (Figura 3)

3.1 Se realiza la mezcla del sellador y el diluyente de la siguiente manera:

Dilución máxima del 200% (2 a 1)

1 medida de sellador x 2 medidas de diluyente, esto debido a la viscosidad del sellador.

Ejemplo: 100 ml de sellador x 200 ml de diluyente

**Nota4:** de ser necesario pedir ayuda al encargado del taller para las cantidades de sellador y thinner que se deben utilizar, para evitar tener una mezcla muy espesa.

**Nota5:** Si se realiza la mezcla del sellador y el diluyente por cuenta propia, al agitar la mezcla con una varita de madera, se puede dar cuenta uno que la mezcla ya está, cuando al alzar la varita con la mezcla este gotea y no genera un hilo.

**Nota6:** la aplicación del sellador también se puede realizar con brocha (brocha fina o pelo de camello), pero, para efectos prácticos y obtener una mayor calidad en la aplicación es recomendable utilizar la pistola de gravedad.

3.2 Se vacía la mezcla en el depósito/vaso de la pistola para pintar, previamente conectada a la compresora.

**Nota7:** obligatorio el uso de la protección de seguridad como cubrebocas o mascarillas, así como lentes de seguridad.

3.3 Se regula la salida del flujo de material con la perilla completamente cerrada y

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 3 de 8
---------------------------------------	---------	-----------	---------------

 	<b>Universidad Tecnológica de la Mixteca</b> <b>Jefatura de Ingeniería Industrial</b> <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 <b>CA</b>  <b>II&amp;E</b> <small>UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</small>
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS:</b> <b>Mantenimiento de molde del FBR</b>	<b>FECHA:</b> <b>Diciembre 2023</b> <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> <b>P-MM051223</b>

se dan dos vueltas y media, el tamaño del abanico (área que se cubre al pintar) se coloca la perilla en el número 3 o hasta que cubra una superficie de 7 a 10 cm. (ver en el apoyo visual)

3.4 Para realizar la aplicación se posiciona la pistola a una distancia de 10 a 15 cm y de forma inclinada 45° aprox de los moldes.

3.5 Se realizan aplicaciones rápidas de izquierda a derecha cubriendo toda la superficie de los moldes, así como de las zonas con ángulos pronunciados, sin volver a pasar en el mismo lugar. Se deja secar de 30 a 40 minutos. (Figura 4)

Para asentar el sellador se realiza una lijada suave o ligera con una lija del número 320 ó 360 ya usada, debido a que el grano de la lija esta algo gastado y solo se busca asentar el sellador (se sabe que está asentado cuando al pasar la lija este desprende un polvo blanquecino y al tacto la madera esta suave). Este proceso se debe repetir al menos dos veces.

3.6 Se realiza una tercer y última aplicación dejando secar por al menos 24 horas antes de manipular.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 4 de 8
---------------------------------------	---------	-----------	---------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS:</b> Mantenimiento de molde del FBR</p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MM051223</p>
---	---	---

## ANEXOS

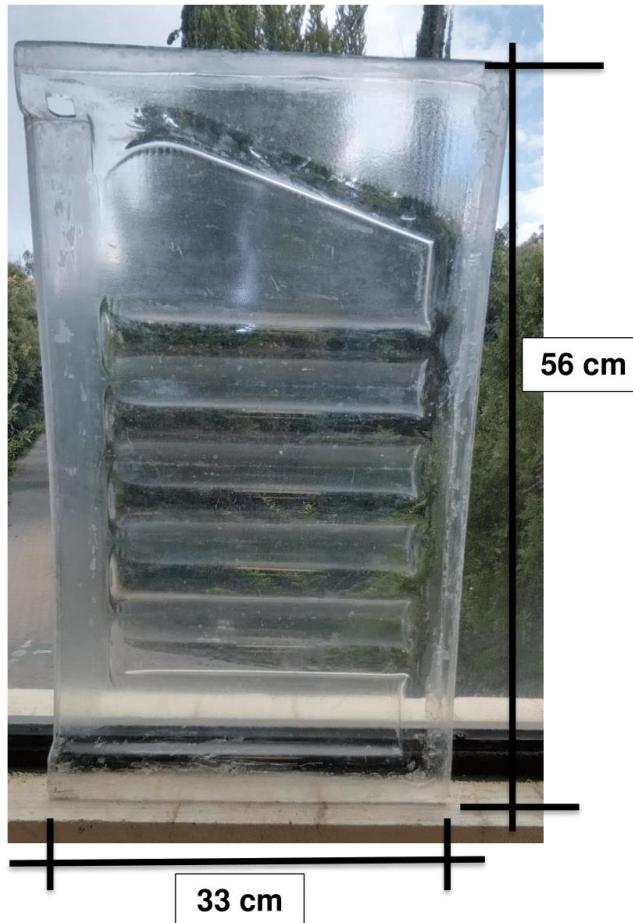


Figura 1. Placa de acrílico termoformada

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 5 de 8
---------------------------------------	---------	-----------	---------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS:</b> Mantenimiento de molde del FBR</p>	 <p>FECHA: Diciembre 2023</p> <p>Versión: 1</p> <p>CÓDIGO: P-MM051223</p>
---	---	--



Figura 2. Lijado de los moldes

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 6 de 8
---------------------------------------	---------	-----------	---------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS:</b> Mantenimiento de molde del FBR</p>	 UTMCA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO  <b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MM051223
--	---	---



Figura 3. Llenado del sellador de nitrocelulosa en el depósito de la pistola de gravedad.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 7 de 8
---------------------------------------	---------	-----------	---------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS:</b> Mantenimiento de molde del FBR</p>	 UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO
		<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-MM051223



Figura 4. Aplicación del sellador de nitrocelulosa

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 8 de 8
---------------------------------------	---------	-----------	---------------

# Manual de procedimientos para el termoformado de una placa de acrílico

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	<p>FECHA: Diciembre 2023 Versión: 1 CÓDIGO: P-TA051223</p>

## TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO

### OBJETIVO.

- Termoformar de manera correcta las placas de acrílico que forman parte del fotobiorreactor.

### ALCANCE.

- Este procedimiento debe ser adoptado y aplicado por todos los investigadores, estudiantes, docentes, y terceros que desarrollen sus tareas, tanto en forma permanente como temporaria, en el laboratorio.

### NORMAS DE OPERACIÓN.

- Se seguirán las normas generales del Laboratorio de Manufactura Avanzada de la universidad.
- Ninguna persona ajena al taller/laboratorio o no instruida en su uso deberá manipular el molde, material y equipo del taller/laboratorio.
- Se deberá tener el cuidado necesario para no dañar los moldes, la maquinaria y las herramientas que se utilicen.

