



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Orizaba

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**

OPCIÓN I. TESIS

Trabajo profesional:

**“SIMULACIÓN DE PROCESOS CON EL ENFOQUE TRIZ+DS:
CASO DE ESTUDIO DE UN BIORREACTOR”**

Que para obtener el grado de:

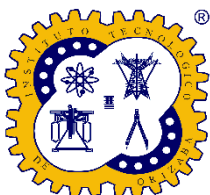
Maestra en Ingeniería Administrativa

Presenta:

I.Q. Elizabeth Córdova Grajales

Director de tesis:

Dr. Guillermo Cortés Robles



Orizaba, Veracruz, México

Diciembre, 2023



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **24/noviembre/2023**

Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**

Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. Elizabeth Cordova Grajales
Candidato a Grado de Maestro en:
INGENIERÍA ADMINISTRATIVA
P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"SIMULACIÓN DE PROCESOS CON EL ENFOQUE TRIZ+DS: CASO DE ESTUDIO DE
UN BIORREACTOR "**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

Cuahtémoc Sánchez R

DR. CUAHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Oriente 9 Num 852, Colonia Lirio Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz
Tel 01 (272) 105369 e-mail: dr_orizaba@tecna.mx tecna.mx / orizaba.tecna.mx



2023
Francisco
VILLA



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **30/octubre/2023**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

Elizabeth Córdova Graajales

La cual lleva el título de:

**"SIMULACIÓN DE PROCESOS CON EL ENFOQUE TRIZ+DS: CASO DE ESTUDIO DE UN
BIORREACTOR"**

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA – CULTURA®

PRESIDENTE: Dr. Guillermo Cortés Robles
SECRETARIO: Dr. Eduardo Roldán Reyes
VOCAL: Dr. Marcos Salazar Medina
VOCAL SUP: M.A.E. Maricela Gallardo Córdova

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-18



Av. Oriente 9 Núm.852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz.
Tel. 01 (272)1105360 e-mail: dir_orizaba@tecnm.mx tecnm.mx | orizaba.tecnm.mx



2023
Francisco
VILLA

Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 24 del mes de noviembre del año 2023.

El(la) que suscribe

C. Elizabeth Córdova Grajales

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 79 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada

“Simulación de procesos con el enfoque TRIZ+DS: caso de estudio de un biorreactor”

del programa: Maestría en Ingeniería Administrativa bajo la asesoría y dirección del Doctor Guillermo Cortés Robles y el Doctor Eduardo Roldán Reyes y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.


Elizabeth Córdova Grajales

Nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

Estimados profesores, familia y amigos: Me dirijo a ustedes con inmenso agradecimiento y profunda gratitud al concluir esta etapa fundamental de mi vida académica. La culminación de mi tesis no habría sido posible sin la inestimable contribución de cada uno de ustedes, y me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a quienes han dejado su huella en este viaje.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, Dr. Guillermo Cortés Robles, por su orientación, paciencia y dedicación. Sus conocimientos y apoyo fueron fundamentales para dar forma a mi investigación y para superar los desafíos que surgieron en el camino. Aprecio profundamente la confianza que depositó en mí y el tiempo valioso que invirtió para guiarme hacia el éxito.

A mi profesor de simulación el Dr. Jesús Delgado Maciel, Le agradezco profundamente por su dedicación y enseñanzas durante el curso de simulación. Su paciencia y compromiso, incluso en periodos vacacionales, han sido fundamentales para mi desarrollo académico. Gracias a su guía, he adquirido un valioso conocimiento en simulación que ha dejado una impresión duradera en mi formación académica.

A mi consejero y especialista en Microalgas el Dr. Juan Manuel Méndez Contreras, quiero expresar mi agradecimiento por su destacada labor como mi consejero en este tema. Su capacidad para transmitir conocimientos y motivarme a seguir aprendiendo ha sido fundamental. Aprecio especialmente su explicación sobre la importancia de nuestras investigaciones para el futuro del planeta.

Agradezco también al jurado de tesis por su tiempo, esfuerzo y el rigor con el que evaluaron mi trabajo. Sus comentarios constructivos han sido cruciales para mejorar la calidad de mi investigación y ampliar mi perspectiva académica.

A mi querida familia y amigos, les debo mi eterno agradecimiento. Su apoyo incondicional, ánimo y comprensión me han sostenido en los momentos más desafiantes. No hay palabras suficientes para expresar cuánto valoro su presencia constante en mi vida.

A mi novio por creer en mí y apoyarme en revisar mi tesis constantemente para cumplir con todos los requisitos que me solicitaban. Gracias por tan lindo detalle.

A mi hijo, porque a pesar de que no estás aquí, eres parte cada día de mi motivación para ser mejor persona y mejor profesionalista.

A mi gata kuku, mi compañera peluda, gracias por tu amor incondicional y por ser la fuente de alegría y consuelo en los días difíciles. Tu ronroneo siempre ha sido una melodía reconfortante en mi vida.

A todas aquellas personas cuyos nombres pueden haberse pasado por alto en este agradecimiento, les extiendo mi gratitud más sincera. Cada interacción, cada conversación y cada gesto amable ha dejado una marca en mi viaje, y valoro profundamente la contribución de cada uno. En resumen, este logro no es solo mío, sino de todos aquellos que han contribuido a mi desarrollo académico y personal. Aprecio la generosidad y el apoyo que he recibido a lo largo de este viaje y espero poder devolverlo de alguna manera en el futuro.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue aplicar la metodología TRIZ + DS en para analizar los procesos de un fotobiorreactor con el fin de identificar, formular y resolver los problemas inventivos inherentes a su operación para mejorar el desempeño de estos sistemas. Se llevó a cabo el análisis del fotobiorreactor, se identificaron sus funciones y sus requerimientos, así como las restricciones en el mismo, posteriormente se modelaron los conflictos inherentes y con el apoyo de la metodología TRIZ, se identificaron las contradicciones físicas y técnicas, se detectaron los problemas en el sistema y se propuso cómo resolverlos. Se llevó a cabo la simulación de una población de microalgas en diferentes escenarios, para identificar cómo era su desarrollo y productividad al cambiar algunas variables. Los resultados se presentan en la presente tesis y se logró gran avance en el desarrollo de tecnologías para el apoyo en los análisis de microalgas.

Palabras claves: Simulación, sistema, contradicciones, modelo.

ABSTRACT

The objective of this project was to apply the TRIZ + DS methodology to analyze the processes of a photobioreactor in order to identify, formulate and solve the inventive problems inherent to its operation to improve the performance of these systems. The analysis of the photobioreactor was carried out, its functions and requirements were identified, as well as the restrictions in it, later the inherent conflicts were modeled and with the support of the TRIZ methodology, the physical and technical contradictions were identified, the problems in the system and proposed how to solve them. The simulation of a population of microalgae was carried out in different scenarios, to identify what their development and productivity were like when changing some variables. The results are presented in this thesis and a great advance was achieved in the development of technologies to support the analysis of microalgae..

Keywords: Simulation, system, contradictions, model.

Índice del contenido

RESUMEN	i
ABSTRACT	vi
Índice de figuras	x
Índice de tablas	xi
Capítulo 1. Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Posicionamiento de la Tesis	2
1.3 Planteamiento del problema	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general.....	3
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Justificación.....	4
1.6 Hipótesis	5
1.7 Metodología	6
1.7.1 Metodología TRIZ + DS.....	6
1.7.2 Creación de la metodología TRIZ + DS	6
1.7.3 Fase 1: Conceptualización	9
1.7.4 Fase 2: Análisis de contradicciones.....	11
1.7.5 Fase 3: Desarrollo de la simulación.....	12
2.1 Captura y almacenamiento de CO ₂	14
2.2 Algas	14
2.2.1 Clasificación	15
2.2.1.1 Algas Verdes	15
2.2.1.2 Algas Rojas.....	16
2.2.1.3 Algas pardas.....	16
2.2.1.4 Algas azul-verdosas o cianobacterias	16
2.2.1.5 Microalgas.....	17
2.2.2 Cultivo de microalgas.....	19
2.2.3 Aspectos importantes del cultivo de microalgas	20
2.2.3.1 Luz	21
2.2.3.2 Temperatura	22

2.2.3.3 Agitación	22
2.2.3.4 pH	23
2.2.3.5 Macronutrientes, micronutrientes y vitaminas	23
2.2.4 Pigmentos naturales	24
2.2.4.1 Clorofila	24
2.2.4.2 Xantófilas	25
2.2.5 Reología	25
2.2.6 Biofijación de dióxido de carbono por microalgas	25
2.3 Biorreactores para la producción de microalgas	26
2.3.1 Fotobiorreactor tubular del Tecnológico de Orizaba	29
2.4 Dinámica de sistemas	29
2.4.1 Metodología de la dinámica de sistemas	30
2.4.1.1 Etapa 1: Definición del problema y conceptualización del modelo	30
2.4.1.2 Etapa 2: Construcción del modelo formal	30
2.4.1.3 Etapa 3: Evaluación	31
2.4.1.4 Etapa 4: Mejora del diseño e Implementación	31
2.5 Teoría de la resolución de problemas inventivos (TRIZ)	31
2.5.1 Contradicción	31
2.5.1.1 Contradicción física	32
2.5.1.2 Contradicción técnica	32
2.6 Software para la simulación del modelado del proceso	32
Capítulo 3. Aplicación de la Metodología TRIZ + DS	33
3.1 Fase 1. Conceptualización	33
3.1.1 Descripción del problema y sus componentes estableciendo condiciones iniciales	33
3.1.2 Identificar las variables críticas del modelo y hacer un Diagrama Causal de Bucle (CLD)	34
3.1.3 Aproximación al comportamiento del sistema ideal	35
3.1.4 Identificar los bucles más importantes que generan contradicciones	35
3.1.5 Formular contradicciones físicas o técnicas y pasar a la fase dos	36
3.1.5.1 Contradicciones físicas	36
3.1.5.2 Contradicciones técnicas	36

3.2 Fase 2. Análisis de contradicciones	37
3.2.1 Contradicciones físicas	37
3.2.1.1 Identificar variables con efectos positivos y nocivos	37
3.2.1.2 Seleccionar uno de los cuatro principios de separación: tiempo, espacio, partes y condiciones	38
3.2.1.3 Usar recursos y efectos (si es necesario) para buscar el sistema ideal	39
3.2.1.4 Si hay otra contradicción, repetir estos pasos, si no las hay, analizar contradicciones técnicas	40
3.2.2 Contradicciones técnicas	40
3.2.2.1 Identificar el parámetro para mejorar y analizar las restricciones para mejorarlo	40
3.2.2.2 Usar la matriz de Altshuller y usar los principios inventivos para proponer una solución	41
3.2.2.3 Identificar los recursos y combinarlos con efectos científicos (si es necesario) para buscar el sistema ideal	43
3.2.2.4 Si hay otra contradicción, repetir los pasos anteriores, de lo contrario pasar a la fase tres	43
3.3 Fase 3. Desarrollo de la simulación	43
3.3.1 Realizar el diagrama de Forrester y crear las ecuaciones diferenciales del sistema	43
3.3.2 Evaluar el efecto de una contradicción en el sistema utilizando el modelo de simulación	46
3.3.3 Simular el modelo en diferentes escenarios y aplicar análisis de sensibilidad	48
3.3.4 Hacer una interfaz y observar el comportamiento del modelo con diferentes políticas	50
3.3.5 Usar el modelo de simulación para evaluar y probar una solución potencial	52
Conclusiones	53
Recomendaciones	54
Referencias	55
Productividad científica	57
Anexo A	59
Anexo B	61
Referencias bibliográficas	66

Índice de figuras

Figura 1.1. Integración de contradicciones a la Dinámica de Sistemas	14
Figura 1.2. Etapas de la metodología TRIZ+DS	14
Figura 2.1. Curva representativa de crecimiento de un cultivo de microalgas en un volumen limitado	24
Figura 2.2. Trayectoria de la luz y de los ciclos luz/oscuridad	27
Figura 2.3. Evolución de la tasa de crecimiento en función de la intensidad luminosa para distintas temperaturas	28
Figura 2.4. Clasificación de los pigmentos naturales	30
Figura 2.5. Tipos básicos de fotobiorreactores	34
Figura 2.6. Fotobiorreactor tubular del Tecnológico de Orizaba	35
Figura 3.1. Diagrama de Causal de Bucle	40
Figura 3.2. Diagrama de Forrester modelo 1	50
Figura 3.3. Diagrama de Forrester modelo 2.....	51
Figura 3.4. Ecuaciones del sistema.....	52
Figura 3.5. Simulación del sistema sin presencia de adherencia en las paredes.....	53
Figura 3.6. Simulación del sistema con presencia de adherencia en las paredes.....	53
Figura 3.7. Simulación del sistema con CO ₂ y luminosidad.....	54
Figura 3.8. Simulación del sistema sin CO ₂ y con luminosidad.....	55
Figura 3.9. Simulación del sistema con CO ₂ y sin luminosidad.....	55
Figura 3.10. Simulación del sistema sin CO ₂ y sin luminosidad.....	56
Figura 3.11. Interfaz del modelo de simulación del fotobiorreactor.....	57
Figura 3.12. Gráficas de adherencia.....	58

Índice de tablas

Tabla 1.1. Metodología de Dinámica de Sistemas	13
Tabla 1.2. Fase de definición	16
Tabla 1.3. Análisis de contradicciones	18
Tabla 1.4. Desarrollo del modelo de simulación dinámica	19
Tabla 3.1. Condiciones ideales para la producción de microalgas de acuerdo a datos bibliográficos	41
Tabla 3.2. Variables detectadas en el diagrama causal de bucle	42
Tabla 3.3. Matriz de contradicción de Altshuller Principios inventivos	47

 TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO	Nombre del documento: Carta de No Inconveniencia	
	Referencia a la Norma	
	ISO9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1, 8.6	
		Página 1 de 1
		Código: ITO-VI-PO-016-02
		Revisión: 01

Orizaba, Ver. a 24 de NOVIEMBRE de 2023

C. CORDOVA GRAJALES ELIZABETH
EGRESADO/A

Me permito informarle de acuerdo a su solicitud, que **NO EXISTE INCONVENIENTE** para que pueda Ud. presentar su Acto de Recepción Profesional, ya que su expediente quedó integrado para tal efecto.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA – CULTURA®


ALMA IVONNE SÁNCHEZ GARCÍA
JEFE/A DEL DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ESCOLARES



c.c.p. Archivo
c.c.p. División de Estudios Profesionales

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

La Simulación, como técnica científica, se utiliza principalmente para el análisis y diseño de sistemas complejos y dinámicos de la realidad, ya que, con sus principios, fundamentalmente intuitivos, permite la creación de escenarios de los sistemas, en los que se pueden explorar y experimentar diversas situaciones sin tener que afectar de manera directa la realidad sobre la que se busca actuar para mejorarla. El uso de otros procedimientos o técnicas para abordar tales situaciones, en general es más difícil, y a veces resulta poco factible; por el contrario, la aplicación de la simulación permite ahorrar tiempo y recursos. Jay W. Forrester comenzó su estudio en la dinámica de sistemas, donde desarrolló la simulación dinámica. A lo largo de los años investigadores han desarrollado lenguajes de programación para la simulación de sistemas dinámicos siguiendo los pasos de Forrester.

Hoy en día la simulación por computadoras basada en modelos matemáticos resulta parte integral de la investigación y del sistema de educación universitaria por su bajo costo y el ahorro de tiempo que producen. Esa situación es de mayor importancia en el caso de la enseñanza de la biotecnología, donde las prácticas de laboratorio convencionales se han vuelto más y más caras. (González, 2018)

Experimentos realizados en plantas pilotos conllevan a gastos de miles de pesos de inversión para los insumos requeridos y horas para llevar a cabo el proceso. La simulación permite reducir costos y tiempos para obtener resultados inmediatos y poder con ello determinar ajustes en el sistema.

No se puede reemplazar la experimentación realizada en laboratorios, ya que hay análisis cualitativos que no se pueden determinar mediante la simulación, sin embargo, lo que pueda resolverse matemáticamente con los datos recabados de cada una de las variables presentes en el sistema y sus contradicciones, se puede llegar a detectar o resolver problemas “reales” mediante la simulación.

1.2 Posicionamiento de la Tesis

Esta tesis tiene lugar, en la línea de investigación de la maestría en ingeniería administrativa: Innovación y administración del capital intelectual. La cual busca generar conocimiento en el área de innovación tecnológica al aplicar la metodología TRIZ + DS en el modelado de la simulación de un fotobiorreactor para microalgas.

1.3 Planteamiento del problema

La era de la Revolución Industrial generó la mecanización de algunos procesos, así como el avance tecnológico en el mundo. A su vez un gran avance, ya que se producía más invirtiendo menos tiempo y mano de obra. Día a día se logra transformar los procesos, a fin de hacer más fácil el trabajo y conseguir la producción de todo lo que necesitamos, incluso lo que no es necesario. Consecuencia de ello, es la contaminación del medio ambiente. Lamentablemente, todo el enfoque ha sido hacia el crecimiento de la industria, sin medir el impacto ambiental.

La problemática ambiental ha llamado la atención de investigadores quienes en pro de su conservación y la reducción del impacto ambiental que tienen las empresas actualmente, han desarrollado nuevas tecnologías conocidas como “biotecnologías” las cuales buscan realizar las operaciones reduciendo el impacto ambiental.

Una de las biotecnologías utilizadas comúnmente para la obtención de energía limpia son los biorreactores, el cual de acuerdo con Damián et al. (2014) “es un recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo. En algunos casos, un biorreactor es un recipiente en el que se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas”. Como ya lo menciona el mismo concepto, un biorreactor involucra un ambiente biológicamente activo, por lo cual es difícilmente controlable. Es por ello por lo que se implementan modelos de diseño que resuelvan los conflictos en el sistema.

Antes de poner en marcha la creación del prototipo de un biorreactor, se recomienda realizar una simulación sobre el proceso que ejecutará ese biorreactor, con el fin de ir probando si las variables analizadas y las medidas determinadas son las adecuadas para el sistema.

La simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema. (Shannon, 1975)

Un modelo supone un ahorro de tiempo, puesto que, una vez elaborado el modelo, la simulación de una posible política o situación se efectúa en un momento. Por el contrario, la adopción de decisiones en el sistema real requiere mayor inversión en tiempo para su discusión y puesta en práctica y sus efectos se manifestarán en el largo plazo. (Alonso & Castaño, 2000)

La dinámica de sistemas es modelo sistémico ideado para resolver problemas concretos, fue desarrollada por Forrester a mediados de la década de los 50s. “Es un método para el estudio del comportamiento de sistemas mediante la construcción de un modelo de simulación informática que ponga de manifiesto las relaciones entre la estructura del sistema y su comportamiento” (Mata et al., 2005). La simulación con dinámica de sistemas es la herramienta propuesta para llevar a cabo este proyecto, debido a su capacidad para detectar problemas en el diseño, incluso predecirlos evitando así cometer errores o tener anomalías. Esta técnica se emplea en sinergia con la teoría TRIZ, la cual es útil en la solución de problemas inventivos y, en conjunto, pueden analizar y resolver los problemas asociados al proceso que se realiza dentro de un biorreactor de algas.