### MATERIAL Y/O EQUIPO

- Placas de acrílico
- Plumón indeleble
- Cera desmoldante
- Termoformadora
- Guantes de asbesto, de carnaza o resistentes al calor.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 1 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223</p>
---	---	---

- Molde de MDF a trabajar
- Flexómetro
- Cortador de acrílico
- Guía/tira de madera (de preferencia de un metro de longitud)
- Lija de agua del número 320
- Agua (de preferencia caliente o 50 °C aprox)
- Paño o trapo de algodón
- Desengrasante

#### TIEMPO DE LA ACTIVIDAD

Aproximadamente 12 horas, esto dependerá del conocimiento y habilidad para realizar este procedimiento.

#### DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

##### 1.0 Corte de las placas de acrílico

**Nota1: Este paso debe realizarse en un espacio amplio para manipular la placa de acrílico.**

**Nota2: No retirar el plástico protector de la placa.**

1.1 Con ayuda de un flexómetro o un metro, marcar las dimensiones de 82 cm de largo y 60 cm de ancho

1.2 Se procede a cortar placas de 60x82 cm, con ayuda de un cortador de acrílico y una tira de madera de al menos un metro.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 2 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 <b>CA</b> <b>II&amp;E</b> <small>RTIBR-09-32</small> <small>INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</small>
	<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b>	<b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223

## 2.0 Termoformado

**Nota3:** Antes de utilizar la termoformadora se deberá encender la compresora al menos 5 minutos antes y se deberá revisar que las válvulas de aire estén abiertas.

2.1 Se enciende el switch general y se colocan las perillas de la parrilla de la termoformadora en los números indicados en el anexo, para llegar a una temperatura de entre 100 y 120°C.

2.2 Se carga la bomba de aire de la termoformadora girando la perilla correspondiente a forma manual, se deberá cargar entre 50 y 60 cm-Hg ó 20 y 24 pulg-Hg y se deberá apagar al llegar a esos valores.

**Nota4:** Mientras se carga la bomba de aire y se deja precalentar las resistencias de la termoformadora realizar el punto 2.3.

2.3 Aplicar la cera desmoldante de manera uniforme a los moldes que se utilizaran para termoformar y dejar secar por 10 minutos.

2.4 Para colocar el primer molde, se sube la platina de la termoformadora (botón color verde), se centra según las dimensiones del molde y del área de trabajo; y se baja la platina.

2.5 Se retira el plástico protector de la placa de acrílico y se coloca en la termoformadora respetando las dimensiones del área de trabajo, se asegura la prensa de la termoformadora.

**Nota5:** Las dimensiones del área de trabajo se encuentran en el anexo.

2.6 Se gira la perilla de inicio de ciclo a modo manual y se inicia el ciclo de trabajo con el botón de color amarillo.

2.7 La parrilla deberá avanzar y se dejará calentar la placa de acrílico al menos

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 3 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 FECHA: Diciembre 2023 Versión: 1 CÓDIGO: P-TA051223
<b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b>		

por 3 minutos.

**Nota6:** Se puede ir retirando la parrilla en periodos cortos de tiempo para verificar el cambio estructural del acrílico, el acrílico formará un domo hacia abajo y se tornará flexible. De no presentar dichos cambios se deberá dejar al menos un par de minutos más calentando la placa, evitando que se sobrecaliente y comience a burbujejar el acrílico.

**Nota7:** en caso de sobrecalentamiento, retirar la parrilla lo más rápido posible para evitar que se incendie la placa de acrílico.

2.8 Consiguiendo las características que se buscan en la placa de acrílico al calentarla, se retira la parrilla y se hace subir la platina con el molde.

2.9 Al llegar a su tope la platina con el molde se activa el botón de vacío (botón color negro) por al menos 1 minuto. De ser necesario, se apoyará con el guante o un cartón para dar forma a la placa en las zonas con ángulos pronunciados.

2.10 Se desactiva el vacío y se enciende la ventilación (blíster/ botón color azul) por al menos dos periodos de 15 segundos. En cada periodo se debe revisar la dureza que va recobrando el acrílico.

2.11 Tras recuperar la dureza suficiente se activa el botón de desmolde (botón color blanco) para despegar el molde de mdf de la placa de acrílico. De ser necesario, se puede bajar la platina para apoyar al desmolde.

2.12 Se activa nuevamente el blíster para que la temperatura de la placa baje lo suficientemente soportable al tacto y poder retirarla del área de trabajo para dejarla enfriar a temperatura ambiente.

### 3.0 Corte de la geometría final.

3.1 Se marcan las líneas en donde se cortará la figura del tanque de la placa termoformada. Dejando ciertas tolerancias.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 4 de 13
Mazas Ramos Jesús Alberto			

 	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial</p> <p><b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	 <b>FECHA:</b> <b>Diciembre 2023</b> <b>Versión:</b> 1
		<b>CÓDIGO:</b> <b>P-TA051223</b>

3.2 Se realiza el corte de las figuras.

3.3 Para quitar de los bordes el filo o sobrantes que no se lograron retirar con el cortador de acrílico, se utilizará una lija.

#### 4.0 Limpieza de las figuras.

4.1 Para retirar el exceso de cera que se quedó pegada a la figura de acrílico, bastará con lavar las figuras con agua y desengrasante, tallando con un trapo de algodón para evitar rayaduras al interior de la pieza.

4.2 Se retira el exceso de agua con un trapo seco y se deja al exterior en la sombra para que se termine de secar.

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:
Mazas Ramos Jesús Alberto		Página 5 de 13

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	 <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223</p>
---	---	---