Para la simulación, se utilizará el software llamado Stella® el cual se basa en ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema y con ello se puede determinar el sistema más eficiente del funcionamiento de un biorreactor, con menor consumo de nutrientes y mayor producción de energía. Las características del biorreactor a simular serán del fotobiorreactor tubular ubicado en la Planta de Lodos del Instituto Tecnológico de Orizaba.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Aplicar la metodología TRIZ + DS para analizar los procesos de un biorreactor con la finalidad de identificar, formular y resolver los problemas inventivos inherentes a su operación para mejorar el desempeño de estos sistemas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar los requerimientos del biorreactor para identificar las principales restricciones y funciones útiles que debe entregar.
- Modelar los conflictos presentes en el biorreactor para clasificarlos y decidir la secuencia adecuada de resolución.
- Aplicar la metodología TRIZ+DS para formular y resolver los problemas centrales del sistema.
- Evaluar las soluciones potenciales mediante una simulación para identificar los efectos de cada escenario sobre el biorreactor.
- Proponer estrategias de mejora del desempeño del biorreactor para compararlas con las tendencias de evolución de TRIZ.

1.5 Justificación

Las estrategias actuales para la creación de energía requieren y buscan sea una forma sostenible y que se aprovechen los recursos naturales de una forma respetuosa, lo que llaman actualmente energía limpia, porque no contamina en su proceso de creación. La tecnología actual debe innovar en ese aspecto, en no impactar negativamente al medio ambiente sino desarrollarse en pro de lo sostenible.

Las empresas con el paso del tiempo van a orillarse a utilizar tecnologías verdes, más que por contribuir al medio ambiente, por cumplir nuevos reglamentos que son en pro de la conservación y sostenibilidad ambiental. Esto además impactará en la sociedad, ya que al saber que se produce energía verde, querrán involucrarse en esa nueva dinámica del cuidado del medio ambiente, naciendo de ello una cultura del cambio.

Los biorreactores son una tecnología que ha ido innovándose con el paso del tiempo, desde sus sistemas hasta los modelos que se utilizan para que el sistema trabaje de forma eficiente. El control adecuado de un biorreactor, desde los nutrientes a agregar y el monitoreo de las variables ambientales, tiene como consecuencia el aprovechamiento eficiente de los recursos y por lo tanto un ahorro económico para la organización.

Los componentes de un sistema durante el proceso de inventiva poseen variables que se relacionan de una u otra manera entre sí, por lo cual se debe emplear una metodología capaz de entender la interrelación entre esas variables.

En esta tesis se desarrolló un proyecto tecnológico que buscó, mediante la simulación, encontrar el sistema ideal en un fotobiorreactor para la producción de microalgas capaces de absorber el CO₂ del aire. Este proyecto tiene un gran impacto en la sociedad y en las empresas, quienes pueden optar por el uso de microalgas para disminuir la contaminación ambiental. Además de la disminución de recursos económicos en los laboratorios de experimentación de fotobiorreactores, ya que a partir de los datos obtenidos en la simulación pueden ajustar variables y/o parámetros en sus pruebas piloto.

La justificación de este tema va de la mano del avance tecnológico-científico, en materia de Cambio Climático y Calidad del Aire que impulsa a investigar el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología en el desarrollo del conocimiento y la innovación por medio de los PRONACES.

Es importante destacar que este proyecto tiene un impacto significativo en la contribución científica dentro del Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba. Los datos obtenidos en esta investigación pueden servir de base para el desarrollo de nuevos proyectos de investigación orientados a mejorar la simulación en sistemas de fotobiorreactores. Además, esta investigación puede proporcionar apoyo al laboratorio de ingeniería química al reducir los tiempos experimentales a través del uso de la simulación. En resumen, este proyecto tiene el potencial de impulsar avances científicos y tecnológicos en el campus, beneficiando tanto a la investigación como a la eficiencia del laboratorio.

1.6 Hipótesis

Mediante la aplicación de la metodología TRIZ + DS al modelado y simulación de un fotobiorreactor asociado a la operación se podrá proponer una solución a los conflictos que existan en el sistema así mismo nos permitirá evaluar cualquier escenario en el sistema y predecir futuros problemas.

1.7 Metodología

1.7.1 Metodología TRIZ + DS

La teoría TRIZ cuenta con tres grandes herramientas dentro de su enfoque:

1. Análisis de contradicciones físicas y técnicas.
2. Análisis Campo – Sustancia (SFA).
3. Análisis de tendencias de evolución (ToE).

Este capítulo se centra únicamente en la propuesta metodológica de un enfoque que permita evaluar las contradicciones físicas y técnicas de un sistema a través del tiempo. Una contradicción surge cuando en un sistema, la tentativa de mejorar un cierto parámetro ocasiona la degradación inaceptable de sí mismo dentro del sistema o bien de otro parámetro también útil y viceversa (Altshuller, 1973; Delgado, 2021).

En una contradicción física se exige la existencia simultánea de dos estados mutuamente exclusivos, correspondientes a una función o componente del sistema, mientras que en una contradicción técnica ocurre cuando la mejora de un parámetro o característica útil de un sistema provoca la degradación de otro parámetro o característica también útil y viceversa (Delgado, 2021).

1.7.2 Creación de la metodología TRIZ + DS

TRIZ y Dinámica de Sistemas (DS) cuentan con metodologías propias para resolver problemas de acuerdo con su área. La actual metodología de Dinámica de Sistemas fue producto de los trabajos de (Forrester 1961) y (Sterman 2000) quienes sintetizaron los pasos para la creación de modelos de simulación dinámica. (Delgado, 2021)

La actual metodología que sigue la Dinámica de Sistemas está compuesta por cuatro fases, las cuales se resumen en la tabla 1.1.

Por su parte, la metodología de TRIZ es menos definida y más abstracta ya que cuando se abordan problemas de inventiva cada producto o servicio en el que se quiera aplicar es único en sus características.

Tabla 1.1. Metodología de Dinámica de Sistemas (Delgado, 2021).

Dinámica de Sistemas			
Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Conceptualización	Formulación	Evaluación	Implementación
1) Selección del escenario. 2) Definir el propósito del modelo. 3) Desarrollar el diagrama causal. 4) Establecer el horizonte de tiempo. 5) Establecer las relaciones entre las variables. 6) Desarrollar el diagrama causal.	1) Elaboración del diagrama Forrester. 2) Determinación de las ecuaciones matemáticas. 3) Estimar y seleccionar los parámetros del modelo.	1) Simular el modelo y probar las relaciones del diagrama causal. 2) Probar el modelo bajo diferentes supuestos. 3) Documentar la respuesta del modelo con análisis de sensibilidad.	1) Presentar el modelo en una forma accesible al usuario. 2) Observar y analizar el comportamiento del modelo bajo diferentes políticas.

De acuerdo con (Salamatov, 1999) para resolver contradicciones técnicas se recomienda usar (1) la matriz de contradicciones de (Altshuller, 2005), (2) el uso de recursos, y (3) el concepto del sistema ideal.

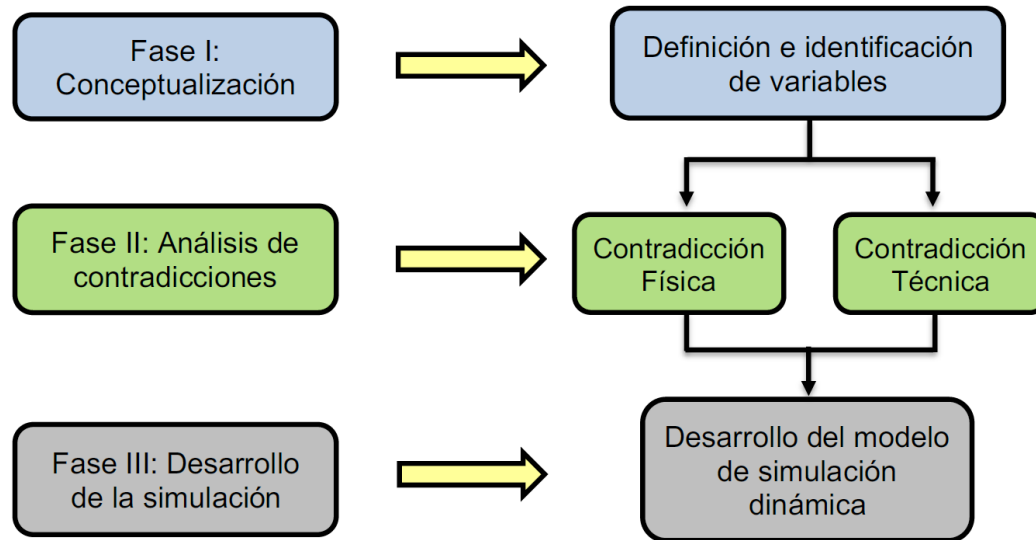
Por su parte, (Savransky, 2000) recomienda el uso de (1) principios de separación de (Altshuller, 1986), (2) identificación de recursos, (3) sistema ideal y (4) efectos (Altshuller, 1973) para resolver las contradicciones físicas.

Existe una diferencia significativa a la hora de resolver contradicciones técnicas y físicas, ya que para la resolución de las técnicas se requiere el uso de la matriz de contradicciones mientras que para las físicas se efectúa la aplicación de los cuatro principios de separación. Cabe resaltar que para que ambas contradicciones sean resueltas, sus resultados deben combinarse con los recursos y el sistema ideal. (Salamatov, 1999; Delgado, 2021)

El análisis de contradicciones físicas y técnicas de (Salamatov 1999) y (Savransky 2000) se combinó con la metodología de Dinámica de Sistemas propuesta por (Forrester 1961) y (Stermann, 2000) dando lugar a una metodología que engloba una de las herramientas de

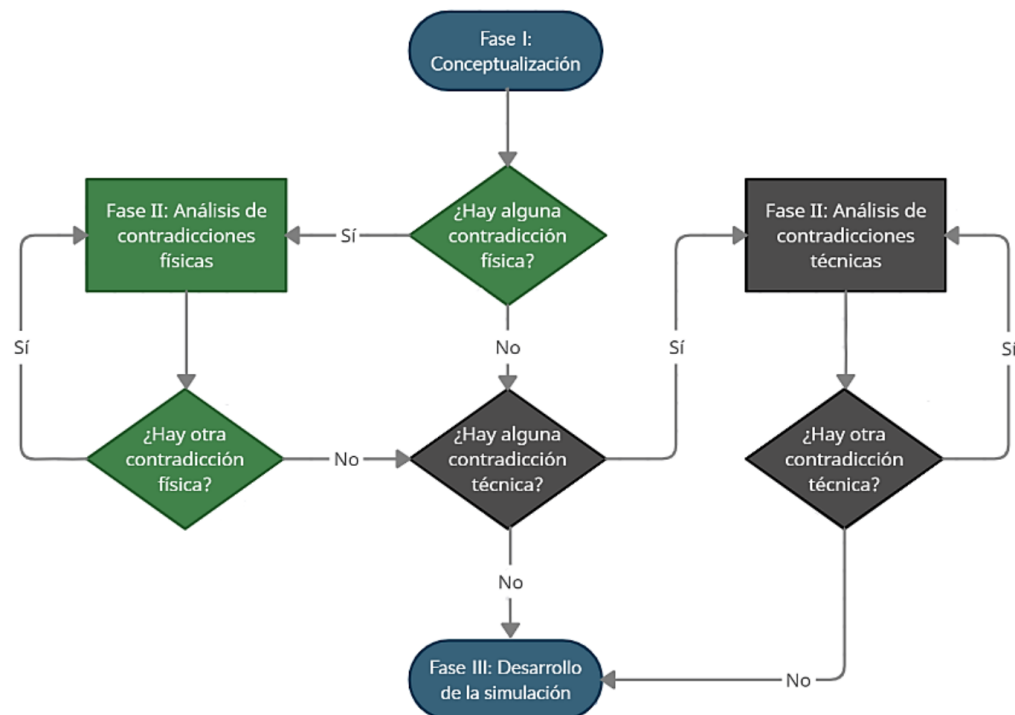
TRIZ con Dinámica de Sistemas. En la figura 1.1 se muestra la interacción entre ambas técnicas llamada TRIZ + DS:

Figura 1.1. Integración de contradicciones a la Dinámica de Sistemas (Delgado, 2021).



Tomando en cuenta lo anterior, la propuesta metodológica que engloba TRIZ y la Dinámica de Sistemas enfocada a la resolución de contradicciones técnicas y físicas, dividida en tres fases mostrando la sinergia creada entre ellas a través de un diagrama de flujo.

Figura 1.2. Etapas de la metodología TRIZ+DS (Delgado, 2021).



En la figura 1.2 se muestran las etapas de la metodología propuesta, la cual consta de (1) Conceptualización, (2) Análisis de contradicciones físicas y técnicas y (3) Desarrollo de la simulación, sin embargo, en las tablas 1.2, 1.3 y 1.4 se mostrarán con detalles cada uno de los componentes de esta.

1.7.3 Fase 1: Conceptualización

La primera fase comprende un análisis inicial de variables. Esta etapa solo involucra la fase de conceptualización de la tabla 1.1. La metodología de la Dinámica de Sistemas sugiere utilizar un Diagrama Causal de Bucles (CLD). El CLD es un gráfico orientado, en estos diagramas, una flecha representa el vínculo causal entre las variables que conecta. Un enlace tiene una polaridad, que denota la influencia: positiva o negativa. En un CLD hay bucles negativos (balanceo) y positivos (realimentación). Los bucles de equilibrio se utilizan para estabilizar el sistema, mientras que los bucles de retroalimentación dan crecimiento al sistema. El modelo de un sistema complejo tendrá varios bucles.

Es importante establecer en esta fase un mecanismo para clasificar y priorizar los bucles de acuerdo con su importancia. Cualquier herramienta de clasificación es factible; sin embargo, el Proceso Jerárquico Analítico (AHP) tiene varias ventajas que lo convierten en una excelente alternativa. Por lo tanto, el AHP permite al usuario decidir el bucle más importante para iniciar el proceso de resolución.

Cada bucle en el CLD contiene al menos una contradicción. Por lo tanto, las variables o parámetros que forman un bucle en el diagrama son las fuentes de al menos una contradicción.

Es posible formular una contradicción física o técnica a partir del análisis de un bucle. Si el usuario percibe una contradicción física, entonces es útil una estructura básica para modelar el problema: la característica, el estado o el parámetro exigen la condición "A" para lograr el efecto "X", pero el estado opuesto "Anti A" para evitar, garantizar o mejorar la condición "Y".

Para modelar una contradicción técnica, (Savransky, 2000) ofrece la siguiente estructura: "El subsistema clave (nombre) debe ser o tiene un (parámetro

"positivo"), para (el primer requisito de la herramienta), el subsistema clave (nombre) no debe ser, o no debe tener (parámetro "negativo"), con el fin de (el segundo requisito para la herramienta)".

La etapa de conceptualización transforma la información disponible en cada bucle en al menos una contradicción. La experiencia y la capacidad del usuario deciden la naturaleza del conflicto y la clasifican como una contradicción física o técnica.

Para dar solución a las contradicciones físicas o técnicas, un componente muy importante en la teoría de TRIZ es el Resultado Final Ideal (Altshuller, 1999). El objetivo del resultado final ideal o un resultado más deseado deriva del concepto de Sistema Ideal. Este sistema no existe físicamente, no consume energía, ni materia, pero proporciona al menos una función útil sin ninguna pérdida, ni efecto perjudicial. Este concepto utópico tiene el poder de concentrar el esfuerzo cognitivo en una dirección común. Crea un propósito compartido por todos los interesados en el proceso de resolución. Para mostrar mayor detalle de esto, la tabla 1.2 muestra el desglose de la etapa de conceptualización de la metodología de la figura 1.2. (Delgado, 2021)

Tabla 1.2. Fase de definición (Delgado, 2021).

Fase 1	Pasos
Conceptualización	1.1. Descripción del problema y sus componentes estableciendo condiciones iniciales.
	1.2. Identificar las variables críticas del modelo y hacer un Diagrama Causal de Bucle (CLD).
	1.3. Aproximación al comportamiento del sistema ideal.
	1.4. Identificar los bucles más importantes que generan contradicciones.
	1.5. Formular contradicciones físicas o técnicas y pasar a la fase dos.

1.7.4 Fase 2: Análisis de contradicciones

La segunda fase se centra en el análisis de las contradicciones físicas y técnicas con el objetivo de definir posibles vías de resolución. Las fuentes de esta información son los bucles descritos en el diagrama causal (CLD). Por lo tanto, una mayor cantidad de bucles equivale a una mayor cantidad de conflictos inventivos. La síntesis de la información disponible produce una red de problemas que tienen relaciones complejas e incluso ocultas. La jerarquía propuesta en la fase anterior es conveniente para clasificar problemas o bucles con el objetivo de guiar el esfuerzo en una dirección, pero también para definir las hipótesis dinámicas.

La Dinámica de Sistemas permite al usuario observar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo siempre que haya algún cambio en las variables. Una hipótesis dinámica representa un cambio potencial en el sistema. La tabla 1.3 propone un proceso simple para formular contradicciones físicas o técnicas. Si no es posible ofrecer una solución viable a partir del análisis de contradicción, existe una herramienta alternativa a la matriz de contradicción de (Altshuller, 1997) y a los principios de separación (Altshuller, 1986): El algoritmo de resolución de problemas inventivos (ARIZ) que ofrece una secuencia única para aplicar las herramientas de TRIZ (Altshuller, 1999). El uso de ARIZ en este trabajo es solo una recomendación. El estudio y análisis de este algoritmo están fuera del alcance de este trabajo.

La información sobre los componentes del sistema (producida en la fase uno) es útil para aplicar otro concepto de TRIZ: los recursos. Según TRIZ, todos los sistemas que proporcionan al menos una función útil evolucionan continuamente a través del uso de sus recursos intrínsecos. La estrategia de resolución debe hacer uso de los recursos ya disponibles en el sistema o el entorno circundante. Un recurso es una parte en el sistema que no se explota completamente, se subestima, pero se puede acceder a él para producir valor sin un costo excesivo. TRIZ considera que los recursos del sistema son la materia prima para una solución inventiva. (Savransky, 2000) ofrece una completa clasificación de recursos. La tabla 1.3 muestra la fase 2 que involucra el análisis de las contradicciones. (Delgado, 2021)

Tabla 1.3. Análisis de contradicciones (Delgado, 2021).

Fase 2	Pasos	
Análisis de contradicciones	Contradicciones físicas	Contradicciones técnicas
	2.1.1. Identificar variables con efectos positivos y nocivos.	2.2.1. Identificar el parámetro para mejorar y analizar las restricciones para mejorarlo.
	2.1.2. Seleccionar uno de los cuatro principios de separación: tiempo, espacio, partes y condiciones.	2.2.2. Usar la matriz de contradicción de Altshuller y usar los principios inventivos para proponer una solución.
	2.1.3. Usar recursos y efectos (si es necesario) para buscar el sistema ideal.	2.2.3. Identificar los recursos y combinarlos con efectos científicos (si es necesario) para buscar el sistema ideal.
	2.1.4. Si hay otra contradicción, repetir estos pasos, si no las hay, analizar contradicciones técnicas.	2.2.4. Si hay otra contradicción, repetir los pasos anteriores, de lo contrario, pasar a la fase tres.

1.7.5 Fase 3: Desarrollo de la simulación

Varios pasos de la tabla 1.1 son semejantes a la fase final de la metodología propuesta TRIZ + DS. La creación y aplicación de un modelo de simulación permite el análisis matemático de las fases anteriores. La integración de la simulación dinámica a TRIZ representa una contribución significativa. Además, el análisis de sensibilidad proporciona al usuario cierta información que facilita la toma de decisiones debido a la capacidad de probar diferentes políticas. En esta fase, las hipótesis dinámicas representadas en el CLD tienen un papel esencial porque permiten analizar diferentes escenarios y evaluar las mejores alternativas de solución (Delgado, 2021). La tabla 1.4 muestra la fase final. (Delgado, 2021)

Tabla 1.4. Desarrollo del modelo de simulación dinámica (Delgado, 2021).

Fase 3	Pasos
Desarrollo de la simulación	3.1. Realizar el diagrama de Forrester y crear las ecuaciones diferenciales del sistema.
	3.2. Evaluar el efecto de una contradicción en el sistema utilizando el modelo de simulación.
	3.3. Simular el modelo en diferentes escenarios y aplicar análisis de sensibilidad.
	3.4. Hacer una interfaz y observar el comportamiento del modelo con diferentes políticas.
	3.5. Usar el modelo de simulación para evaluar y probar una solución potencial.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Captura y almacenamiento de CO₂

Las algas, como cualquier otra especie vegetal, toman el CO₂ de la atmósfera para realizar el proceso de fotosíntesis para su crecimiento. Esta propiedad de las algas puede utilizarse para capturar el CO₂ presente en los gases procedentes de la combustión en una planta de generación eléctrica o una planta industrial. (Caballero, 2019)

Los reactores industriales para cultivo de microalgas generalmente son estanques abiertos, y sistemas cerrados comúnmente llamados fotobiorreactores. La producción de microalgas en sistemas cerrados como fotobiorreactores tiene un costo elevado. Sin embargo, los sistemas cerrados requieren mucho menos luz para el cultivo de las microalgas. (Demirbas et al., 2010; Caballero, 2019)

2.2 Algas

Las más sencillas de las plantas no vasculares (sin tejido especializado para transportar el agua y el alimento a través del cuerpo de la planta) son las algas, no se clasifican dentro del reino vegetal, es decir, no son plantas. Se trata de un grupo polifilético o artificial, y no tiene, por lo tanto, uso en la clasificación científica moderna, aunque sigue teniendo utilidad en la descripción de los sistemas acuáticos. (Catzim y López, 2011; Caballero, 2019)

Existe una amplia diversidad de grupos actualmente identificados como parte de las algas, cada uno con características distintas. Estos grupos engloban desde organismos compuestos por una sola célula hasta plantas marinas que pueden superar los diez metros de longitud.

Las algas viven tanto en agua dulce como en agua salada. Se consideran talófitas, es decir, no poseen raíz, tallo y hojas; no desarrollan embrión, son organismos autótrofos, debido a que tienen la capacidad de sintetizar su propio alimento. Su diferencia de formas ha permitido clasificar las algas en diferentes grupos, de

acuerdo con sus características estructurales como tipo de célula, de reproducción, de nutrición, de pigmentos, entre otros. (Caballero, 2019)

2.2.1 Clasificación

El sistema de clasificación de las algas varía según el autor, siendo el número de clasificaciones entre cuatro y nueve. Esta variación es explicada en parte por la posición asignada a las algas azulverdosas, consideradas recientemente como un tipo de bacterias por su afinidad y tipo de célula procariótica (un tipo de célula con menor grado evolutivo); adicional a este grupo se reconocen tres grupos de algas eucarióticas (un tipo de célula con mayor grado evolutivo): Las algas verdes (Chlorophyta), algas rojas (Rhodophyta) y las algas pardas (Phaeophyta). (Peña et al., 2005; Caballero, 2019)

Otro grupo de algas con características disímiles corresponde a las algas azulverdosas, consideradas como un tipo de bacterias, particularmente por su célula primitiva. Las algas además de proveer cerca de la mitad de producción primaria total del mundo, de la cual dependen gran parte de los productores secundarios acuáticos, participan en los diferentes ciclos biogeoquímicos globales, con la producción de oxígeno atmosférico y la regulación del clima. (Caballero, 2019)

2.2.1.1 Algas Verdes

Tienen paredes celulares de celulosa, contienen clorofila a y b y almacenan almidón al igual que las plantas. Se cree que dieron origen a las plantas terrestres. Casi todas las algas verdes son microscópicas, aunque pueden ser unicelulares o multicelulares. Su distribución es muy amplia y están presentes en todos los ambientes acuáticos como los ríos, lagos y mares. (Caballero, 2019)

Dentro de esta división existen dos grupos importantes llamados comúnmente diatomeas y dinoflagelados. Ambos subgrupos se distribuyen ampliamente en aguas saladas y dulces y juegan un papel muy importante como constituyente de la vegetación acuática. (Peña et al., 2015; Caballero, 2019)

a) Diatomea

Son un tipo de algas verdes unicelulares sin ningún tipo de flagelo y su principal característica es la presencia de un esqueleto de sílice que rodea la célula y le confiere una dureza especial. Su cubierta está conformada por dos valvas que encajan una con otra. Cuando esta especie de esqueleto se acumula por muchos

años en el fondo del agua, constituye la llamada tierra de diatomeas, producto comercial utilizado para varios fines como pulimento de metales y pasta de dientes, filtración de líquidos, en el control de temperaturas de hornos industriales y como material inerte en la fabricación de dinamita. (Shabnam et al., 2015; Caballero, 2019)

b) Dinoflagelados

Son algas unicelulares dominantes en el agua de mar y en menor proporción en el agua dulce, reciben el nombre colectivo de plancton (Tortora et al., 2007) y una de sus características principales son los flagelos de donde derivan su nombre. Los dinoflagelados son los responsables de las mareas rojas, fenómenos que ocurren en aguas costeras por la ploriferación de estas algas en especial de dos géneros: *Gonyaulax* y *Peridinium*. Estos poseen pigmentos rojos disueltos en glóbulos de aceite que en grandes cantidades le imprimen un color rojizo. (Shabnam., 2015; Caballero, 2019)

2.2.1.2 Algas Rojas

Son llamadas también florídeas por su almidón de reserva y constituyen un grupo de algas más diverso y dominante en el agua de mar. Se diferencian de las demás por no poseer ningún tipo de flagelo y por la presencia de un pigmento fotosintético característico llamado ficobilina (ficoeritrina y ficocianina) que da el color propio a las algas rojas. Sus células contienen también otros pigmentos como los carotenos y las xantofilas que aparecen también en la zanahoria. (Caballero, 2019)

2.2.1.3 Algas pardas

Deben su nombre a su coloración predominante: determinada en gran parte por los tipos de pigmentos: clorofila a, c, beta-caroteno, violaxantina y fucoxantina. Constituyen un grupo importante con alrededor de 1500 especies, no presentan formas unicelulares ni etapas vegetativas (no reproductivas) móviles. La reserva alimenticia principal se conoce como laminarina, un polímero de la glucosa que es el principal azúcar de las plantas. También cuenta como reserva en su pared celular con el ácido algínico que tiene un alto valor comercial y es utilizado como emulsificante y estabilizante en la industria alimenticia y farmacéutica. (Harun et al., 2010; Caballero, 2019)

2.2.1.4 Algas azul-verdosas o cianobacterias

Son caracterizados como organismos procarióticos. Su estructura celular posee características de una célula primitiva, tales como la ausencia de una membrana

que rodee el núcleo de la célula y ausencia de cromosomas. No poseen estructuras internas tales como los cloroplastos o mitocondrias, las cuales cumplen funciones específicas para el funcionamiento de la célula. La utilización del microscopio electrónico y nuevos métodos bioquímicos ha permitido conocer muchos aspectos y establecer afinidades con la estructura de las bacterias. Aunque se asemejan a las algas eucariontes y a menudo ocupan los mismos nichos ambientales se trata de una denominación errónea porque son bacterias, no algas, sin embargo, llevan a cabo la fotosíntesis como producción de oxígeno (oxigénicas) como lo hacen las plantas y las algas eucariontes.

Las especies que crecen en el agua suelen tener vacuolas de gas que les proporcionan flotabilidad y ayudan a que la célula flote en un ambiente favorable; las cianobacterias que se mueven sobre una superficie sólida utilizan el mecanismo de deslizamiento. Presentan variaciones morfológicas en las que figuran formas unicelulares que se dividen por simple fisión binaria, formas coloniales que se dividen por fisión múltiple, y formas filamentosas que se reproducen por fragmentación de los filamentos. (Caballero, 2019)

2.2.1.5 Microalgas

Son organismos microscópicos fotosintéticos eucariotas que pueden crecer de manera autotrófica o heterotrófica, capaces de producir oxígeno a partir de la radiación solar. Esta actividad la llevan a cabo gracias a unas estructuras especiales denominadas cloroplastos, en las cuales se encuentran diversos pigmentos (clorofilas, ficobilinas, carotenos y xantofilas) capaces de “atrapar” la luz solar. (Barrientos, 2005; Siddiqui et al., 2015; Caballero, 2019)

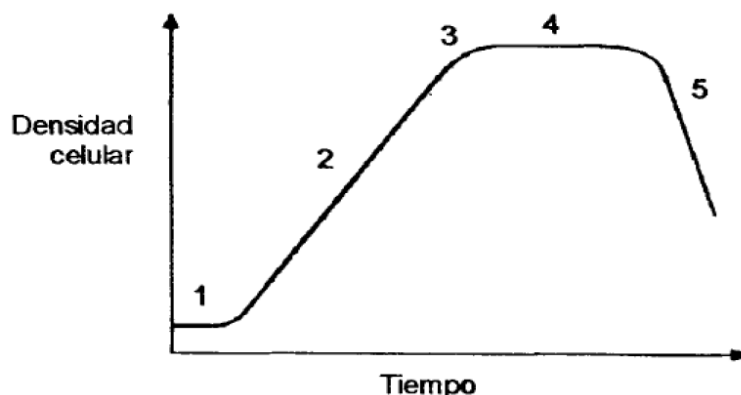
Tienen una alta capacidad para fijar el CO₂ y aprovechar la energía solar para producir biomasa. Así como son ubicuos, tienen una gran diversidad taxonómica. Son el primer eslabón en la cadena trófica. Se calcula que 100 toneladas de microalgas cultivadas absorben 180 toneladas de dióxido de carbono. (Camacho-Rodríguez et al., 2015; Caballero, 2019)

En el crecimiento de las microalgas se reconoce un patrón estándar de crecimiento que comprende las siguientes fases, mismas que se ilustran en la figura 2.1:

1. Fase de retraso o fase de adaptación: Ocurre cuando se observa un incremento limitado en el número de células, pudiendo incluso llegar a disminuir en número con respecto al inóculo inicial.

2. Fase de crecimiento exponencial: Una vez adaptadas al medio de cultivo, las microalgas comienzan a multiplicarse; siendo proporcional la tasa de crecimiento de células a la concentración de éstas.
3. Fase de declinación relativa de crecimiento: En este caso, conforme el cultivo va creciendo se da una disminución de nutrientes, cambios de pH y alteración de otros factores como consecuencia del incremento de la población; de ahí que las microalgas disminuyan su tasa de división celular.
4. Fase estacionaria: Ya no se aprecia una división celular neta, esto es que el número de células alcanzado se mantiene constante por cierto periodo debido al balance entre la natalidad y la mortalidad que presenta la población en cultivo.
5. Fase de muerte: Las células pueden durar en la fase anterior semanas e incluso meses, aunque lo más normal es que comiencen a morir, es entonces cuando se presenta esta fase. (Romo, 2002; Caballero, 2019)

Figura 2.1. Curva representativa de crecimiento de un cultivo de microalgas en un volumen limitado (Romo, 2002; Caballero, 2019).



Las microalgas han atraído mucha atención debido a su alto valor nutricional y alto valor químico como pigmentos y vitaminas, alta tasa de crecimiento en comparación con las plantas superiores y la capacidad para utilizar la energía de la luz. Además, las microalgas contienen diversos componentes bioactivos; por ejemplo, la biomasa seca puede ser usada como alimentos de alto valor proteínico para animales como el camarón y peces. (Demirbas, 2010; Caballero, 2019)

Las microalgas han despertado un creciente interés en diversos ámbitos de la investigación. Su capacidad antioxidante las ha vinculado en numerosos estudios relacionados con la prevención de ciertos tipos de cáncer en seres humanos. En la industria alimentaria, se

emplean para producir alimentos saludables y ricos en proteínas. Además, se han dedicado esfuerzos a la extracción de pigmentos naturales a partir de microalgas, convirtiéndolas en la principal fuente natural de pigmentos altamente demandados en el mercado internacional, como el b-caroteno o la astaxantina.

La biomasa generada a partir de cultivos de microalgas puede ser aprovechada para producir biocombustibles, como el biodiesel. Esto representa una fuente de energía limpia aún subutilizada, ya que no compite con los cultivos destinados a la alimentación humana. En consecuencia, la producción de biocombustibles a partir de microalgas ofrece ventajas significativas en términos de sostenibilidad y preservación del suministro de alimentos.

“Las microalgas constituyen, además, un óptimo agente para la fijación de CO₂ atmosférico, lo que podría contribuir a la reducción de las emisiones de este gas, principal responsable del efecto invernadero” (Caballero, 2019).

2.2.2 Cultivo de microalgas

El concepto de producción masiva de microalgas se llevó a cabo por primera vez en Alemania durante la II Guerra mundial, dirigido a la producción de lípidos para su uso como fuente de combustible. Se utilizaron las microalgas *Chlorella pirenoidosa* y *Nitzschia palea*. Después de la II Guerra mundial comenzó a considerarse la biomasa microalgal como un suplemento importante e incluso, capaz de reemplazar las proteínas animales o vegetales convencionales para consumo directo del ganado o del hombre, acortando la ineficiente cadena alimentaria proteica.

Así, a partir de 1948, un grupo de científicos de la Carnegie Institution de Washington, realizaron el primer trabajo sistemático que establece los fundamentos científicos del cultivo masivo de microalgas. El objetivo de este proyecto era utilizar el alga verde *Chlorella* para la producción a gran escala de alimentos.

Durante los años 50, el interés mundial por la búsqueda de proteínas para la alimentación amplió los estudios a otras microalgas de agua dulce como *Scenedesmus*, *Coelastrum* y *Spirulina*, además de encontrar otras aplicaciones. Se ha sugerido la aplicación de cultivos masivos de microalgas para el tratamiento de aguas residuales y producción de proteínas simultáneamente, asimismo se desarrollaron sistemas para la producción masiva de microalgas para la bioconversión de energía solar en metano. En los años 60 se desarrollaron sistemas

cerrados de cultivo de microalgas para utilizar en misiones espaciales, además se hicieron las primeras pruebas utilizando *Chlorella* en la dieta humana. (González et al., 2011; Caballero, 2019)

En la década de los 70 los trabajos de Woods Hole estimularon el desarrollo de sistemas para el cultivo masivo de microalgas marinas, junto con importantes investigaciones básicas. En la década de los 80 se establecen ya numerosas industrias para la producción de microalgas, sobre todo de *Spirulina* y *Dunaliella*. La producción de *Dunaliella* fue pronto considerada como una de las más prometedoras, por su contenido en β -caroteno y sus propiedades terapéuticas. (Caballero, 2019)

Dependiendo de la composición de su pared celular, el tipo de clorofila y de pigmentos, entre otras características utilizadas para clasificar a estos microorganismos, permiten que, de la gran diversidad de géneros, se puedan seleccionar aquellas que puedan cultivarse. No todas las especies incluidas en este grupo son fotoautótrofas, algunas otras son verdaderamente heterótrofas debido a que no requieren de luz y toman la energía de compuestos orgánicos tales como los azúcares y ácidos orgánicos, de igual forma, muchas especies son mixotróficas, esto es, que pueden reproducirse en presencia de luz o en la oscuridad. (Hoff y Shell, 2001; Romo, 2002; Caballero, 2019)

“Las microalgas fotoautótrofas tienen la capacidad de obtener la energía heterotróficamente, dependiendo de sus necesidades alternando en la utilización de la energía luminosa y su transformación a la energía química utilizando bióxido de carbono, así como sustancias orgánicas” (Caballero, 2019).

2.2.3 Aspectos importantes del cultivo de microalgas

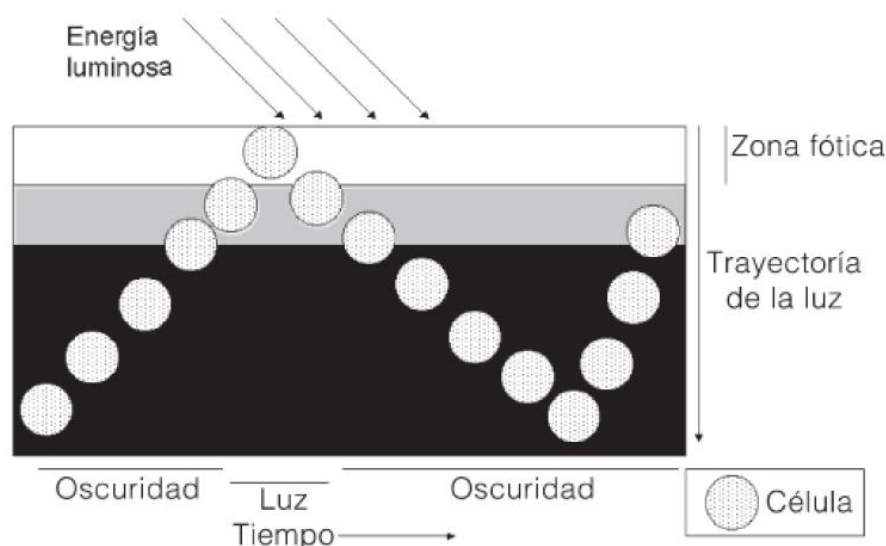
Se tuvieron en cuenta los siguientes elementos, ya que se consideran esenciales en el cultivo de microalgas. La contaminación en los cultivos de microalgas puede manifestarse en forma biológica, química o física. No obstante, dicha contaminación puede afectar de manera individual a cada uno de estos aspectos o puede ser una combinación de los tres tipos mencionados.