## ANEXOS

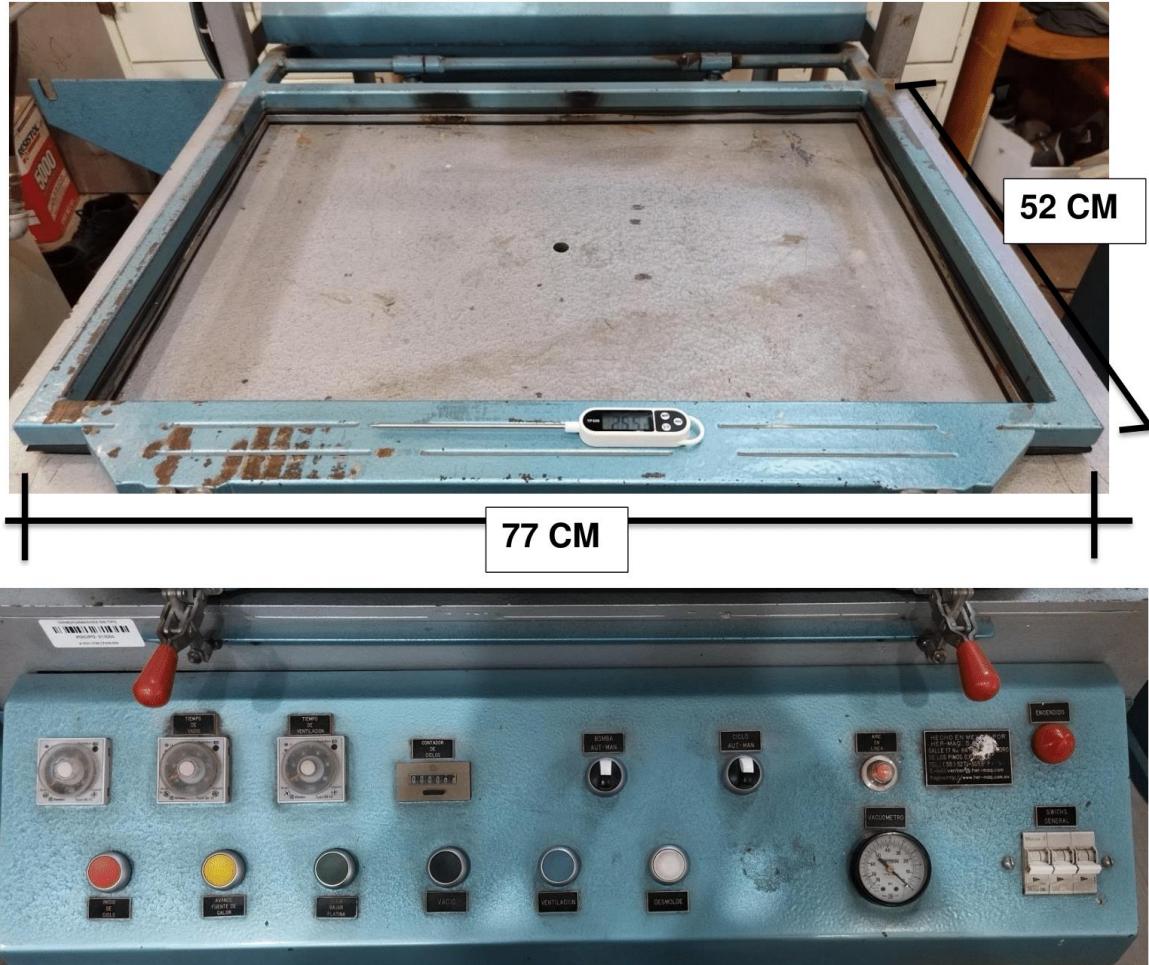


Figura 1. Área de trabajo de la termoformadora

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 6 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

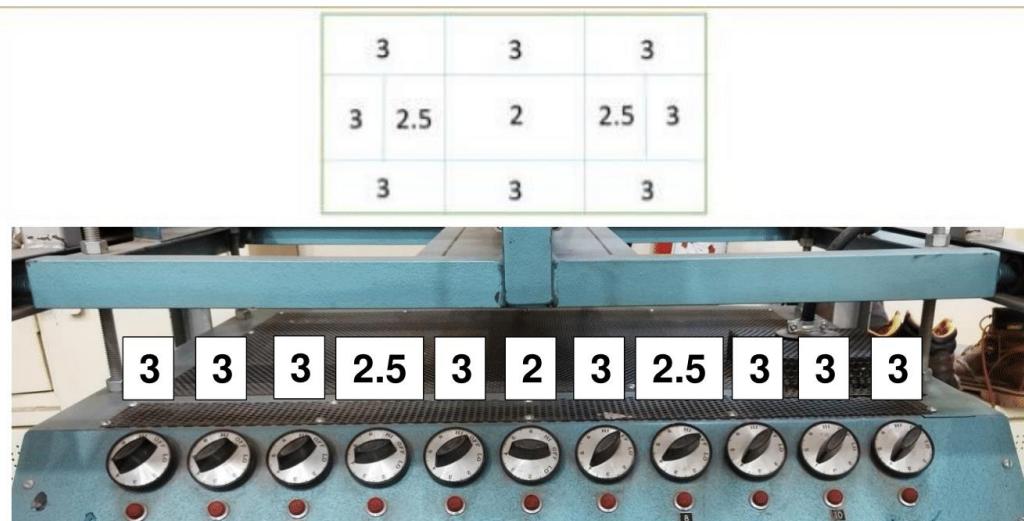
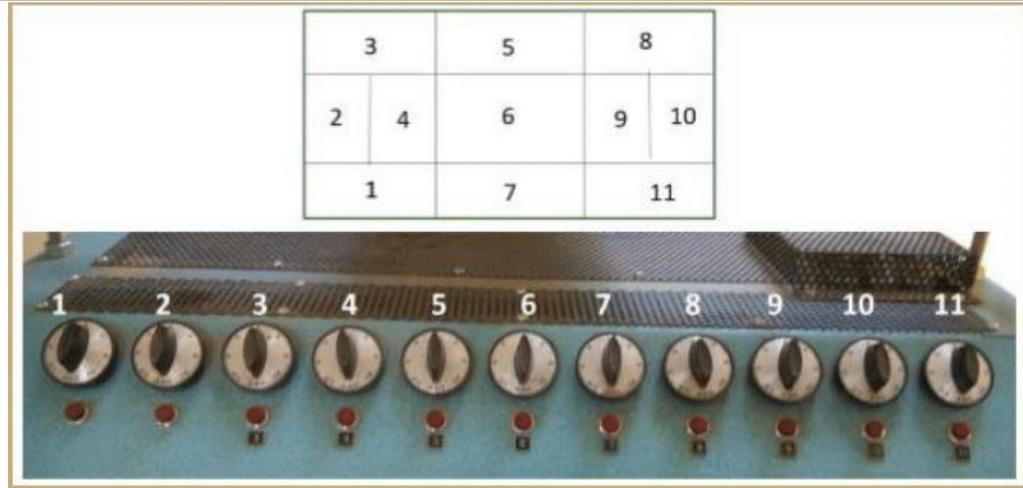
	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	<p>CA II&amp;E UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p>
	<p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	<p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223</p>



Figura 2. Medición y corte de las placas de acrílico.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 7 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b>	 <b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223
---	---	---



*Figura 3. Parrilla de calentamiento de la termoformadora y su mapa de distribución de las resistencias eléctricas de la misma.*

Elaboró:	Revisó:	Autorizó:	Página 8 de 13
Mazas Ramos Jesús Alberto			

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	 <p><b>CA II&amp;E</b> UTMX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223</p>
---	---	--



Figura 4. Switch general y perilla de encendido de la bomba de aire.