2.2.3.1 Luz

Para el cultivo de microorganismos fototróficos, la luz es un requerimiento esencial. El suministro de una luz adecuada, al mismo tiempo que se controla la temperatura, no es una tarea sencilla. Exponiendo los cultivos a la luz del día puede obtenerse una iluminación relativamente incontrolada y discontinua. Debe evitarse la exposición directa a la luz del sol, porque la intensidad puede ser demasiado elevada y la temperatura puede subir hasta un punto en donde el crecimiento se detiene. Muchos microorganismos fototróficos pueden tolerar una iluminación continua y su desarrollo es mucho más rápido bajo estas condiciones, por lo que las fuentes de luz artificial son más ventajosas. (Domínguez, 2014; Caballero, 2019)

“La radiación luminosa es aquella que está comprendida entre 380 y 750 nm. Dentro de esta se engloba la radiación que tiene influencia en la fotosíntesis o Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR, del inglés Photosynthetically Active Radiation)” (Plasencia, 2012; Caballero, 2019).

Figura 2.2. Trayectoria de la luz y de los ciclos luz/oscuridad (Contreras et al., 2013; Caballero, 2019).



En cualquier tipo de sistema de cultivo, las células ubicadas cerca de la superficie iluminada actúan como una barrera que impide que la luz penetre hacia el interior del medio de cultivo, lo que resulta en un efecto de sombreado sobre las células más alejadas de la superficie. En algunos cultivos, se ha determinado que la luz solo alcanza a penetrar entre 1 y 2 mm más allá de la superficie. Esto significa que la zona donde se produce la fotosíntesis,

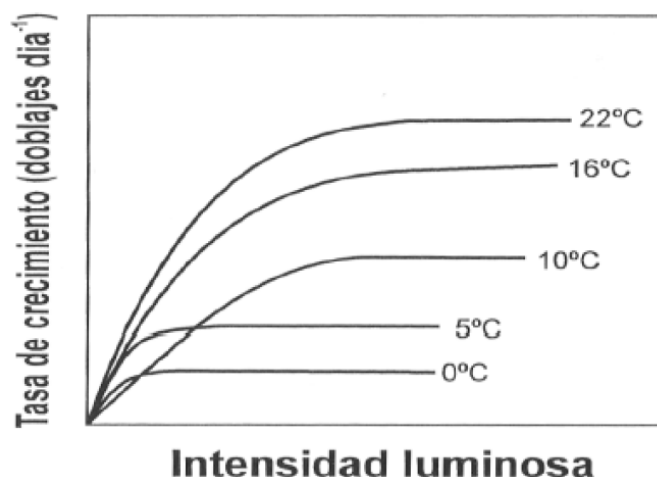
conocida como zona fótica, representa solo una pequeña fracción (10-30%) del volumen total del cultivo.

2.2.3.2 Temperatura

La temperatura del cultivo depende principalmente de la microalga que se emplee y de sus características, pero por otra parte el valor óptimo puede variar en función de los valores de los demás parámetros. Así, la temperatura en condiciones naturales generalmente no coincide con la temperatura óptima en condiciones de cultivo porque los parámetros de cultivo difieren a su vez de los que se dan en su ambiente natural. (Plasencia, 2012; Caballero, 2019)

En la figura 2.3 se muestra que existe un nivel de iluminación adecuado para cada temperatura de cultivo.

Figura 2.3. Evolución de la tasa de crecimiento en función de la intensidad luminosa para distintas temperaturas (Abalde, 1995; Caballero, 2019).



2.2.3.3 Agitación

La agitación asegura la distribución homogénea de las células y los nutrientes dentro del cultivo, para así, disponer mejor su aprovechamiento; mejora la distribución de la luz a las células, asegurando que permanezcan fotosintéticamente activas, evitando que se sedimenten y previniendo una estratificación térmica. En el caso de cultivos a escala laboratorio, la agitación puede realizarse a través de un compresor de acuario y/o ser complementada con la adición de CO₂ para lograr la agitación y enriquecer el cultivo con más carbono disponible para el metabolismo celular. (Giordano et al., 2015; Caballero, 2019)

2.2.3.4 pH

La medida del pH en el medio de cultivo es una referencia clave para el desarrollo de un cultivo. El medio de cultivo se alcaliniza por el consumo de la fuente de carbono, lo que genera bases como el NaOH. La medición del pH puede convertirse en una evaluación cuantitativa de la cantidad de biomasa en el medio. A mayor biomasa, mayor degradación de bicarbonato y por consiguiente se eleva la concentración de grupos hidroxilos en el medio, aumentándose así el pH. (Rodríguez y Triana, 2006; De Godos et al., 2014; Caballero, 2019)

2.2.3.5 Macronutrientes, micronutrientes y vitaminas

Las microalgas tienen necesidades nutricionales similares a las plantas superiores, con la diferencia de que varias especies requieren vitaminas para alcanzar su máximo potencial de crecimiento. En la vida natural de las microalgas, los nutrientes suelen almacenarse en exceso en relación con sus necesidades habituales. Esto significa que el crecimiento puede continuar durante cierto tiempo incluso después de que los nutrientes en el medio hayan alcanzado su valor más bajo posible. En términos generales, se ha observado que las microalgas requieren una variedad de nutrientes y vitaminas, y la cantidad necesaria varía según la especie de microalga en cuestión.

Para que las microalgas puedan crecer de manera adecuada, necesitan obtener macronutrientes, que son utilizados para sintetizar compuestos orgánicos, así como micronutrientes, que funcionan como catalizadores. Es importante que exista un equilibrio adecuado entre la proporción de estos nutrientes, ya que cualquier desbalance puede resultar en una disminución en el crecimiento e incluso detenerlo por completo.

Por macronutrientes se consideran la fuente de nitratos, fosfatos y en el caso de las diatomeas la adición de silicatos. Con respecto a los micronutrientes son aquellos que se suministran en poca cantidad (trazas) en comparación con los anteriores mencionados. Además de los macro y micronutrientes, existen otras sustancias que son requeridas por las microalgas para obtener mejor crecimiento, estas sustancias requeridas son las vitaminas entre las que se encuentran la tiamina (B1), cianocobalamina (B12), y biotina (B6). (Giordano et al., 2015; Caballero, 2019)

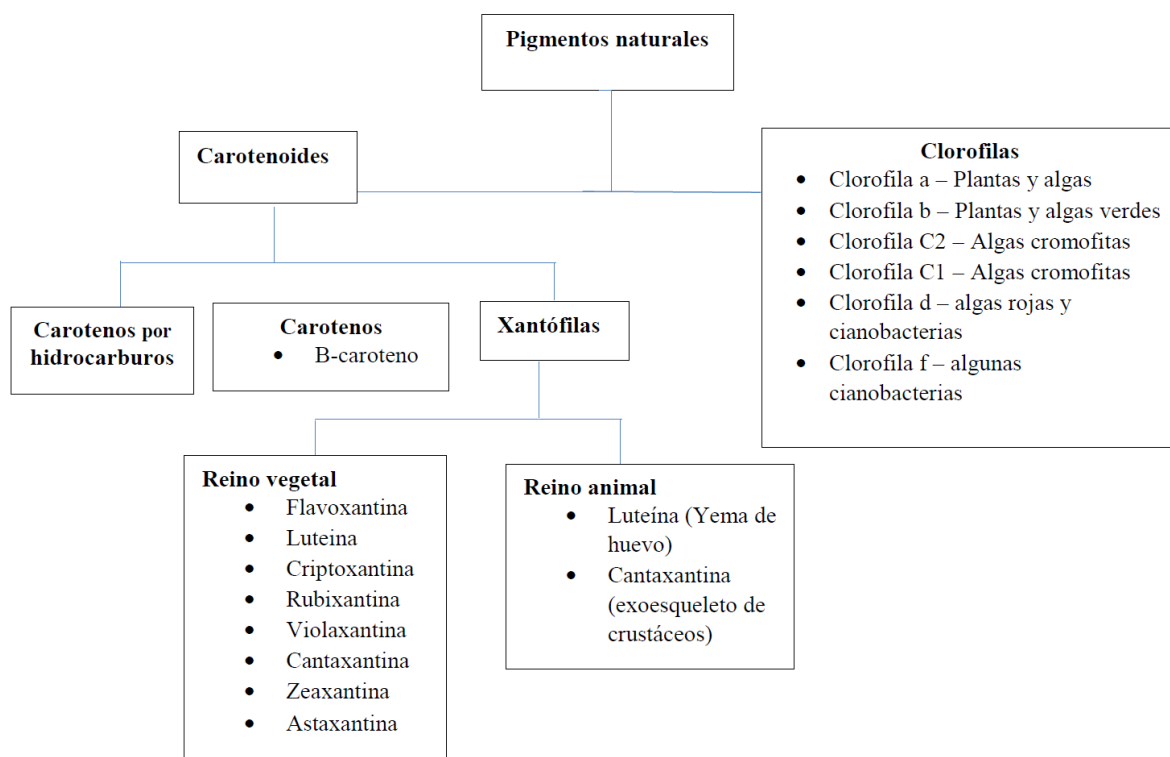
2.2.4 Pigmentos naturales

2.2.4.1 Clorofila

La concentración de pigmentos fotosintéticos varía ampliamente y depende del metabolismo algal y de factores fisicoquímicos como la luz, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes. Los pigmentos algales consisten principalmente en clorofilas (a, b y c) y carotenoides (carotenos y xantofilas). Para estimar su concentración el método consiste en extraer los pigmentos mediante un solvente orgánico y leer en un espectrofotómetro la absorción de luz a la longitud de onda específica para cada pigmento. (Cañizares-Villanueva y Perales, 2012; Caballero, 2019)

En la figura 2.4 se muestra la clasificación de los pigmentos naturales contenidos en las algas, principalmente divididas en carotenoides y clorofilas.

Figura 2.4. Clasificación de los pigmentos naturales (Meléndez-Martínez et al., 2007; Caballero, 2019).



2.2.4.2 Xantófilas

Los carotenoides son moléculas con capacidad de absorber energía luminosa en ciertas longitudes de onda, debido a la presencia de múltiples enlaces dobles conjugados. Estos compuestos están constituidos por carbono e hidrógeno y presentan colores en el rango del amarillo al rojo. Las xantofilas se caracterizan por tener presencia de oxígeno dentro de su molécula (Cañizares- Villanueva y Perales, 2012; Caballero, 2019). Químicamente la mayoría de los carotenoides son tetraterpenoides, compuestos de 40 átomos de carbono formados por ocho unidades de isoprenoides o terpenos (hidrocarburo de 5 átomos de carbono) unidas de forma que la secuencia se invierte en el centro de la molécula. Los carotenoides pueden dividirse en dos grandes grupos: Carotenos que son hidrocarburos y xantofilas que contienen átomos de oxígeno. (Meléndez-Martínez et al., 2007; Kasiri et al., 2015; Caballero, 2019)

2.2.5 Reología

El término reología fue inventado por el profesor Eugene Bingham Lafayette en 1929 y fue definido como “Ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia bajo fuerzas externas”, más tarde la reología también fue establecida como la ciencia de la deformación y flujo de la materia. Bird et al. (2006) la definen como “la ciencia que incluye todos los aspectos del estudio de la deformación y el flujo de sólidos no-hookeanos y líquidos no-newtonianos”.

2.2.6 Biofijación de dióxido de carbono por microalgas

La fijación biológica del CO_2 puede llevarse a cabo por plantas superiores y microalgas, sin embargo, las microalgas poseen una mayor capacidad de fijar CO_2 . El CO_2 puede provenir de diversas fuentes: CO_2 atmosférico, de las industrias, de los gases de escape como son gases de combustión. (Caballero, 2019)

Las microalgas tienen la capacidad de crecer en prácticamente cualquier lugar donde reciban suficiente luz solar. Al igual que algunas plantas, las microalgas utilizan la fotosíntesis para transformar la energía solar en energía química, la cual almacenan en forma de aceites, carbohidratos y proteínas. Debido a su capacidad para llevar a cabo la

fotosíntesis de manera eficiente, estos microorganismos experimentan una tasa de crecimiento elevada, lo que les permite crecer rápidamente.

La tolerancia de varias especies de microalgas en la concentración de CO_2 es variable, sin embargo, las concentraciones de CO_2 en la fase gaseosa, no necesariamente reflejan la concentración de CO_2 a la que está expuesta durante su suspensión en el cultivo, que depende del pH y del gradiente de concentración de CO_2 creado por la resistencia a la transferencia de masa. (Kumar et al. 2010; Caballero, 2019)

Para que las microalgas puedan alcanzar un rendimiento óptimo, es necesario que cuenten con una cantidad adecuada de CO_2 en los estanques o biorreactores donde se cultivan. Por lo tanto, es común acoplar el sistema de biorreactores con hornos de combustión que generan CO_2 , de modo que este gas pueda suministrarse al biorreactor y ser asimilado por las microalgas.

Las tecnologías que utilizan microalgas tienen el potencial de ser una herramienta fundamental para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por centrales eléctricas de carbón y otros procesos industriales intensivos en carbono. Debido a su alto contenido de lípidos y su capacidad para crecer en diversas condiciones, muchas empresas están explorando la posibilidad de utilizar microalgas para producir combustibles y productos químicos de manera más económica que las materias primas convencionales. “El objetivo de la biofijación de CO_2 por microalgas en sistemas a gran escala es remover una fracción significativa del suministro de CO_2 inicial, obteniendo principalmente oxígeno y biomasa” (Caballero, 2013).

2.3 Biorreactores para la producción de microalgas

En los años 1950, se planteó por primera vez la idea de utilizar la luz solar y el agua marina para cultivar microalgas en grandes cantidades, las cuales son ricas en proteínas de alta calidad. Esta propuesta sugiere que el cultivo masivo de microalgas podría ser una excelente alternativa para obtener alimentos nutritivos para el consumo humano.

En el transcurso de los años se pudieron diversificar las áreas donde las microalgas eucariotas y cianobacterias cultivadas masivamente tienen aplicaciones prometedoras, especialmente en la producción de productos químicos finos y

combustibles en el tratamiento de aguas residuales como intercambiadores iónicos y biofertilizantes. (Raeesossadati et al., 2014; Caballero, 2019)

Gran variedad de estudios de investigación de diferentes estrategias para la captura de CO₂ se han llevado a cabo desde 1990, de los cuales, los métodos biológicos, en particular la biofijación utilizando microalgas en fotobiorreactores, han ganado mayor interés. Las microalgas tienen una mayor capacidad de fotosíntesis que las plantas terrestres, lo cual plantea la posibilidad de que se pueden utilizar con efectividad para la remoción de CO₂. (Liao et al., 2014; Caballero, 2019)

“Existen algunos reportes publicados sobre la eliminación de CO₂ y recuperación de O₂ en espacios cerrados usando la producción fotosintética de microalgas, que está siempre acompañado por el consumo de CO₂ y la generación de O₂” (Chaudhary et al., 2018; Caballero, 2019).

A través de la fotosíntesis, se puede eliminar el CO₂, mientras que se produce oxígeno (O₂), por lo que no será difícil satisfacer la demanda de limpieza de aire. La eliminación del CO₂ en un entorno cerrado, por microalgas cultivadas en un biorreactor, es uno de los métodos de bioregeneración más importante para garantizar un medio ambiente seguro y confiable. (Shabnam, 2015; Caballero, 2019) Por otro lado, los métodos de alimentación de CO₂ necesitan mejorarse aún más. A pesar de que un intercambio eficiente del gas es uno de los cuatro objetivos básicos para la alta densidad en el cultivo de microalgas autótrofas en fotobiorreactores cerrados, el transporte directo por las burbujas siempre ha sido el método comúnmente adoptado para el suministro de gas. (Ward et al., 2014; Caballero, 2019)

Hay dos enfoques fundamentales para la producción de microorganismos fotoautótrofos: los sistemas abiertos y los sistemas cerrados, también conocidos como fotobiorreactores. En los sistemas abiertos, el cultivo de microorganismos se expone al entorno externo, sin barreras físicas que lo separen del ambiente circundante. Mientras que, en los sistemas cerrados, como los fotobiorreactores, el cultivo se mantiene en un espacio controlado, con un contacto mínimo o nulo con el exterior, gracias a barreras físicas que lo aíslan del entorno externo.

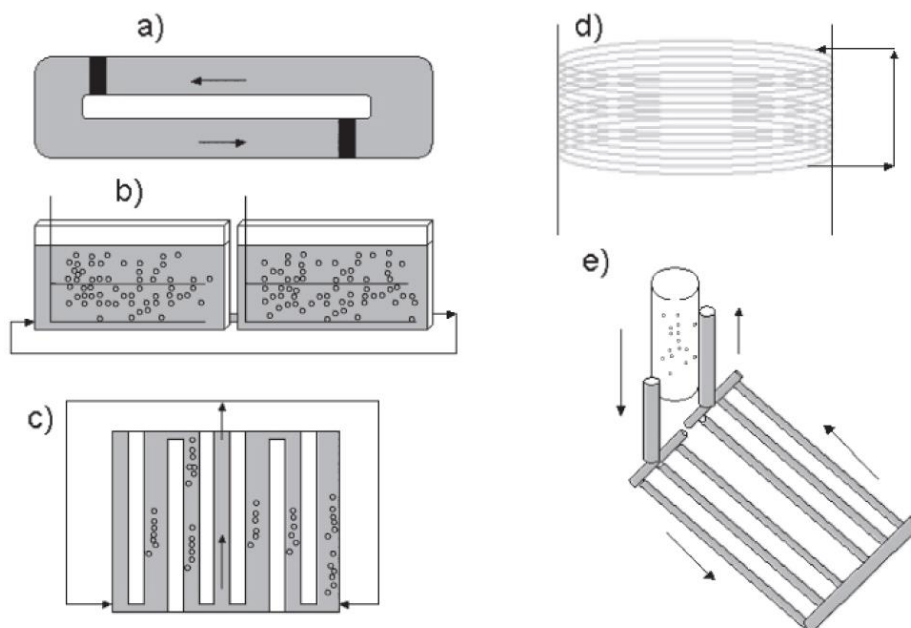
Los fotobiorreactores tubulares y de placas planas han recibido mucha atención ya que permiten establecer cultivos de alta densidad celular, tres o más veces en comparación con los sistemas convencionales de carrusel. Tiene como ventajas la

factibilidad para cosechar biomasa, mantenimiento del cultivo sin contaminación, mejor control de las condiciones de cultivo, mejor inversión de capital en el fotobiorreactor; éste último factor es un elemento importante en el costo de producción de productos derivados de microalgas. (Wang et al, 2012; Caballero, 2019)

Tipos básicos de fotobiorreactores de acuerdo con (Contreras et al, 2003) y mencionado por (Caballero, 2019), se muestran en la figura 2.5:

- Tipo carrusel, vista superior, los bloques negros indican propelas.
- Tipo plano, vista horizontal.
- Con iluminación interna, los bloques blancos indican espacios de iluminación.
- Tipo serpentín.
- Tipo tubular horizontal con sistema airlift (burbujeo).

Figura 2.5. Tipos básicos de fotobiorreactores (Contreras et al, 2003; Caballero, 2019).



Teniendo en cuenta que los sistemas cerrados ofrecen más ventajas sobre los sistemas abiertos, entre las que se encuentran mejor calidad en la biomasa producida, un alto control de las condiciones de cultivo y eficiencia del proceso, bajo riesgo de contaminación del cultivo, flexibilidad de operación y cero dependencia del clima, se han propuesto una gran variedad de diseños en sistemas cerrados tales como los fotobiorreactores, que van desde nivel laboratorio hasta escala industrial, sin embargo a pesar de la variabilidad de los fotobiorreactores, los cuales

han estado bajo condiciones de desarrollo durante la década pasada, solo algunos pueden ser utilizados para la producción de biomasa óptima. (Singh et al., 2012; Caballero, 2019)

2.3.1 Fotobiorreactor tubular del Tecnológico de Orizaba

En el laboratorio de investigación de la maestría en ingeniería química, se tiene un fotobiorreactor tubular, en el cual se basará el modelo de simulación a proponer.

Figura 2.6. Fotobiorreactor tubular del Tecnológico de Orizaba.



2.4 Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una metodología desarrollada por Jay W. Forrester que se enfoca en el modelado y la simulación de procesos complejos. Es la técnica para analizar y modelar el comportamiento temporal en entornos complejos. Se basa en

la identificación de los bucles de realimentación entre los elementos, y también en las demoras en la información y materiales dentro del sistema. (Forrester, 1961)

2.4.1 Metodología de la dinámica de sistemas

Para llevar a cabo la modelación es importante la formulación matemática, es decir, se deben definir las ecuaciones diferenciales que pueden representar el comportamiento evolutivo del sistema estudiado. Para la modelización se recomiendan tres etapas fundamentales:

- 1) A partir del diagrama causal se eligen las variables que sean de acumulación (variables de estado).
- 2) Responder a las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los flujos que llenan o vacían estas variables de estado?
- 3) Identificar de qué dependen los flujos esquematizados (variables de información o material) así como el tiempo que define las influencias positivas y negativas.

Existe una metodología en Dinámica de Sistemas propuesta por (Stermán, 2000) y (Cedillo y Sánchez, 2008) para un mejor análisis.

2.4.1.1 Etapa 1: Definición del problema y conceptualización del modelo

- 1) Selección del escenario.
- 2) Definir el propósito del modelo.
- 3) Identificar las variables críticas.
- 4) Establecer el horizonte del tiempo.
- 5) Establecer las relaciones entre variables.
- 6) Formular las hipótesis dinámicas.
- 7) Elaboración del diagrama causal.

De acuerdo con lo mostrado anteriormente, durante esta etapa se realiza la definición respecto a qué se espera del modelo y qué tiempo se desea tener como referencia, enumerando las variables básicas con las cuales se puede empezar a trabajar y desde luego crear el diagrama causal observando el efecto que produce una con otra. (Delgado, 2021)

2.4.1.2 Etapa 2: Construcción del modelo formal

- 1) Construir el diagrama de Forrester.
- 2) Establecer las ecuaciones matemáticas.

- 3) Estimar los valores numéricos de los parámetros y variables.
 - 4) Probar la consistencia interna del modelo, así como de las hipótesis dinámicas.
- Una vez teniendo el modelo causal se trabaja en la parte analítica de la metodología, ya que el objetivo es modelar la parte matemática del sistema, es decir, a través del diagrama de Forrester se analizan las ecuaciones diferenciales del modelo. Estas ecuaciones representan el análisis matemático a través del tiempo del modelo de simulación. (Delgado, 2021)

2.4.1.3 Etapa 3: Evaluación

- 1) Probar la congruencia en el comportamiento del modelo bajo condiciones extremas.
 - 2) Comparar la estructura y comportamiento del modelo con la realidad.
 - 3) Realizar análisis de sensibilidad y documentar las respuestas.
- Para respaldar y validar el modelo creado es necesario evaluarlo mediante diversos escenarios, los cuales pueden ser reales o hipotéticos, mismos que darán como resultado analizar la lógica de este y validarlo. Además, la sensibilidad es de gran importancia para evaluar los cambios producidos dentro del sistema. (Delgado, 2021)

2.4.1.4 Etapa 4: Mejora del diseño e Implementación

- 1) Observar y analizar el comportamiento del modelo bajo diferentes escenarios.
 - 2) Presentar el modelo en una forma accesible al usuario.
- La etapa final permite obtener una mejora en los modelos que se plantean, además de que en el software se tiene la posibilidad de evaluar diferentes escenarios en los modelos a través de su interfaz, lo cual permite explorar áreas de naturaleza más compleja. (Delgado, 2021)

2.5 Teoría de la resolución de problemas inventivos (TRIZ)

La principal idea de los investigadores de TRIZ fue que se resolvía un problema eliminando una contradicción.

2.5.1 Contradicción

Una de las primeras ideas de los investigadores de TRIZ fue que resolver un problema significaba eliminar una contradicción. Si comparamos la metodología de resolución de problemas TRIZ con un árbol, el concepto de contradicción se puede comparar con la semilla, a partir de la cual podemos hacer crecer todo el árbol. Si quisiéramos expresar la idea de TRIZ con una sola palabra, esa palabra sería “contradicción”. (Rantanen & Domb, 2008)

2.5.1.1 Contradicción física

Esta contradicción exige la existencia simultánea de dos estados mutuamente exclusivos, correspondientes a una función o componente del sistema. Ejemplo de ello son piezas del sistema que deben ser lisas y rugosas al mismo tiempo; frías y calientes; suave y duro, etc. Este tipo de contradicciones son resueltas utilizando los principios de separación (en el tiempo, en el espacio, entre el todo y sus partes, o bajo condiciones). (Altshuller, 1986; Delgado, 2021)

2.5.1.2 Contradicción técnica

“Es un tipo de contradicción donde, la mejora de un parámetro o característica útil de un sistema provoca la degradación de otro parámetro o característica también útil y viceversa. Estas son resueltas mediante la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas” (Altshuller, 1997; Delgado, 2021).

2.6 Software para la simulación del modelado del proceso

La simulación es una herramienta que permite a las organizaciones predecir, comparar y optimizar los resultados de un proceso sin incurrir en los costos y riesgos asociados. Su valor radica en su capacidad para ayudar a las empresas a plantear estrategias de manera experimental, generando observaciones en las variables clave y realizando análisis estadísticos de los datos obtenidos. En resumen, la simulación es importante porque permite a las organizaciones explorar escenarios y tomar decisiones informadas sin incurrir en gastos y riesgos reales.

Para la simulación, se utilizará el software llamado Stella© el cual se basa en ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema y con ello se puede determinar el sistema más eficiente del funcionamiento de un biorreactor, con menor consumo de nutrientes y mayor producción de energía.

Capítulo 3. Aplicación de la Metodología TRIZ + DS

3.1 Fase 1. Conceptualización

3.1.1 Descripción del problema y sus componentes estableciendo condiciones iniciales

Un fotobiorreactor es un dispositivo capaz de cultivar masivamente microalgas. La función de las microalgas es la absorción de CO_2 , ya que es una fuente de alimentación para ellas. Al ser un sistema biológicamente activo, este presenta variables que pueden afectar y/o mejorar el desarrollo de las microalgas.

Condiciones iniciales:

- a) La intensidad luz es un factor muy importante para llevar a cabo la fotosíntesis, las microalgas deben estar expuestas a luz continua y uniforme. La luz natural ha sido considerada en las primeras investigaciones documentales sobre biorreactores de microalgas pero ha sido poco efectiva pues no llega a iluminar a todas las microalgas del núcleo del biorreactor, solo las de la superficie, además de que se depende del estado del tiempo, por ello se desarrolló la creación de fotobiorreactores, biorreactores con luz artificial.
- b) El medio de cultivo de microalgas es una mezcla de nutrientes establecidos por una NOM, por lo que solo se contemplarán las cantidades de la solución y no de los ingredientes. La reproducción de las microalgas depende de su alimentación y el pH depende de la reproducción de las microalgas, la concentración del CO_2 va a depender del pH. Y a su vez estas variables dependen de la agitación y la intensidad de la luz en el sistema.
- c) La temperatura se ha manejado como tal una temperatura ambiente en las investigaciones documentales de apoyo para esta tesis.

La creación de un modelo ideal para un fotobiorreactor de microalgas, debe contemplar que todas las variables convergen entre sí, son parte de un sistema y pueden tener parámetros establecidos, pero en el momento en que modificas una cambia todo el sistema.

3.1.2 Identificar las variables críticas del modelo y hacer un Diagrama Causal de Bucle (CLD)

Microalga: El tipo de microalga a producir influye en la selección del medio de cultivo y el pH.

Medio de cultivo: Se selecciona de acuerdo al tipo de microalga a producir.

Rotación: La agitación es indispensable en un fotobiorreactor ya que permite que el medio de cultivo y el CO₂ se disperse en todo el contenedor, que no haya estancamiento de población y con ello se impida el paso de luz a algunas zonas.

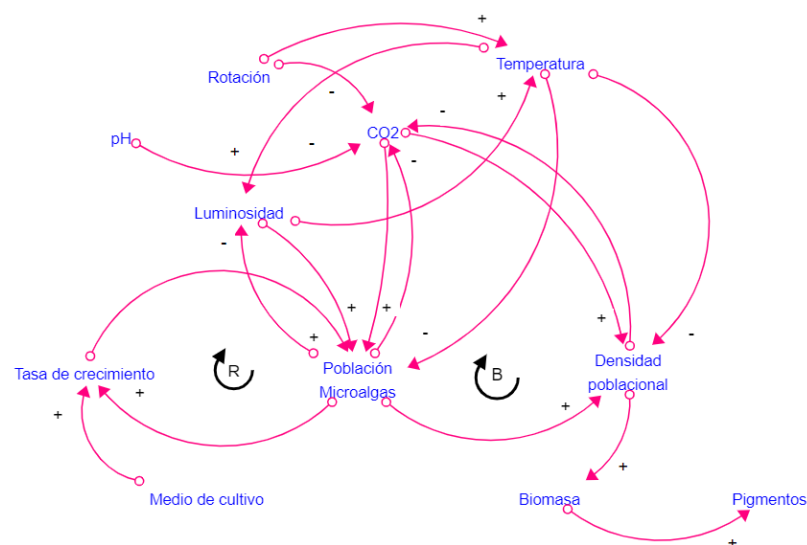
Luz: La intensidad de la luz es de gran importancia y se utiliza luz artificial para que esta sea constante y uniforme en todo el contenedor. De ella depende el desarrollo de la microalga.

CO₂: Este gas es muy importante para llevar a cabo el crecimiento de las microalgas y la fotosíntesis. Además de controlar la presencia de O₂, el cual inhibe el crecimiento de las microalgas.

Temperatura: La temperatura es un factor importante, pero con un amplio parámetro de aceptación, por lo que se mantiene a temperatura ambiente el fotobiorreactor. De acuerdo al tipo de microalga es el parámetro de temperatura aceptable.

pH: Este parámetro se debe estar monitoreando para mejorar el aprovechamiento de CO₂ por la microalga.

Figura 3.1. Diagrama de Causal de Bucle.



3.1.3 Aproximación al comportamiento del sistema ideal

De acuerdo a la investigación bibliográfica, las condiciones ideales para la producción masiva de microalgas en un fotobiorreactor se muestran en la tabla 3.1.

La microalga *Chlorella* spp tiene con el medio de cultivo Bold Basal (MBB) tiene un punto máximo de crecimiento de 7.26×10^7 al día 15 con la dosis de 1.5 mL/L.

La microalga *Spirulina* máxima tiene con el medio de cultivo UTEX crecimiento de 1.81×10^6 al día 25 con la dosis de 150%.

Bajo iluminación por fotoperiodos de 4000 lux de 12:12 luz:oscuridad mediante 2 lámparas fluorescentes de luz fría de 20 Watts cada una, a temperatura ambiente y con sistema de aireación constante mediante burbujeo, esto con el objetivo de que las microalgas no se sedimenten y la luz pueda penetrar de forma uniforme al cultivo.

Tabla 3.1. Condiciones ideales para la producción de microalgas de acuerdo a datos bibliográficos.

Variables	Microalga	
	<i>Chlorella</i> spp	<i>Spirulina</i> máxima
Medio de cultivo	Bold Basal (MBB)	UTEX
	1.5 ml/L	150%
Rotación	10 L/d	
Luz	4000 lux de 12:12 luz:oscuridad	
CO ₂	2%	
Temperatura	20 a 35 °C	20 a 35 °C
pH	7.90 a 10.10	8.0 10.60

3.1.4 Identificar los bucles más importantes que generan contradicciones

Gracias al diagrama de bucle generado de la interacción de las variables, se puede concluir que estas son las variables que mayor interacción tienen y por lo tanto generan contradicciones.

Población microalgas, rotación, luminosidad, CO₂, temperatura, pH y densidad poblacional.

En el diagrama de bucle de igual manera se identifican las variables de acuerdo a su ubicación: variable de flujo, variable de estado y variable auxiliar, como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Variables detectadas en el diagrama causal de bucle.

Variable	Descripción
Medio de cultivo	Variable de flujo
Población microalgas	Variable de flujo
Densidad poblacional	Variable de flujo
Rotación	Variable auxiliar
Temperatura	Variable auxiliar
CO ₂	Variable auxiliar
pH	Variable auxiliar
Luminosidad	Variable auxiliar
Biomasa	Variable auxiliar
Pigmentos	Variable auxiliar

3.1.5 Formular contradicciones físicas o técnicas y pasar a la fase dos

3.1.5.1 Contradicciones físicas

Las microalgas deben tener una alimentación balanceada para que al momento de absorber el CO₂ estas no aumenten excesivamente su tamaño y esto impida el paso de la luz.

La rotación interna debe ser rápida para que no haya adherencia de microalgas en las paredes, pero debe ser lenta para que esto no dañe la pared celular de las microalgas.

Las paredes del fotobiorreactor deben ser gruesas para soportar el proceso, pero no tan gruesas para que permita el paso de la luz.

3.1.5.2 Contradicciones técnicas

El CO₂ es una fuente de alimentación de las microalgas, de una buena cantidad depende su crecimiento, pero no tanta ya que aumentaría la densidad poblacional exponencialmente.

El medio de cultivo debe ser bastante, pero no demasiado sino aumenta el pH y debe mantenerse en su parámetro ideal de lo contrario no habría buena dispersión del CO₂.

La aireación (rotación) dentro del sistema debe ser suficiente para poder dispersar el CO₂, pero no tan rápida para no aumentar la temperatura y dañar las microalgas.

Medio de cultivo y el CO₂ deben ser suficientes para el crecimiento y reproducción de las microalgas, pero no tanto para no aumentar excesivamente su densidad celular.

De la luz depende la fotosíntesis y es necesario que la mayor parte del tiempo este bien iluminado el fotobiorreactor para que las microalgas sigan creciendo en población, sin embargo, tampoco debe ser demasiada luz sino aumenta la temperatura en el sistema y las microalgas mueren.

3.2 Fase 2. Análisis de contradicciones

3.2.1 Contradicciones físicas

1. Las microalgas deben tener una alimentación balanceada para que al momento de absorber el CO₂ estas no aumenten excesivamente su tamaño y esto impida el paso de la luz.
2. La rotación interna debe ser rápida para que no haya adherencia de microalgas en las paredes, pero debe ser lenta para que esto no dañe la pared celular de las microalgas.
3. Las paredes del fotobiorreactor deben ser gruesas para soportar el proceso, pero no tan gruesas para que permita el paso de la luz.

3.2.1.1 Identificar variables con efectos positivos y nocivos

Variables con efectos positivos:

El medio de cultivo de una microalga, es una fuente de alimentación, la cual les ayuda a desarrollarse y crecer su población.

De igual manera el CO₂ influye en el desarrollo y crecimiento de la microalga, ya que está directamente relacionado con el proceso de fotosíntesis.

La aereación o rotación interna, es de gran importancia, gracias a tener un sistema aireado, los gases se pueden involucrar bien en el sistema, el CO₂ ser absorbido por las microalgas y el O₂ liberado. Además de que evita que las microalgas se adhieran a la pared y con ello impida el paso de la luz.

La iluminación es una fuente vital para que exista la fotosíntesis, sin ella la la microalga finalmente moriría.

Variables con efectos nocivos:

La fuente de alimentación de la microalga debe ser balanceada, para que el sistema no se sature y, que al haber una sobrepoblación de microalgas, este no se controle y mueran por falta de iluminación, CO₂ o alimento.

La presencia de O₂ suficiente en el sistema puede provocar la muerte de las microalgas, ya que para ellas este gas es nocivo, sin aereación suficiente no se puede liberar todo el O₂.

La aereación o rotación interna, puede llegar a ser nociva cuando no es suficiente y esto trae como consecuencia que las microalgas se adhieran a la pared del fotobiorreactor e impidan el paso de luz. Así mismo puede ser nociva cuando esta es demasiada y rompe la pared celular de las microalgas, ya que estas son muy sensibles.

La iluminación es una fuente vital para que exista la fotosíntesis, sin ella la la microalga finalmente moriría.

3.2.1.2 Seleccionar uno de los cuatro principios de separación: tiempo, espacio, partes y condiciones

Adhesión de microalgas en la pared del fotobiorreactor

Separación en el tiempo: En un momento hay mucho flujo y turbulencia. Posteriormente se detiene para volver a comenzar nuevamente. Se debe buscar que algo incida en el momento en que este se detiene y mantenga en movimiento el flujo interior para que las microalgas no se adhieran a la pared.

Separación en el espacio: No se tiene determinada la velocidad de desplazamiento del fluido, es tentativa, así como solo se tiene flujo en una parte del fotobiorreactor, lo cual genera estancamiento en una parte porque no está fluyendo el mismo líquido del otro lado. Se tiene que buscar que el flujo influya en todos los ángulos.

Separación bajo condiciones: El movimiento del fluido por sí mismo reduce la adherencia en las paredes. Se tiene que buscar que este movimiento sea uniforme en todo el fotobiorreactor. O bien que un objeto limpie las paredes internas del fotobiorreactor cada determinado tiempo, una barra que pase de arriba abajo limpiando y que ese exceso de microalgas se extraigan y se utilicen como biomasa.

Separación entre el todo y sus partes: Buscar la manera de que dentro del fotobiorreactor se limpien las paredes y esto evite que se adhieran microalgas a ella. Esto puede solucionarse con un limpiador magnetizado, que una a dos imanes, uno dentro y otro fuera, y el objeto limpiador sea delgado que no ocupe demasiado espacio ni que afecte el desarrollo de las microalgas.