Figura 5. Manómetro de la termoformadora.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 9 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	 <p>UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223</p>
---	---	--



Figura 6. Lata de cera desmoldante



Figura 7. Colocación y centrado del molde en la termoformadora.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 10 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	 <p><b>CA</b> <b>II&amp;E</b> UTMIX-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223</p>
---	---	--

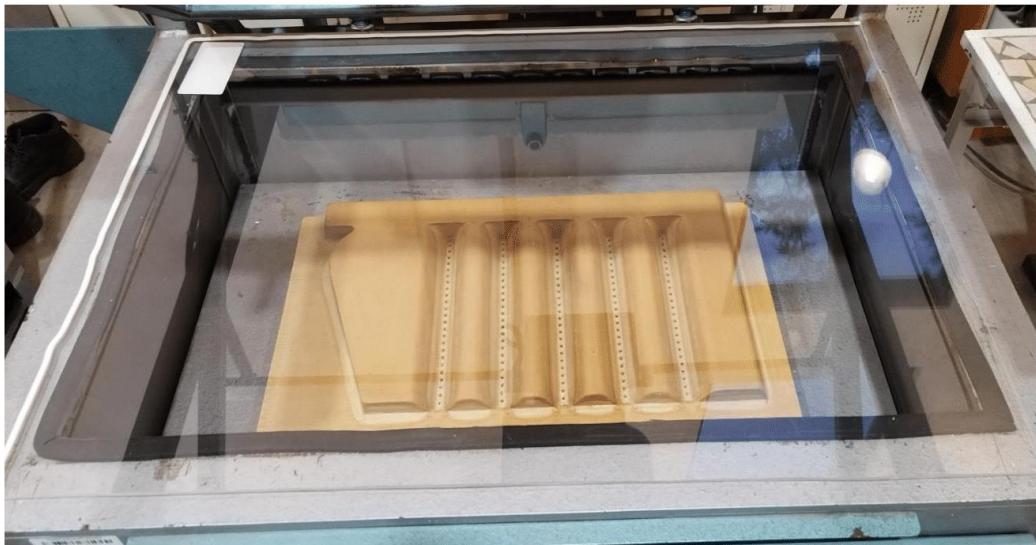


Figura 8. Colocación de la placa de acrílico en la termoformadora, respetando las dimensiones del área de trabajo.



Figura 9. Perilla de inicio de ciclo en modo manual.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 11 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial <b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p> <p><b>MANUAL DE PROCEDIMIENTOS: TERMOFORMADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO</b></p>	 <p><b>CA II&amp;E</b> UTM-CA-37 INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ENTORNO</p> <p><b>FECHA:</b> Diciembre 2023 <b>Versión:</b> 1 <b>CÓDIGO:</b> P-TA051223</p>
---	---	---

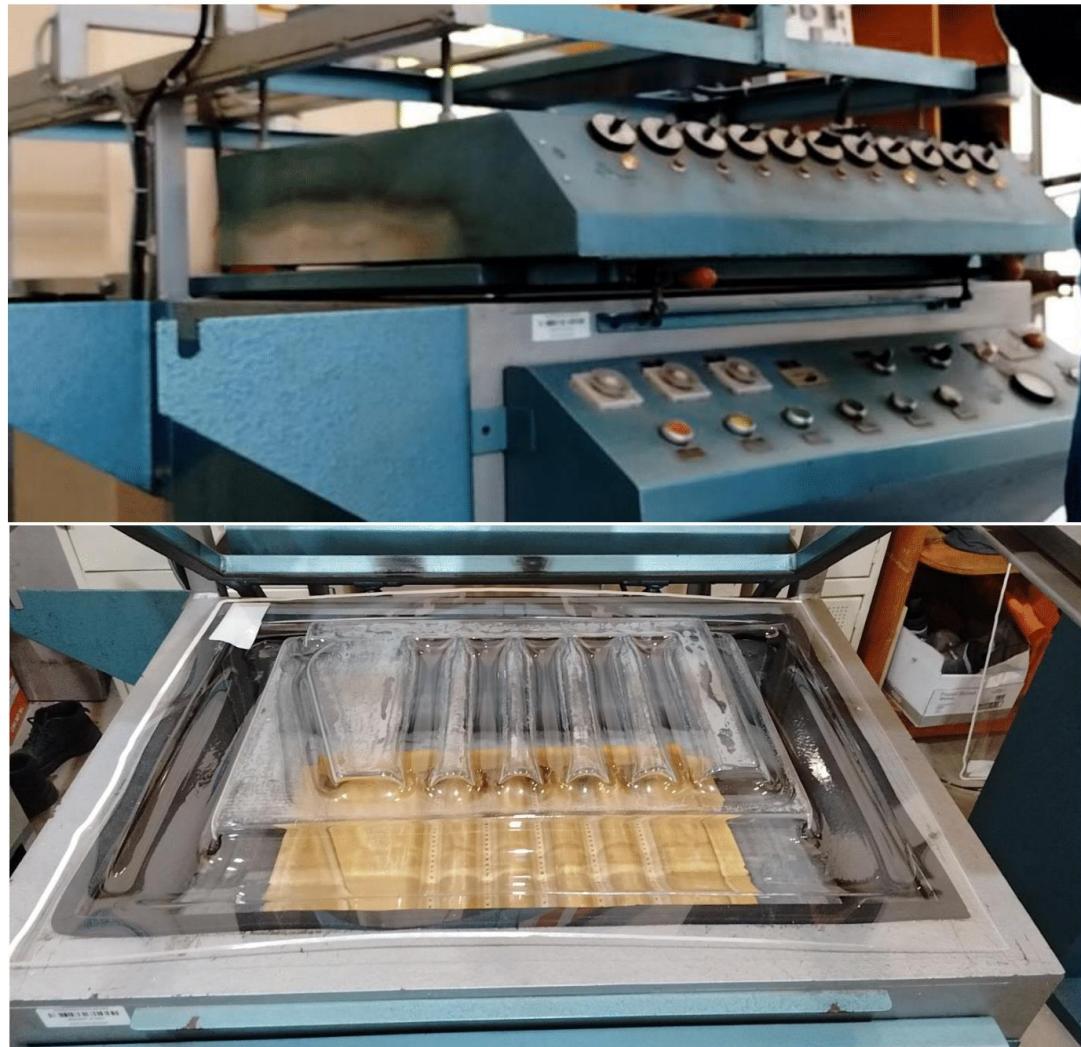


Figura 10. Secuencia de termoformado de la placa de acrílico.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 12 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

 	<p>Universidad Tecnológica de la Mixteca Jefatura de Ingeniería Industrial</p> <p><b>CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTOR</b></p>	 <p>FECHA: Diciembre 2023</p> <p>Versión: 1</p> <p>CÓDIGO: P-TA051223</p>
---	---	--

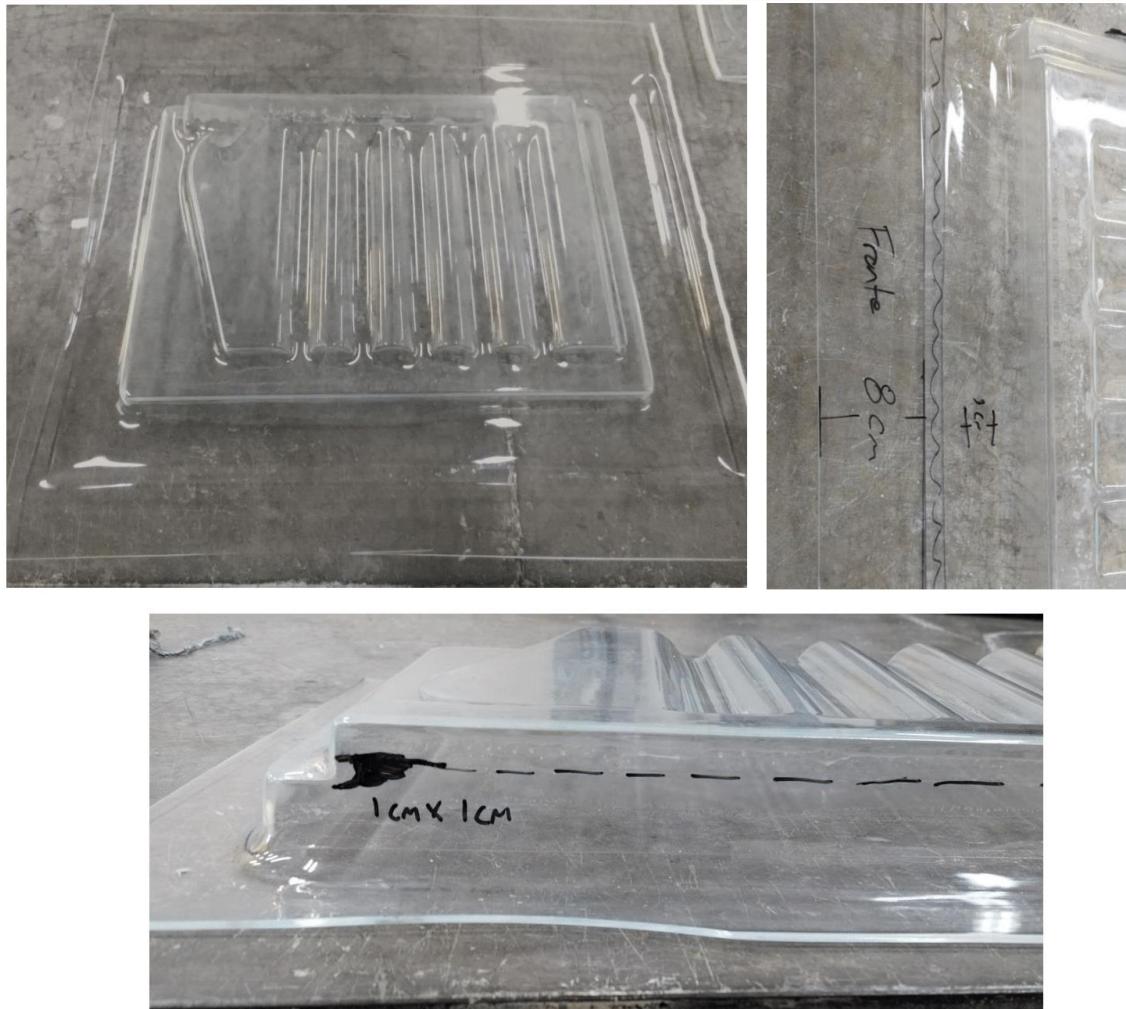


Figura 11. Corte de la geometría final.

Elaboró: Mazas Ramos Jesús Alberto	Revisó:	Autorizó:	Página 13 de 13
---------------------------------------	---------	-----------	-----------------

## ANEXO E. DIAGRAMAS DE FLUJO

Diagrama de flujo desmontaje, montaje y puesta en marcha (Proceso estructural completo)

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO								
Descripción de la actividad	Símbolo					Tiempo (min)	Distancia (m)	Observaciones
	●	→	D	█	▽			
<b>Etapa de desmontaje</b>								
Apagar luces y fuente de aire	●					3		
Desconectar mangueras, difusores de aire y sensores que se encuentran dentro del fluido	●					3		
Retirar tapón de gasa y algodón del orificio principal del tanque del FBR	●					1		
Vaciar contenido dentro del tanque del FBR con una manguera y se vierte a un deposito ambos previamente esterilizados	●					10		
Cortar las bridas y desatornillar los perfiles que sujetan el tanque del FBR	●					25		
Trasladar tanque del FBR al exterior		→				3	30	
Vaciar el contenido restante	●					3		
Enjuagar tanque del FBR	●					4		
Trasladar tanque del FBR, navaja, paño limpio, lijas a mesa de trabajo		→				4	50	
Separar caras de acrílico que conforman el tanque del FBR	●					8		
Separar tiras de acrílico de la parte de enmedio	●					5		
Quitar excedentes de silicon y de solera de hule espuma a navaja	●					120		
Quitar excedentes de pegamento cristalizado con una lija	●					120		
Pulir las orillas de cada placa con lija	●					120		
Trasladar caras o placas de acrílico al área de lavado		→				2	3	
Lavar caras o placas de acrílico con agua y jabón	●					30		
Limpiar caras o placas de acrílico con un paño y agua con cloro	●					15		
Secar caras o placas de acrílico con paño limpio	●					8		
Trasladar caras o placas de acrílico a LBI		→				4	80	

Trasladar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire al área de lavado		➡				5	30	
Limpiar y desinfectar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire	●					30		
Trasladar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire al LBI		➡				5	30	
Inspeccionar compresor de aire				■		10		
Inspeccionar conexiones eléctricas, cableado de lámparas o tiras led y de las propias lámparas o tiras led				■		20		
Inspeccionar estructura del FBR				■		8		
Inspeccionar perfiles de metal del FBR				■		8		
Inspeccionar tornillos y tuercas				■		8		
<b>Etapa de montaje y puesta en marcha</b>								
Trasladar caras o placas de acrílico de acrílico del tanque del FBR, tiras de acrílico, tira de hule espuma, pegamento cianocrilato, silicon acético, prensas C, tiras de madera, paño limpio, guantes, cubrebocas, lentes de protección a la mesa de trabajo.		➡				5	80	
Limpiar caras o placas de acrílico y tiras de acrílico con paño limpio y seco	●					15		
Unir ambos pares de caras o placas de acrílico que conforman el tanque del FBR por la parte central con silicon y apoyándose de las tiras de madera y las prensas C.	●					22		
Dejar secar el silicon			■			720		
Pegar tiras de acrílico en la parte central de la cara exterior del tanque del FBR	●					18		
Dejar secar el silicon			■			1440		
Adhesión de la solera de hule-espuma con el pegamento de cianocrilato a una de las caras del tanque del FBR	●					22		
Colocar mangueras y difusores de aire	●					5		
Adhesión de la otra cara del tanque del FBR colocando cianocrilato por todo el contorno de la misma y uniéndola con la cara que tiene la solera	●					9		
Prensar ambas caras con las prensas C y una tiras de madera por todo el contorno del tanque del FBR	●					6		