Iluminación ineficiente

Separación en el tiempo: Durante el día se mantiene la luz ambiental, sin embargo, no todo el tiempo es uniforme por lo que genera inestabilidad en el sistema, así mismo la luz artificial que se tiene para el periodo de la noche, no cubre todo el fotobiorreactor, sería una recomendación que el fotobiorreactor se moviera de acuerdo al movimiento del sol y en la noche se movieran las luces led en determinados horarios para cubrir la luminosidad en todas las áreas.

Separación en el espacio: La luz no llega a todas las paredes del fotobiorreactor con la misma intensidad, podría recomendarse que el fotobiorreactor rotara para que la luz fluyera en todas las paredes del mismo.

Separación bajo condiciones: No se tiene una buena iluminación ni en el día ni en la noche, se debe generar una luz artificial que sea uniforme en todo el fotobiorreactor durante todo el día.

Separación entre el todo y sus partes: La intensidad luminosa que llega a las paredes del fotobiorreactor debe ser la misma en todas las zonas del mismo, podría adaptarse una placa de leds que se distribuyan alrededor del fotobiorreactor.

3.2.1.3 Usar recursos y efectos (si es necesario) para buscar el sistema ideal

Un sistema ideal se refiere a un diseño óptimo que maximiza la eficiencia y el rendimiento de la producción de microalgas. Estas son las características que debe tener el sistema ideal:

Transferencia eficiente de CO₂: El sistema ideal debe permitir el suministro adecuado de del CO₂ a las microalgas dentro del fotobiorreactor, con el fin de maximizar el crecimiento y la productividad. La solución es poner dos puntos de entrada de CO₂ para que con la aireación este se distribuya por todos los puntos del fotobiorreactor.

Eficiencia de captura de luz: El sistema ideal debe tener una alta eficiencia en la captura de luz solar para proporcionar la energía necesaria para la fotosíntesis. Esto se puede lograr con un diseño tubular giratorio, para que todas las partes del biorreactor estén iluminadas, esto durante el día, para la noche, se deben encender las luces artificiales, ya sea poner una placa de luces alrededor del fotobiorreactor o seguir con el modo giratorio de este y adaptar dos placas de luz en puntos estratégicos para que vayan iluminando el fotobiorreactor uniformemente.

Recolección eficiente de biomasa: El sistema ideal debe facilitar la recolección eficiente de la biomasa generada por las microalgas. Esto podría incluir métodos de separación

sólido-líquido eficaces y sistemas de recolección que minimicen la pérdida de biomasa y maximicen la recuperación.

Fácilmente adaptable: El sistema ideal debe poder adaptarse a diferentes capacidades de producción y tamaños de fotobiorreactor y que el consumo de energía o recursos sea proporcional a la escala.

3.2.1.4 Si hay otra contradicción, repetir estos pasos, si no las hay, analizar contradicciones técnicas

No se encuentra otra contradicción física.

3.2.2 Contradicciones técnicas

- 1) El CO₂ es una fuente de alimentación de las microalgas, de una buena cantidad depende su crecimiento, pero no tanta ya que aumentaría la densidad poblacional exponencialmente.
- 2) El medio de cultivo debe ser bastante, pero no demasiado sino aumenta el pH y debe mantenerse en su parámetro ideal de lo contrario no habría buena dispersión del CO₂.
- 3) La aireación (rotación) dentro del sistema debe ser suficiente para poder dispersar el CO₂, pero no tan rápida para no aumentar la temperatura y dañar las microalgas.
- 4) Medio de cultivo y el CO₂ deben ser suficientes para el crecimiento y reproducción de las microalgas, pero no tanto para no aumentar excesivamente su densidad celular.
- 5) De la luz depende la fotosíntesis y es necesario que la mayor parte del tiempo este bien iluminado el fotobiorreactor para que las microalgas sigan creciendo en población, sin embargo, tampoco debe ser demasiada luz sino aumenta la temperatura en el sistema y las microalgas mueren.

3.2.2.1 Identificar el parámetro para mejorar y analizar las restricciones para mejorarlo

Intensidad de la luz: Mejorar la eficiencia de captura de luz mediante la optimización de la geometría del fotobiorreactor y el uso de materiales reflectantes o sistemas ópticos.

Rotación: Utilizar sistemas de agitación de bajo impacto, como agitadores de baja velocidad o métodos de circulación suave, para minimizar el estrés mecánico en las células. Diseñar dispositivos o estructuras que proporcionen una distribución uniforme de nutrientes sin la necesidad de una agitación intensa.

El sistema ideal debe permitir un control preciso de las condiciones ambientales, como la temperatura, el pH, la concentración de CO₂ y la rotación, con ello proporcionar un entorno óptimo para el crecimiento de las microalgas. El fotobiorreactor debe contar con equipos de medición de estas variables y/o sensores que indiquen cuando esté alguna variable fuera de parámetro.

3.2.2.2 Usar la matriz de Altshuller y usar los principios inventivos para proponer una solución

La matriz de Altshuller es una herramienta que utiliza una tabla dividida en cuadrantes. En las columnas se encuentran los parámetros técnicos, es decir, los aspectos o características del sistema que queremos mejorar o resolver. Estos parámetros pueden ser variables como velocidad, tamaño, peso, eficiencia, entre otros. Por otro lado, en las filas se listan los principios de solución, que son enfoques o estrategias que se pueden aplicar para resolver problemas técnicos.

Cada celda de la matriz contiene un número que indica la efectividad de un principio de solución específico para superar una contradicción entre los parámetros técnicos. Las contradicciones ocurren cuando mejorar un parámetro implica empeorar otro. La matriz proporciona una guía para identificar qué principios de solución han sido exitosos en situaciones similares, de modo que se puedan encontrar ideas creativas para resolver el problema en cuestión.

Tabla 3.3. Matriz de contradicción de Altshuller Principios inventivos.

Parámetro Mejoras	Problemas que surgen al realizar una mejora			
	14. Fortaleza	18. Intensidad de iluminación	26. Cantidad de sustancia o materia	37. Complejidad de control
1. Peso	1, 8 15, 40	*	1, 3 19, 33	*
13. Estabilidad	*	4, 28 32, 33	*	20, 23 35, 37
35. Adaptabilidad	11, 15 32, 36	*	18, 20 33, 37	*
39. Productividad	*	10, 20 35, 37	*	3, 23 35, 37

Así mismo, la matriz de Altshuller es una herramienta que permite explorar soluciones creativas a problemas técnicos al relacionar principios de solución con parámetros técnicos

en una tabla, ayudando a identificar enfoques efectivos para superar contradicciones y mejorar el sistema en cuestión.

13. Estabilidad – 18. Intensidad de iluminación

Principio 4. Asimetría

- a) Reemplazar una forma simétrica de un objeto con una forma asimétrica.
- b) Si el objeto ya es asimétrico, incrementar el grado de asimetría.

Principio 28. Sustitución sistemas mecánicos

- a) Reemplace el sistema mecánico por uno óptico, acústico u odorífero.
- b) Use un campo electromagnético, eléctrico o magnético para una interacción con el objeto.

Principio 32. Cambio de color

- a) Cambie el color de un objeto o sus alrededores.
- b) Cambie el grado de translucidez de un objeto o sus alrededores.
- c) Use aditivos coloreados para observar objetos o procesos que son difíciles de ver.
- d) Si tales aditivos ya son usados, emplee trazadores luminiscentes o elementos trazadores.

Principio 33. Homogeneidad

- a) Haga que los objetos interactúen con un objeto primario hecho del mismo material o algún material similar en comportamiento.

Cuando analizamos la forma en que se tiene proyectada la luz en el fotobiorreactor, es uniforme, sin embargo, esta no llega a todas las paredes del fotobiorreactor, podría ser que no se tiene que tener una placa lineal sino alguna en forma asimétrica, de acuerdo al principio 4, que proyecte la luz desde diferentes ángulos y esta llegue a todas las partes del fotobiorreactor.

En el principio 28 se propone una placa de luz led de forma tubular, que se mantenga girando durante la noche para que la luz logre penetrar todas las áreas del fotobiorreactor. El principio 32 propone un cambio de color, o bien sería el emplear espejos, para reflejar la luz en los diferentes puntos del fotobiorreactor y que esta al reflejarse vaya con la misma intensidad en todos los puntos del fotobiorreactor.

En el fotobiorreactor las microalgas deben permanecer estables en el centro del mismo, evitar que estas vayan hacia las paredes y así mismo evitar que se congreguen en un solo espacio del equipo, por lo que se requiere un ambiente homogéneo, principio 33, para que la luz pase con la misma intensidad en todos los puntos del fotobiorreactor.

3.2.2.3 Identificar los recursos y combinarlos con efectos científicos (si es necesario) para buscar el sistema ideal

El sistema ideal es aquel que cuenta con una iluminación adecuada, ya que esta es fundamental para que las microalgas realicen la fotosíntesis y liberen oxígeno puro. Durante el día, la luz natural proporciona la iluminación adecuada, incluso en días nublados, siempre y cuando haya algo de luz presente. Sin embargo, durante la noche, cuando no hay luz natural disponible, la fotosíntesis no puede ocurrir y el crecimiento de las microalgas se ve limitado. Es por esto que se recurre a la luz artificial, que tiene la capacidad de ayudar a las microalgas a llevar a cabo su proceso de fotosíntesis. En este sistema, es importante contar con una fuente de luz artificial que se adapte a las condiciones cuando no hay luz natural, para asegurar que las microalgas reciban una iluminación constante y similar a la luz natural.

3.2.2.4 Si hay otra contradicción, repetir los pasos anteriores, de lo contrario pasar a la fase tres

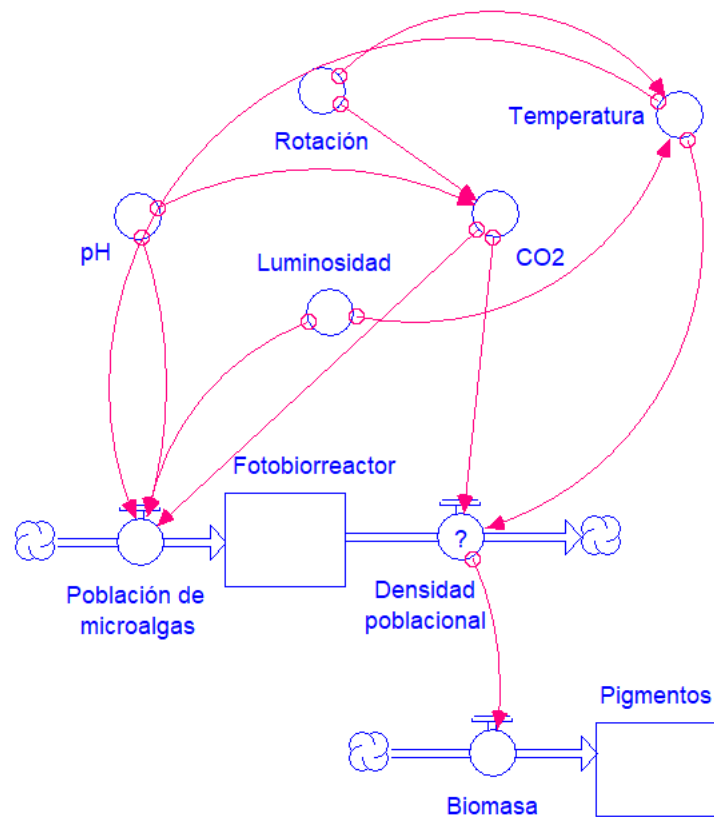
No se encuentra otra contradicción técnica.

3.3 Fase 3. Desarrollo de la simulación

3.3.1 Realizar el diagrama de Forrester y crear las ecuaciones diferenciales del sistema

De acuerdo al diagrama causal analizado anteriormente se diseña el siguiente Diagrama de Forrester.

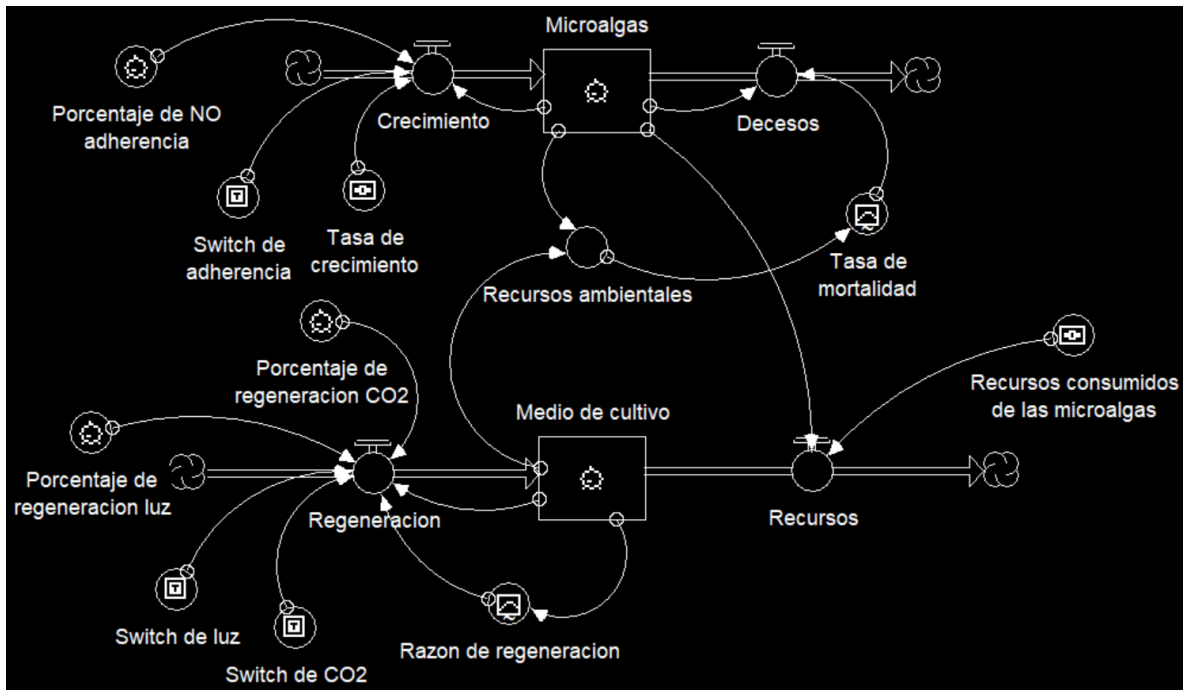
En el presente modelo, se analizan las variables que interrelacionan en el sistema, así como las contradicciones presentes en el mismo. Vemos una población de microalgas que es influenciada por las variables CO_2 , Luminosidad y temperatura; el fotobiorreactor donde entra la población de microalgas y se desarrolla bajo la influencia de las variables en el sistema; vemos la correlación de las otras variables entre sí, la cual ya se explicó anteriormente; así mismo la salida de estas microalgas, como densidad poblacional, al obtener la población de microalgas desarrollada y llegado a su tope máximo de producción en el fotobiorreactor, se extrae la materia para de ahí obtener la biomasa y los subcomponentes de las microalgas, como lo son la clorofila y los pigmentos.

Figura 3.2. Diagrama de Forrester modelo 1.

No se puede llevar a cabo la simulación con este modelo, debido a la falta de datos de análisis en el fotobiorreactor. Sin embargo, se mantiene la propuesta para futuras investigaciones, que desarrollen el modelo de simulación y a la par esté en funcionamiento el equipo, para la obtención de datos que se requieren. Los datos obtenidos de la investigación documental sobre el análisis de este fotobiorreactor, se muestran en el anexo 2, los cuales no fueron suficientes para llevar a cabo la simulación y el análisis de las ecuaciones diferenciales.

Se realiza otra propuesta de modelo, ésta enfocada al análisis de la población de microalgas, a continuación, se muestra en diagrama de Forrester realizado para este modelo.

En la figura 3.3 se muestra el modelo propuesto contemplando la población de microalgas y la influencia de algunas variables de gran importancia en el proceso.

Figura 3.3. Diagrama de Forrester modelo 2.

Las siguientes variables son las que se contemplaron en la simulación:

CO₂: Las microalgas son organismos fotosintéticos que utilizan la luz solar y el CO₂ para llevar a cabo la fotosíntesis, un proceso mediante el cual convierten la energía solar en energía química, capturando el carbono y liberando oxígeno. El CO₂ se usa como fuente de carbono para la fotosíntesis, por lo que las microalgas lo absorben y lo incorporan en su estructura celular para construir biomasa, es por ello que es de gran importancia la fuente de carbono para las microalgas. En este parámetro se contempló un 60% de importancia para la vida de las microalgas.

Iluminación: La luz solar proporciona la energía necesaria para que las microalgas realicen la fotosíntesis. Durante este proceso, las microalgas capturan la energía lumínica y la convierten en energía química utilizada para alimentar las reacciones bioquímicas que sustentan su crecimiento y metabolismo. Por lo que la iluminación eficiente en el sistema será de gran ayuda para el buen crecimiento y metabolismo de las microalgas. La iluminación tiene 100% de importancia en el desarrollo de las microalgas, sin ella se morirían, por lo que es vital para su existencia.

Medio de cultivo: El medio de cultivo seleccionado depende del tipo de microalga a cultivar, en este caso el estudio se enfocó en la microalga *Chlorella spp* y el medio de cultivo para esta microalga es Bold Basal (MBB), del cual se utilizó 1.5 ml/L.

Adherencia: La adherencia de las microalgas a las paredes es un aspecto identificado en las contradicciones del sistema, lo cual afecta las condiciones ambientales y con ello el buen desarrollo de las microalgas.

La figura 3.4 muestra las ecuaciones del sistema, las cuales se han generado en esta simulación. Stella tiene una forma de trabajo en la que sus ecuaciones son entradas – salidas * unidad de tiempo.

Figura 3.4. Ecuaciones del sistema.

```

☐ Medio_de_cultivo(t) = Medio_de_cultivo(t - dt) + (Regeneracion - Recursos) * dt
INIT Medio_de_cultivo = 180
INFLOWS:
    ➤ Regeneracion =
      ((1+Porcentaje_de__regeneracion_CO2*Switch_de_CO2)*Medio_de_cultivo*Razon_de_regen
      eracion)*Porcentaje_de__regeneracion_luz*Switch_de_luz
OUTFLOWS:
    ➤ Recursos = Microalgas*Recursos_consumidos_de_las_microalgas
☐ Microalgas(t) = Microalgas(t - dt) + (Crecimiento - Decesos) * dt
INIT Microalgas = 2.2
INFLOWS:
    ➤ Crecimiento = IF (Switch_de_adherencia = 0) THEN (Microalgas*Tasa_de_crecimiento) ELSE
      (IF TIME <=15 THEN Microalgas*Tasa_de_crecimiento ELSE
      (Porcentaje_de_NO__adherencia*Switch_de_adherencia*Microalgas*Tasa_de_crecimiento))
OUTFLOWS:
    ➤ Decesos = Microalgas*Tasa_de_mortalidad
☐ Porcentaje_de_NO__adherencia = 0.2 {Este 0.2 quiere decir que el 80% de las microalgas se van a
  adherir, lo que ocasiona que solo quedan el 20% "flotando"}
☐ Porcentaje_de__regeneracion_CO2 = 0.60
☐ Porcentaje_de__regeneracion_luz = 1
☐ Recursos_ambientales = Medio_de_cultivo/Microalgas
☐ Recursos_consumidos_de_las_microalgas = 1.2
☐ Switch_de_adherencia = 0
☐ Switch_de_CO2 = 0
☐ Switch_de_luz = 0
☐ Tasa_de_crecimiento = 0.34
☒ Razon_de_regeneracion = GRAPH(Medio_de_cultivo/INIT(Medio_de_cultivo))
  (0.00, 0.002), (0.07, 0.013), (0.14, 0.02), (0.21, 0.027), (0.28, 0.031), (0.35, 0.036), (0.42, 0.04), (0.49,
  0.044), (0.56, 0.045), (0.63, 0.047), (0.7, 0.048)
☒ Tasa_de_mortalidad = GRAPH(Recursos_ambientales/INIT(Recursos_ambientales))
  (0.00, 0.468), (0.02, 0.385), (0.04, 0.295), (0.06, 0.243), (0.08, 0.19), (0.1, 0.148), (0.12, 0.113), (0.14,
  0.07), (0.16, 0.055), (0.18, 0.04), (0.2, 0.038)
  
```

3.3.2 Evaluar el efecto de una contradicción en el sistema utilizando el modelo de simulación

Las contradicciones detectadas anteriormente se han enlistado y mencionado en la fase 2. Uno de los problemas encontrados en las contradicciones es la adherencia de las microalgas en las paredes del fotobiorreactor. Al aumentar la población de las microalgas,

aumenta la saturación de estas en el contenedor, por lo que muchas tienden a adherirse en las paredes, al hacerlo, y adherirse gran cantidad de ellas, la iluminación es ineficiente ya que no logra entrar por completo y/o quizá sí, pero, solo a ciertas áreas del fotobiorreactor, por lo que, al no haber luz, las microalgas comienzan a morir, este deceso es rápido debido a que se quedan sin una variable vital para su existencia y desarrollo.

Un sistema sin adherencia tiene un ciclo de vida como el que se observa en la figura 3.5.

Figura 3.5. Simulación del sistema sin presencia de adherencia en las paredes.

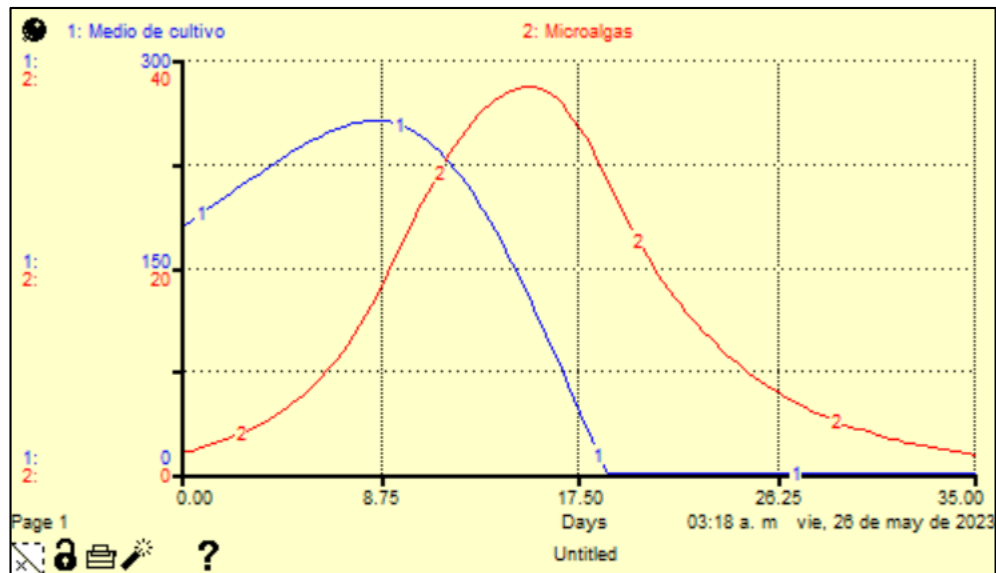
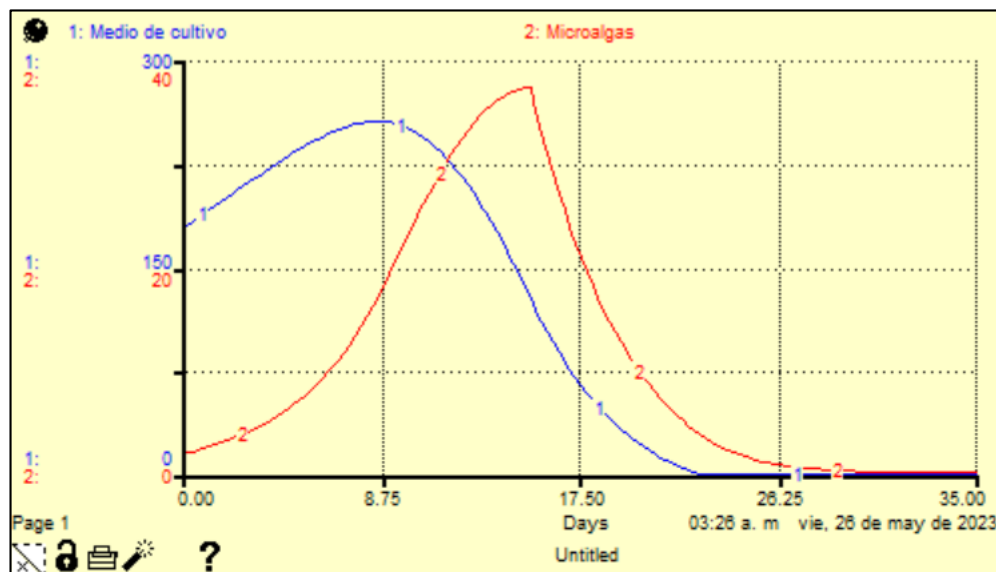


Figura 3.6. Simulación del sistema con presencia de adherencia en las paredes.



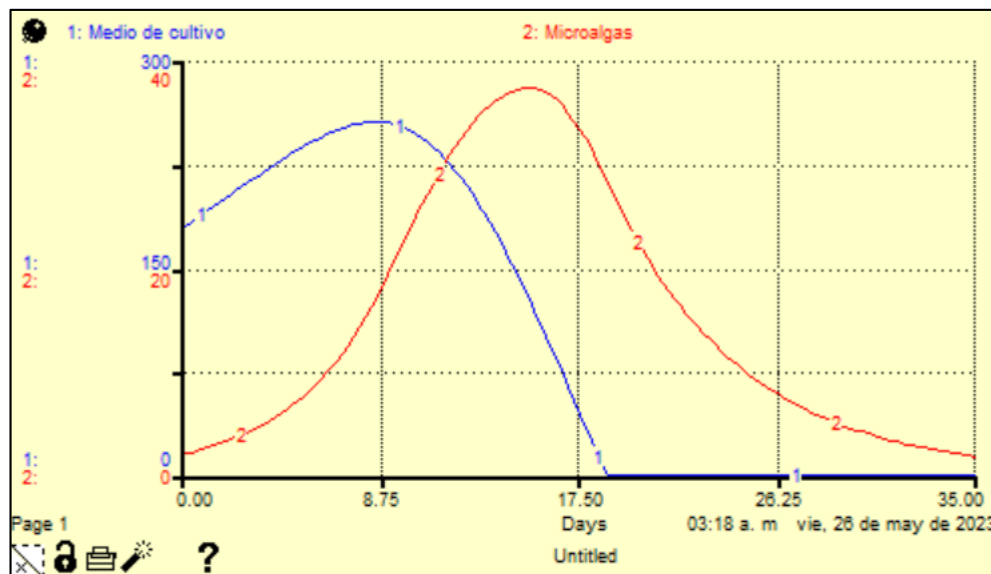
En Stella se contempló que la adherencia a las paredes cuando la población de las microalgas aumenta, es aproximadamente del 80%. Un sistema con adherencia tiene un ciclo de vida como el que se observa en la figura 3.6.

Como se puede observar al comparar ambos gráficos, al tener un ciclo de vida normal sin adherencia en las paredes y agregando una tasa de mortalidad tentativa, las microalgas irán muriendo con el paso del tiempo por falta de recursos. Sin embargo, cuando existe adherencia en las paredes y existe falta de iluminación, las microalgas mueren más rápidamente. Es por ello que esta contradicción, es de gran importancia para el buen desarrollo y crecimiento de las microalgas.

3.3.3 Simular el modelo en diferentes escenarios y aplicar análisis de sensibilidad

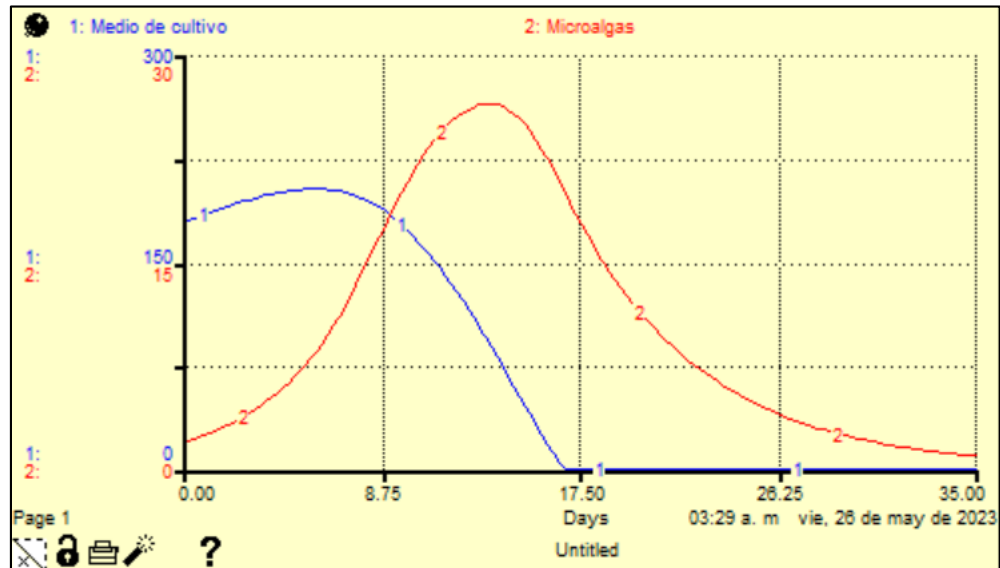
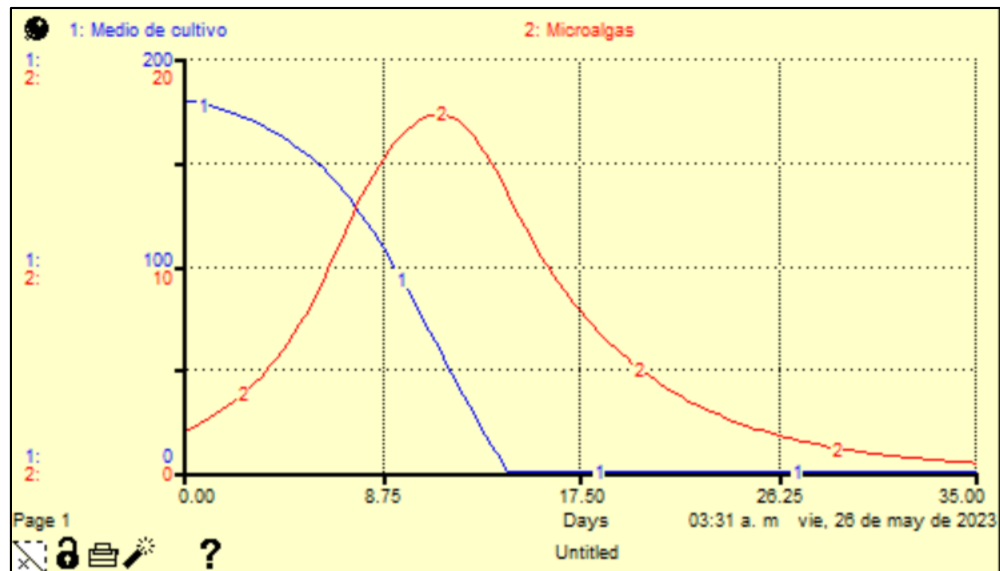
Una simulación es de gran ayuda al resolver la pregunta ¿Qué pasa sí? Por lo que se analizan los diferentes escenarios en el programa de simulación.

Figura 3.7. Simulación del sistema con CO₂ y con luminosidad.



En este modelo de simulación, figura 3.7, se contemplaron dos variables de gran importancia para el buen desarrollo de las microalgas. Este es el comportamiento del sistema si se suministra CO₂ y una buena iluminación.

En la figura 3.8 se observa un sistema sin administración de CO₂ y con luminosidad, baja el desarrollo de microalgas y el día máximo de su crecimiento.

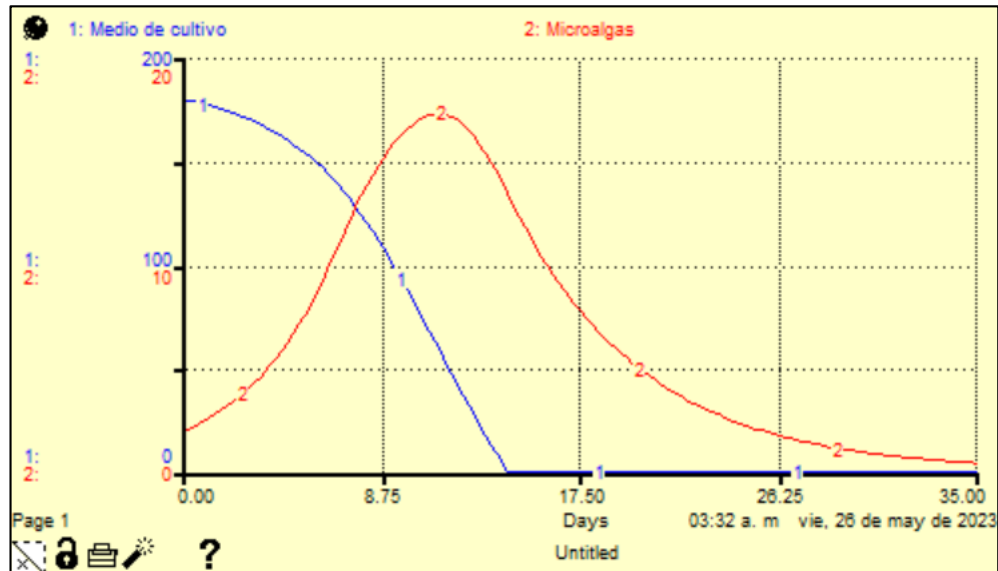
Figura 3.8. Simulación del sistema sin CO₂ y con luminosidad.**Figura 3.9.** Simulación del sistema con CO₂ y sin luminosidad.

En la figura 3.9 se tiene un sistema sin luminosidad y con CO₂, en este se puede observar que su día máximo de crecimiento es menor aún más que en la figura anterior, así como disminuye su desarrollo. Podemos afirmar con eso la gran importancia que tiene una buena iluminación en el fotobiorreactor.

Al simular sin contemplar estas dos variables, como se muestra en la figura 3.10, nos damos cuenta que los nutrientes (medio de cultivo) baja, debido a que no tendrá nutrientes más

que los que ingresan al inicio, así como se observa que el periodo de vida de las microalgas disminuye, como su crecimiento.

Figura 3.10. Simulación del sistema sin CO₂ y sin luminosidad.



3.3.4 Hacer una interfaz y observar el comportamiento del modelo con diferentes políticas

Para llevar a cabo la simulación del sistema del fotobiorreactor se realizó el modelo mostrado en la figura 3.3 Diagrama de Forrester, del cual en la figura 3.11 se muestra su interfaz. A continuación, se muestran los componentes de la interfaz y su función.

Medio de cultivo: Es el medio de cultivo inicial que se agrega al fotobiorreactor para que las microalgas se alimenten, así como el CO₂ que se va agregando por periodos para que las microalgas se alimenten. Esta va aumentando y/o disminuyendo de acuerdo a la tasa de regeneración propuesta.

Recursos consumidos por las microalgas: Son los recursos que aproximadamente consumen las microalgas inicialmente y esto aumenta de acuerdo al crecimiento de la población.

Microalgas: Es la cantidad de microalgas que inician en el fotobiorreactor y de acuerdo a la tasa de crecimiento, va aumentando la cantidad de ellas en el sistema.

Porcentaje de regeneración de CO₂: En este parámetro se contempla, la influencia que tiene el CO₂ en el crecimiento de las microalgas.

Switch de CO₂: El switch sirve para activar el CO₂.

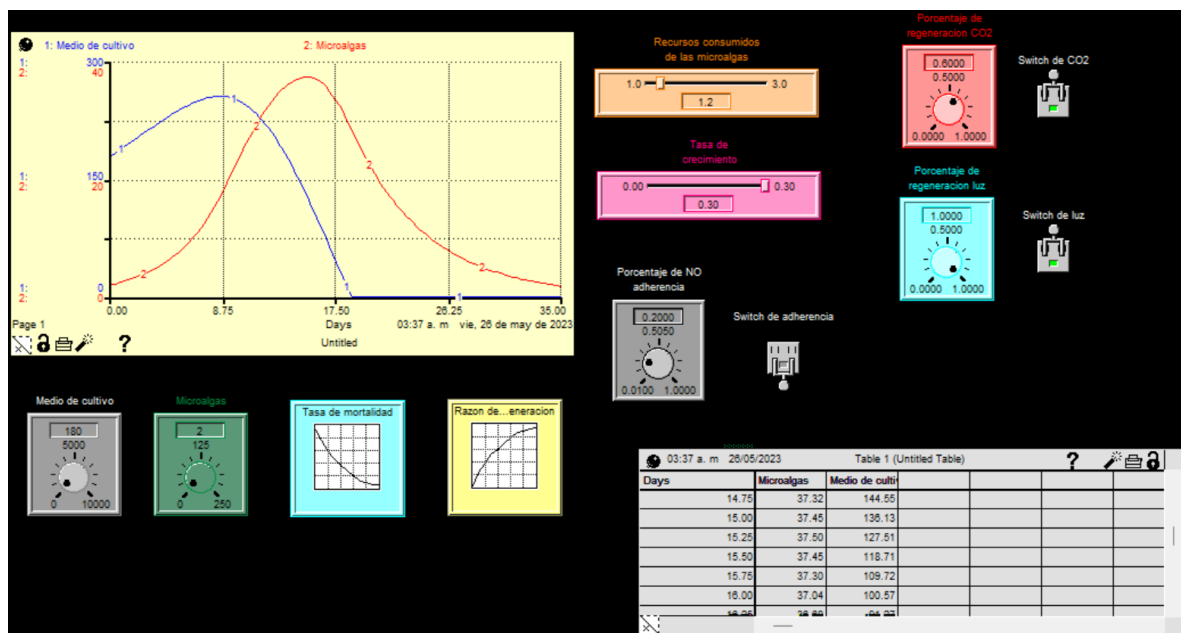
Porcentaje de regeneración de Luz: En este parámetro se contempla, la influencia que tiene la Luz en el crecimiento de las microalgas.