Dejar secar el pegamento			D		1440		
Sellar contornos con pegamento de cianocrilato para evitar futuras fugas de agua	●				8		
Dejar secar el pegamento			D		1440		
Trasladar tanque del FBR al exterior		➡			5	30	
Inspeccionar posibles fugas de agua			■		20		
Trasladar tanque del FBR a la mesa de trabajo		➡			5	80	
Sellar tanque del FBR colocando silicon acético en los contornos	●				10		
Dejar secar el silicon			D		1440		
Trasladar a LBI		➡			5	80	
Montar tanque del FBR en los perfiles de metal y en la estructura del FBR	●				50		
Llenar tanque del FBR con agua	●				8		
Probar resistencia de la estructura a la presión de agua			■		4320		
Agregar cloro al tanque del FBR	●				5		
Desinfectar tanque de FBR	●				240		
Vaciar el tanque del FBR	●				10		
Llenar el tanque del FBR con agua potable	●				8		
Encender bomba de aire y dejar trabajando	●				120		
Apagar la bomba de aire	●				2		
Vaciar el tanque del FBR	●				10		
Esterilizar zona del orificio principal con un mechero.	●				3		
Llenar el tanque del FBR con agua potable hasta la primer ondulación	●				6		
Vertir el inóculo (microalgas) junto con la dilución del medio (fertilizante y agua)	●				5		
Cubrir orificio principal con un algodón envuelto en un gasa	●				2		
Homogeneizar y atemperar el inóculo dentro del tanque del FBR			D		2880		
Agregar nuevo medio (fertilizante y agua)	●				5		
Encender bomba de aire y dejar trabajando	●				2880		
Continuar con la escala de microalgas conforme al plan de producción	●						

Diagrama de flujo mantenimiento molde de MDF, corte placas de acrílico y proceso de termoformado.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO								
Descripción de la actividad	Símbolo					Tiempo (min)	Distancia (m)	Observaciones
	●	→	○	■	▽			
<b>Mantenimiento previo del molde</b>								
Trasladar molde a mesa de trabajo		→				5	80	
Identificar geometrias de cada molde				■		6		
Retificar medidas de los moldes				■		10		
Limpiar moldes con estopa húmeda de thinner	●					8		
Lijar moldes con lijas no. 220	●					150		
Limpiar exceso de polvo	●					10		
Pulir con lija no. 1000	●					150		
Limpiar exceso de polvo	●					10		
Trasladar moldes a mesa de trabajo exterior		→				4	5	
Mezclar sellador de nitrocelulosa con diluyente	●					6		
Conectar pistola de gravedad a compresor de aire	●					2		
Vaciar mezcla en pistola de gravedad	●					2		
Regular salida del flujo de la mezcla	●					2		
*Aplicar mezcla al molde	●					10		
Dejar secar mezcla			○			30		
Asentar sellador con lija no. 320 ya usada	●					15		
Limpiar exceso de polvo	●					8		
*Repetir pasos para aplicar el sellador dos veces más								
Trasladar los moldes al lugar designado como almacen		→				5	80	
Dejar secar mezcla			○			1440		Así lo especifica las instrucciones del producto utilizado

<b>Corte de placas de acrílico</b>								
Trasladar lamina de acrílico a mesa de trabajo		➡				5	50	
Limpiar exceso de polvo	●					8		
Medir y marcar dimensiones requeridas para el termoformado	●					10		
Cortar las placas de acrílico	●					25		
Trasladar las placas y el resto de la lámina al lugar designado como almacen		➡				10		
<b>Termoformado</b>								
Trasladar las placas de acrílico, el molde y demás herramientas al lugar de trabajo		➡				8	100	
Encerar moldes con la cera desmoldante	●					10		
Encender switch general de la termoformadora	●					2		
Colocar perillas de la parrilla de la termoformadora en los números designados y estabilizar temperatura	●					10		
Encender compresora de aire	●					2		
Cargar la bomba de aire de la termoformadora	●					5		
Colocar primer molde en la platina de la termoformadora	●					2		
Colocar primer placa de acrílico	●					3		
Iniciar termoformado	●					8		
Retirar placa termoformada	●					1		
Cargar por segunda vez bomba de aire	●					5		
Colocar segunda placa de acrílico	●					3		
Iniciar segundo termoformado	●					8		
Retirar segunda placa termoformada	●					1		
Retirar primer molde de la platina	●					2		
Colocar segundo molde en la platina de la termoformadora	●					2		
Cargar por tercera vez bomba de aire	●					5		

Colocar tercer placa de acrilico	●					3		
Iniciar tercer termoformado	●					8		
Retirar tercer placa termoformada	●					1		
Cargar por cuarta vez bomba de aire	●					5		
Colocar cuarta placa de acrilico	●					3		
Iniciar cuarto termoformado	●					8		
Retirar cuarta placa termoformada	●					1		
Retirar segundo molde de la platina	●					2		
Apagar switch de la termofabricadora	●					1		
Trasladar placas termoformadas a la mesa de trabajo		➡				2	4	
Cortar excesos de la placa para obtener la geometría final	●					720		Debido a que el corte se realizó manualmente
Limpiar placa para retirar los excesos de la cera	●					25		
Realizar orificios en la placa que forman parte de la geometría final	●					15		

Diagrama de flujo desmontaje, montaje y puesta en marcha (Proceso parcial entre ciclos de operación)

Descripción de la actividad	Símbolo					Tiempo (min)	Distancia (m)	Observaciones
	●	➡	D	█	▽			
<b>Etapa de desmontaje</b>								
Apagar luces y fuente de aire	●					3		
Desconectar mangueras, difusores de aire y sensores que se encuentran dentro del fluido	●					3		
Retirar tapón de gasa y algodón del orificio principal del tanque del FBR	●					1		
Vaciar contenido dentro del tanque del FBR con una manguera y se vierte a un deposito ambos previamente esterilizados	●					10		
Cortar las bridas y desatornillar los perfiles que sujetan el tanque del FBR	●					25		
Trasladar tanque del FBR al exterior		➡				3	30	
Vaciar el contenido restante	●					3		
Lavar con agua y jabón el tanque	●					20		
Enjuagar tanque del FBR	●					5		
Dejar el tanque del FBR al exterior en sombra y boca abajo para que se seque	●					45		
Trasladar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire al área de lavado		➡				5	30	

Limpiar y desinfectar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire	●					30		
Trasladar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire al LBI		➡				5	30	
Inspeccionar compresor de aire			■			10		
Inspeccionar conexiones eléctricas, cableado de lámparas o tiras led y de las propias lámparas o tiras led			■			20		
Inspeccionar estructura del FBR			■			8		
Inspeccionar perfiles de metal del FBR			■			8		
Inspeccionar tornillos y tuercas			■			8		
<b>Etapa de montaje y puesta en marcha</b>								
del FBR, mangueras, difusores de aire, silicon acético, tiras de madera, paño limpio, guantes, cubrebocas, lentes de protección a la mesa de trabajo.		➡				5	80	
Colocar mangueras y difusores de aire	●					5		
Trasladar tanque del FBR al exterior		➡				5	30	
Inspeccionar posibles fugas de agua			■			20		
Trasladar tanque del FBR a la mesa de trabajo		➡				5	80	
Inspeccionar el sellado del tanque en los contornos			■			10		
Colocar silicon acético en los contornos, en caso de requerirlo	●					20		
Dejar secar el silicon			■			1440		

Trasladar a LBI		→					5	80	
Montar tanque del FBR en los perfiles de metal y en la estructura del FBR	●						50		
Llenar tanque del FBR con agua	●						8		
Probar resistencia de la estructura a la presión de agua				■			1440		
Agregar cloro al tanque del FBR	●						5		
Desinfectar tanque de FBR	●						120		
Vaciar el tanque del FBR	●						10		
Llenar el tanque del FBR con agua potable	●						8		
Encender bomba de aire y dejar trabajando	●						120		
Apagar la bomba de aire	●						2		
Vaciar el tanque del FBR	●						10		
Esterilizar zona del orificio principal con un mechero.	●						3		
Llenar el tanque del FBR con agua potable hasta la primer ondulación	●						6		
Vertir el inóculo (microalgas) junto con la dilución del medio (fertilizante y agua)	●						5		
Cubrir orificio principal con un algodón envuelto en un gasa	●						2		
Homogeneizar y atemperar el inóculo dentro del tanque del FBR			■				2880		
Agregar nuevo medio (fertilizante y agua)	●						5		
Encender bomba de aire y dejar trabajando	●						2880		
Continuar con la escala de microalgas conforme al plan de producción	●								

## ANEXO F. TABLAS DE TIEMPO

Mantenimiento estructural completo del fotobiorreactor

Desmontaje

ETAPA DE DESMONTAJE		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Apagar luces y fuente de aire	3	3
Desconectar mangueras, difusores de aire y sensores que se encuentran dentro del fluido	3	6
Retirar tapón de gasa y algodón del orificio principal del tanque del FBR	1	7
Vaciar contenido dentro del tanque del FBR con una manguera y se vierte a un deposito ambos previamente esterilizados	10	17
Cortar las bridas y desatornillar los perfiles que sujetan el tanque del FBR	25	42
Trasladar tanque del FBR al exterior	3	45
Vaciar el contenido restante	3	48
Enjuagar tanque del FBR	4	52
Trasladar tanque del FBR, navaja, paño limpio, lijas a mesa de trabajo	4	56
Separar caras de acrílico que conforman el tanque del FBR	8	64
Separar tiras de acrílico de la parte de enmedio	5	69

Quitar excedentes de silicon y de solera de hule espuma a navaja	120	189
Quitar excedentes de pegamento cristalizado con una lija	120	309
Pulir las orillas de cada placa con lija	120	429
Trasladar caras o placas de acrílico al área de lavado	2	431
Lavar caras o placas de acrílico con agua y jabón	30	461
Limpiar caras o placas de acrílico con un paño y agua con cloro	15	476
Secar caras o placas de acrílico con paño limpio	8	484
Trasladar caras o placas de acrílico a LBI	4	488
Trasladar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire al área de lavado	5	493
Limpiar y desinfectar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire	30	523
Trasladar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire al LBI	5	528
Inspeccionar compresor de aire	10	538
Inspeccionar conexiones electricas, cableado de lámparas o tiras led y de las propias lámparas o tiras led	20	558
Inspeccionar estructura del FBR	8	566
Inspeccionar perfiles de metal del FBR	8	574
Inspeccionar tornillos y tuercas	8	582
<b>TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)</b>	<b>9 horas y 42 minutos</b>	

## Montaje

ETAPA DE MONTAJE		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Trasladar caras o placas de acrílico de acrílico del tanque del FBR, tiras de acrílico, tira de hule espuma, pegamento cianocrilato, silicón acético, prensas C, tiras de madera, paño limpio, guantes, cubrebocas, lentes de protección a la mesa de trabajo.	5	5
Limpiar caras o placas de acrílico y tiras de acrílico con paño limpio y seco	15	20
Unir ambos pares de caras o placas de acrílico que conforman el tanque del FBR por la parte central con silicón y apoyándose de las tiras de madera y las prensas C.	22	42
Dejar secar el silicón	720	762
Pegar tiras de acrílico en la parte central de la cara exterior del tanque del FBR	18	780
Dejar secar el silicón	1440	2220
Adhesión de la solera de hule-espuma con el pegamento de cianocrilato a una de las caras del tanque del FBR	22	2242

Colocar mangueras y difusores de aire	5	2247
Adhesión de la otra cara del tanque del FBR colocando cianocrilato por todo el contorno de la misma y uniéndola con la cara que tiene la solera	9	2256
Prensar ambas caras con las prensas C y una tiras de madera por todo el contorno del tanque del FBR	6	2262
Dejar secar el pegamento	1440	3702
Sellar contornos con pegamento de cianocrilato para evitar futuras fugas de agua	8	3710
Dejar secar el pegamento	1440	5150
Trasladar tanque del FBR al exterior	5	5155
Inspeccionar posibles fugas de agua	20	5175
Trasladar tanque del FBR a la mesa de trabajo	5	5180
Sellar tanque del FBR colocando silicón acético en los contornos	10	5190
Dejar secar el silicón	1440	6630
Trasladar a LBI	5	6635
Montar tanque del FBR en los perfiles de metal y en la estructura del FBR	50	6685
TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)		111 HORAS Y 25 MINUTOS

## Puesta en marcha

ETAPA DE PUESTA EN MARCHA		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Llenar tanque del FBR con agua	8	8
Probar resistencia de la estructura a la presión de agua	4320	4328
Agregar cloro al tanque del FBR	5	4333
Desinfectar tanque de FBR	120	4453
Vaciar el tanque del FBR	10	4463
Llenar el tanque del FBR con agua potable	8	4471
Encender bomba de aire y dejar trabajando	120	4591
Apagar la bomba de aire	2	4593
Vaciar el tanque del FBR	10	4603
Esterilizar zona del orificio principal con un mechero.	3	4606
Llenar el tanque del FBR con agua potable hasta la primer ondulación	6	4612
Vertir el inóculo (microalgas) junto con la dilución del medio (fertilizante y agua)	5	4617
Cubrir orificio principal con un algodón envuelto en un gasa	2	4619
Homogeneizar y atemperar el inóculo dentro del tanque del FBR	2880	7499
Agregar nuevo medio (fertilizante y agua)	5	7504
TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)		125 HORAS y 4 MINUTOS

## Mantenimiento previo al molde de MDF

ETAPA DE MANTENIMIENTO PREVIO AL MOLDE DE MDF		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Trasladar molde a mesa de trabajo	5	5
Identificar geometrias de cada molde	6	11
Retificar medidas de los moldes	10	21
Limpiar moldes con estopa húmeda de thinner	8	29
Lijar moldes con lijas no. 220	150	179
Limpiar exceso de polvo	10	189
Pulir con lija no. 1000	150	339
Limpiar exceso de polvo	10	349
Trasladar moldes a mesa de trabajo exterior	4	353
Mezclar sellador de nitrocelulosa con diluyente	6	359
Conectar pistola de gravedad a compresor de aire	2	361
Vaciar mezcla en pistola de gravedad	2	363
Regular salida del flujo de la mezcla	2	365
*Aplicar mezcla al molde	10	375
Dejar secar mezcla	30	405

Asentar sellador con lija no. 320 ya usada	15	420
Limpiar exceso de polvo	8	428
*LOS PASOS DE LA APLICACIÓN DE LA MEZCLA AL MOLDE SE REPETIRÁN DOS VECES MÁS	63	491
Trasladar los moldes al lugar designado como almacén	5	496
Dejar secar mezcla	1440	1936
TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)		32 HORAS Y 16 MINUTOS

ETAPA DE CORTE DE LAS PLACAS DE ACRÍLICO (FORMA MANUAL)		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Trasladar lamina de acrílico a mesa de trabajo	5	5
Limpiar exceso de polvo	8	13
Medir y marcar dimensiones requeridas para el termoformado	10	23
Cortar las placas de acrílico	25	48
Trasladar las placas y el resto de la lámina al lugar designado como almacén	10	58
TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)		58 MINUTOS

## Termoformado

ETAPA DE TERMOFORMADO		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Trasladar las placas de acrílico, el molde y demás herramientas al lugar de trabajo	8	8
Encerar moldes con la cera desmoldante	10	18
Encender switch general de la termoformadora	2	20
Colocar perillas de la parrilla de la termoformadora en los números designados y estabilizar temperatura	10	30
Encender compresora de aire	2	32
Cargar la bomba de aire de la termoformadora	5	37
Colocar primer molde en la platina de la termoformadora	2	39
Colocar primer placa de acrílico	3	42
Iniciar termoformado	8	50
Retirar placa termoformada	1	51
Cargar por segunda vez bomba de aire	5	56
Colocar segunda placa de acrílico	3	59
Iniciar segundo termoformado	8	67
Retirar segunda placa termoformada	1	68
Retirar primer molde de la platina	2	70

Colocar segundo molde en la platina de la termoformadora	2	72
Cargar por tercera vez bomba de aire	5	77
Colocar tercer placa de acrilico	3	80
Iniciar tercer termoformado	8	88
Retirar tercer placa termoformada	1	89
Cargar por cuarta vez bomba de aire	5	94
Colocar cuarta placa de acrílico	3	97
Iniciar cuarto termoformado	8	105
Retirar cuarta placa termoformada	1	106
Retirar segundo molde de la platina	2	108
Apagar switch de la termoformadora	1	109
Trasladar placas termoformadas a la mesa de trabajo	2	111
Cortar excesos de la placa para obtener la geometría final	720	831
Limpiar placa para retirar los excesos de la cera	25	856
Realizar orificios en la placa que forman parte de la geometría final	15	871
<b>TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)</b>		<b>14 horas y 31 minutos</b>

Tiempos registrados de actividades puntuales durante el mantenimiento entre ciclos de operación del fotobiorreactor

### Desmontaje

ETAPA DE DESMONTAJE		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Apagar luces y fuente de aire	3	3
Desconectar mangueras, difusores de aire y sensores que se encuentran dentro del fluido	3	6
Retirar tapón de gasa y algodón del orificio principal del tanque del FBR	1	7
Vaciar contenido dentro del tanque del FBR con una manguera y se vierte a un deposito ambos previamente esterilizados	10	17
Cortar las bridas y desatornillar los perfiles que sujetan el tanque del FBR	25	42
Trasladar tanque del FBR al exterior	3	45
Vaciar el contenido restante	3	48
Lavar con agua y jabón el tanque	20	68
Enjuagar tanque del FBR	5	73
Dejar el tanque del FBR al exterior en sombra y boca abajo para que se seque	45	118
Trasladar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire al área de lavado	5	123

Limpiar y desinfectar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire	30	153
Trasladar mangueras, difusores de aire, distribuidor de aire y filtro de compresor de aire al LBI	5	158
Inspeccionar compresor de aire	10	168
Inspeccionar conexiones electricas, cableado de lámparas o tiras led y de las propias lámparas o tiras led	20	188
Inspeccionar estructura del FBR	8	196
Inspeccionar perfiles de metal del FBR	8	204
Inspeccionar tornillos y tuercas	8	212
<b>TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)</b>	<b>3 horas y 32 minutos</b>	

## Montaje

ETAPA DE MONTAJE		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Trasladar tanque del FBR, mangueras, difusores de aire, silicon acético, tiras de madera, paño limpio, guantes, cubrebocas, lentes de protección a la mesa de trabajo.	5	5
Colocar mangueras y difusores de aire	5	10
Trasladar tanque del FBR al exterior	5	15
Inspeccionar posibles fugas de agua	20	35
Trasladar tanque del FBR a la mesa de trabajo	5	40
Inspeccionar el sellado del tanque en los contornos	10	50
Colocar silicon acético en los contornos, en caso de requerirlo	20	70
Dejar secar el silicon	1440	1510
Trasladar a LBI	5	1515
Montar tanque del FBR en los perfiles de metal y en la estructura del FBR	50	1565
TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)		26 HORAS Y 25 MINUTOS

Nota: De no hacer uso del silicon acético el tiempo se reduce a 1 hora y 45 minutos.

## Puesta en Marcha

ETAPA DE PUESTA EN MARCHA		
OPERACIÓN	TIEMPO UNITARIO (MINUTOS)	TIEMPO ACUMULADO (MINUTOS)
Llenar tanque del FBR con agua	8	8
Probar resistencia de la estructura a la presión de agua	480	488
Agregar cloro al tanque del FBR	5	493
Desinfectar tanque de FBR	120	613
Vaciar el tanque del FBR	10	623
Llenar el tanque del FBR con agua potable	8	631
Encender bomba de aire y dejar trabajando	120	751
Apagar la bomba de aire	2	753
Vaciar el tanque del FBR	10	763
Esterilizar zona del orificio principal con un mechero.	3	766
Llenar el tanque del FBR con agua potable hasta la primer ondulación	6	772
Vertir el inóculo (microalgas) junto con la dilución del medio (fertilizante y agua)	5	777
Cubrir orificio principal con un algodón envuelto en un gasa	2	779
Homogeneizar y atemperar el inóculo dentro del tanque del FBR	2880	3659
Agregar nuevo medio (fertilizante y agua)	5	3664
TIEMPO TOTAL (HORAS, MINUTOS)		61 HORAS y 4 MINUTOS