Switch de Luz: El switch sirve para activar la Luz.

Porcentaje de NO adherencia: La adherencia a las paredes cuando la población de las microalgas aumenta, es aproximadamente del 80%, por lo tanto, el porcentaje de NO adherencia es del 20%.

Switch de adherencia: El switch sirve para activar la adherencia.

Figura 3.11. Interfaz del modelo de simulación del fotobiorreactor.



En la gráfica, el medio de cultivo al inicio aumenta, llega un punto máximo y colapsa rápidamente. El colapso repentino coincide íntegramente con el deceso de las microalgas. ¿Por qué medio de cultivo al principio sube y después baja? En los primeros días se le agrega más alimento por ajuste de la cantidad de alimento requerido por el biorreactor. En el modelo, la razón de regeneración y la tasa de la mortalidad nunca se obtuvieron los datos porque se requirió que alguien estuviese monitoreando el proceso. Y el equipo está en desuso. Sin embargo, en la razón de regeneración se toma el dato de la tasa de crecimiento y, en la tasa de mortalidad se contemplan los siguientes supuestos, que las microalgas mueran cuando se queden sin alimento o que ocurra una extracción.

La variable de recursos consumidos de las microalgas actualmente tiene 1.2 ml y ese dato es lo que consumen al inicio de la simulación las 2.2 billones de microalgas, se toma como constante.

Estamos dando por sentado que si se apaga el switch de la luz es penumbra total no tiene la luz adecuada.

3.3.5 Usar el modelo de simulación para evaluar y probar una solución potencial

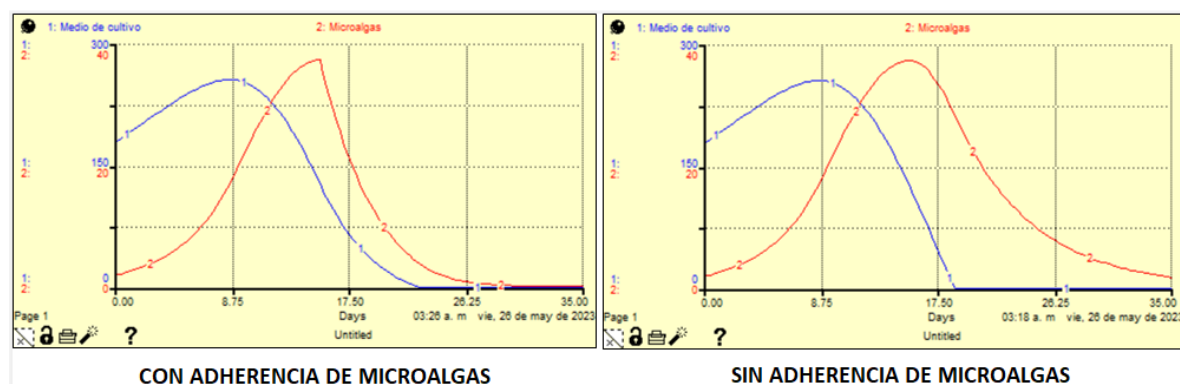
Se resuelve la siguiente hipótesis de la contradicción física adherencia de las microalgas a las paredes del fotobiorreactor.

Separación bajo condiciones: Buscar que un objeto limpie las paredes internas del fotobiorreactor cada determinado tiempo, una barra que pase de arriba abajo limpiando y que ese exceso de microalgas se extraigan y se utilicen como biomasa.

Separación entre el todo y sus partes: Buscar la manera de que dentro del fotobiorreactor se limpien las paredes y esto evite que se adhieran microalgas a ella. Esto puede solucionarse con un limpiador magnetizado, que una a dos imanes, uno dentro y otro fuera, y el objeto limpiador sea delgado que no ocupe demasiado espacio ni que afecte el desarrollo de las microalgas.

En la simulación se comprueba que al evitar la adherencia de las microalgas en la pared del fotobiorreactor, se mantiene la intensidad de la luz estable, lo que mantendrá el desarrollo de las microalgas constante y ameno, sin embargo, al no limpiar la pared del fotobiorreactor, no liberar la pared de las microalgas en ella adheridas, se encontrará y deceso constante de microalgas. Como se muestra en la figura 3.12.

Figura 3.12. Gráficas de adherencia.



Conclusiones

Este proyecto ha sido un trabajo constante en la búsqueda de información e investigación en las diferentes áreas involucradas, así como el apoyo de un especialista de laboratorio y uso de microalgas, un especialista en el programa de simulación Stella y un especialista en el uso de herramientas de innovación como el TRIZ y dinámica de sistemas. Todo este trabajo ha obtenido como resultado el cumplimiento de los objetivos de la tesis, se cita a continuación cada uno de los objetivos y el punto en el que se cumplen.

Analizar los requerimientos del biorreactor para identificar las principales restricciones y funciones útiles que debe entregar. Este objetivo se resuelve en la fase 1 de la metodología, en el punto 3.1.1 Descripción del problema y sus componentes estableciendo condiciones iniciales.

Modelar los conflictos presentes en el biorreactor para clasificarlos y decidir la secuencia adecuada de resolución. El presente objetivo se resuelve en la fase 1 de la metodología, en el punto 3.1.2 Identificar las variables críticas del modelo y hacer un Diagrama Causal de Bucle (CLD).

Aplicar la metodología TRIZ+DS para formular y resolver los problemas centrales del sistema. Este objetivo se resuelve en el punto 3.1.5 Formular contradicciones físicas o técnicas y pasar a la fase dos, así como en el punto 3.2 Fase 2: Análisis de las contradicciones.

Evaluar las soluciones potenciales mediante una simulación para identificar los efectos de cada escenario sobre el biorreactor. El objetivo se cumple en el punto 3.3 Fase 3: Desarrollo de la simulación.

Proponer estrategias de mejora del desempeño del biorreactor para compararlas con las tendencias de evolución de TRIZ. Este objetivo se cumple en el punto 3.3 Fase 2: Análisis de las contradicciones, así como en la Fase 3: Desarrollo de la simulación.

Se lleva a cabo el modelado 1 del sistema del fotobiorreactor para la simulación, sin embargo, no fueron suficientes los datos obtenidos documentalmente cuando se utilizó este fotobiorreactor, por lo que se optó por hacer el modelado 2, el cual se basa en un análisis poblacional de las microalgas en diferentes escenarios, con ello probamos la influencia de

algunas variables en el sistema, cómo disminuye su población si falta algunas variables necesarias para la subsistencia de las microalgas.

Los resultados obtenidos han sido coherentes y favorables, de acuerdo a los datos que se recopilaron en la investigación documental, sin embargo, es necesario continuar el trabajo para tener mejores proyecciones de las contradicciones del sistema y resolverlas con la mejora del diseño del fotobiorreactor.

Recomendaciones

En el presente proyecto se encontraron áreas de oportunidad para futuros proyectos, en los cuales se involucre poner en marcha el equipo, obtener suficientes datos para poder utilizarlos en el modelo de simulación que originalmente se propuso, así como identificar nuevas contradicciones en el sistema y solucionar las ya existentes.

Así mismo se recomienda, estructurar el modelo de simulación propuesto, adaptable a los datos experimentales obtenidos.

Otro punto a probar, sería utilizar el fotobiorreactor, no tan solo para el tratamiento del CO₂ liberado en el tratamiento de lodos residuales, de igual manera puede utilizarse para el tratamiento de aguas residuales y pruebas a gran escala de análisis que se realizan en el laboratorio.

Por último, se recomienda probar las contradicciones existentes para el rediseño del equipo.

Referencias

- Al'tshuller, G. S. (1999). The innovation algorithm: TRIZ, systematic innovation and technical creativity. Technical innovation center, Inc.
- Alonso Magdaleno, M. I., & Álvarez Castaño, Y. (2000). El proceso de toma de decisiones en entornos complejos: una aplicación metodológica. Documentos de trabajo (Universidad de Oviedo. Facultad de Ciencias Económicas).
- Aracil, J. (1995). Dinámica de sistemas. Edison, 4. Madrid, España.
- Belda, C. F., & Grande, E. U. (2009). Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación. Encuentros multidisciplinares, 11(32), 37-48.
- Bú, R. C. (1994). Simulación: Un enfoque práctico. Editorial Limusa.
- Caballero, M. (2019). Desarrollo de estrategias de operación de fotobiorreactores para la producción de pigmentos y nutrientes a partir de microalgas. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Orizaba. Veracruz, México.
- Cervantes, A., Chiappa, X., & Dias, N. (2009). Stella, software para modelación dinámica en Biología. UNAM-FES Zaragoza UMDI-Sisal, México.
- Damián, J. R., Ascanio, G., Launizar, N. y Cortés S. R. (2014). Control de Temperatura de un Bioreactor para Procesos Aeróbicos. Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico. Jalisco, México.
- De Leo, E., Aranda, D., & Addati, G. A. (2020). Introducción a la Dinámica de Sistemas (No. 739). Serie Documentos de Trabajo.
- Delgado, M. (2021). Modelación dinámica de problemas inventivos: Diseño de estrategias orientadas a la resolución simultánea de conflictos. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Orizaba. Veracruz, México.
- Delgado, J., Cortés, G., Sánchez, C., García, J., Méndez J.M. (2020). The evaluation of conceptual design through dynamic simulation: A proposal based on TRIZ and system Dynamics, Computers & Industrial Engineering, Volume 149.
- Ekmekci, I., & Nebati, E. E. (2019). Triz Methodology and Applications. Procedia Computer Science, 158, 303-315.
- Forrester, J., [1961]. Industrial Dynamics. Harv. Bus. Rev. 36, 37–66.

- González-Busto Múgica, B. (1999). La dinámica de los sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación. Documentos de trabajo (Universidad de Oviedo. Facultad de Ciencias Económicas).
- González, H. R. E., Álvarez, F. D. J. M., & Alvarado, G. S. M. (2011). SIMULACIÓN: CONCEPTOS Y EVOLUCIÓN.
- González, C. R. A. (2018). Modelación Matemática y Simulación de Procesos Biológicos.
- Kaplan, S. (2016). An introduction to TRIZ: The Russian Theory of Inventive Problem Solving. Southfield, MI: Ideation International Inc.
- Muñiz, M. A. Z. Y., & Peñaherrera, D. G. (2012). La dinámica de sistemas y los límites de crecimiento. Sistémica, (7), 45-55.
- Shannon, R. E. (1975). La simulación de los sistemas: el arte y ciencia.

Productividad científica

- 1) Participación en el XIV Congreso Internacional de Docencia e Investigación en Química

Universidad Autónoma Metropolitana
Casa abierta al tiempo **Azacapotzalco**

Otorga la presente
Constancia

a: **Elizabeth Córdova Grajales**

Por presentar la ponencia del trabajo de investigación:
Aplicación de la metodología TRIZ+DS para el modelado de un fotobiorreactor de microalgas

En la modalidad **Oral**
dentro de las actividades del XIV Congreso Internacional de Docencia e Investigación en Química, celebrado de forma virtual los días del 5 al 7 de julio del 2023.

Coautores
Guillermo Cortés Robles, Jesús Delgado Maciel, Eduardo Roldán Reyes

Ciudad de México, a 6 de octubre de 2023.


Dra. Teresa Merchand Hernández
Directora de la
División de Ciencias Básicas e Ingeniería


Dr. Rafael Pérez Flores
Jefe del
Departamento de Ciencias Básicas


Dr. Cirilo García Martínez
Presidente del Comité Organizador del
XIV Congreso Internacional de Docencia e
Investigación en Química

2) Artículo para el XIV Congreso Internacional de Docencia e Investigación en Química



Aplicación de la metodología TRIZ+DS para el modelado de un fotobiorreactor de microalgas. Application of the TRIZ+DS methodology for the modeling of a microalgae photobioreactor.

Córdova Grajales Elizabeth, Cortés Robles Guillermo, Delgado Maciel Jesús, Roldán Reyes Eduardo.

Tecnológico Nacional de México Campus Orizaba, Departamento Académico División de Estudios de Posgrado e Investigación. Oriente 9 No. 852 Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz, C.P. 94320. México.

Autor para correspondencia: m06010938@orizaba.tecnm.mx

ORCID : 0009-0001-0260-3740

Recibido:
07/05/2023

Aceptado:
31/05/2023

Palabras clave:
Modelo, TRIZ, dinámica de sistemas.

Keywords:
Model, TRIZ, system dynamics.

RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo la aplicación de herramientas de innovación como la metodología TRIZ+DS para el modelado de un fotobiorreactor de microalgas. Los sistemas químicos por su complejidad, requieren sistemas y modelos sistemáticos que analicen cada una de sus variables y los recursos inherentes en el mismo, qué es lo que se tiene y qué se puede mejorar.

De acuerdo a la investigación bibliográfica, en un fotobiorreactor la mayoría de sus variables interaccionan entre sí, por lo que se recuperan los datos obtenidos de investigaciones realizadas a nivel laboratorio, para estructurar un modelo sistemático. Esta metodología identifica las variables en el sistema, su comportamiento y las contradicciones presentes en el mismo, con las que se puede llegar a proponer soluciones y buscar un sistema ideal.

ABSTRACT

The objective of this article is the application of innovative tools such as the TRIZ+DS methodology for the modeling of a microalgae photobioreactor. Due to their complexity, chemical systems require systematic systems and models that analyze each of their variables and the resources inherent in them, what is available and what can be improved.

According to the bibliographical research, in a photobioreactor most of its variables interact with each other, for which the data obtained from investigations carried out at the laboratory level are recovered, to structure a systematic model. This methodology identifies the variables in the system, their behaviour and the contradictions present in it, with which it is possible to propose solutions and search for an ideal system.

Anexo A

Los 39 parámetros de TRIZ de Al'tshuller (Al'tshuller, 1999).

1	Peso de objeto móvil
2	Peso de objeto inmóvil
3	Longitud de objeto móvil
4	Longitud de objeto inmóvil
5	Área de objeto móvil
6	Área de objeto inmóvil
7	Volumen de objeto móvil
8	Volumen de objeto inmóvil
9	Velocidad
10	Fuerza
11	Tensión o presión
12	Forma
13	Estabilidad de composición del objeto
14	Fortaleza
15	Duración de la acción del objeto móvil
16	Duración de la acción del objeto inmóvil
17	Temperatura
18	Intensidad de iluminación
19	Uso de energía del objeto móvil
20	Uso de energía del objeto inmóvil
21	Potencia
22	Pérdida de energía
23	Pérdida de sustancia
24	Pérdida de información
25	Pérdida de tiempo
26	Cantidad de sustancia
27	Confiabilidad
28	Exactitud de la medida
29	Precisión de fabricación
30	El daño externo afecta el objeto
31	Efectos perjudiciales provocados por el objeto
32	Facilidad para la fabricación
33	Facilidad de uso
34	Facilidad de reparación
35	Adaptabilidad o flexibilidad
36	Complejidad del dispositivo
37	Complejidad de control

38	Grado de automatización
39	Productividad

Los cuarenta principios de inventiva TRIZ de Al'tshuller (Al'tshuller, 1999).

1	Segmentación	21	Pasar rápidamente
2	Extracción	22	Convertir lo negativo en positivo
3	Calidad local	23	Retroalimentación
4	Asimetría	24	Mediador
5	Combinar	25	Autoservicio
6	Universalidad	26	Copiar
7	Anidación	27	Objetos baratos o de corta vida
8	Contrapeso	28	Sustitución sistemas mecánicos
9	Reacción preliminar	29	Neumáticas e hidráulicas
10	Acción preliminar	30	Membranas delgadas
11	Precaución previa	31	Materiales porosos
12	Equipotencialidad	32	Cambio de color
13	Inversión	33	Homogeneidad
14	Esfericidad curvatura	34	Restauración y regeneración de partes
15	Dinámica	35	Transformación del estado físico y químico
16	Acciones parciales	36	Transiciones de fases
17	Otra dimensión	37	Expansión térmica
18	Vibraciones mecánicas	38	Oxidantes fuertes
19	Acción periódica	39	Atmósfera inerte
20	Continuidad acción útil	40	Materiales compuestos

Nota: Tablas obtenidas traducidas del trabajo de Kaplan, 1996.

Anexo B

Datos obtenidos documentalmente del fotobiorreactor del Tecnológico Nacional de México Campus Orizaba.

Unidad	Cel/ml	NA	g/L	mg/L	g/100 g de biomasa	mg/ml	mg/g	mg/g
Dosis	Crecimiento	pH	Biomasa	Carbohidratos	Lípidos	Proteínas	Clorofila A	Clorofila B
0	0.55033*10 ⁷	8.01	0	0	0	0	0	0
0.5	4.1806*10 ⁷	8.29	0.27	579.73	16.1	474.89	10.9	5.87
1	4.4533*10 ⁷	8.1	1.16	597.74	14.28	449.9	14.23	8.54
1.5	5.7263*10 ⁷	9.13	1.71	608.11	13.2	433.74	30.61	18.62

Los presentes datos se obtuvieron con la microalga *Chlorella* spp. Datos obtenidos de acuerdo a la dosis de medio de cultivo agregada. Estos datos sirvieron para realizar el modelo 1 de simulación, sin embargo, no fueron datos suficientes para poder llevar a cabo la simulación.

Unidad	divisiones/día	días
Dosis	Velocidad de crecimiento	Tiempo de duplicación
0	0	0
0.5	1.95	0.36
1	1.52	0.45
1.5	1.99	0.34

Datos obtenidos de las variables identificadas.

Fotobiorreactor	Lux	%CO ₂	Crecimiento	pH	Temperatura	Rotación
1	2000	2%	4.8*10 ⁷	8.26	20 a 25°C	10 L/d
2	2000	7%	3.9*10 ⁷	8.62	20 a 25°C	10 L/d
3	2000	12%	4.1*10 ⁷	9.11	20 a 25°C	10 L/d
4	3000	2%	5.0*10 ⁷	9.02	20 a 25°C	10 L/d
5	3000	7%	3.8*10 ⁷	8.85	20 a 25°C	10 L/d
6	3000	12%	3.6*10 ⁷	8.64	20 a 25°C	10 L/d
7	4000	2%	6.3*10 ⁷	9.1	20 a 25°C	10 L/d
8	4000	7%	5.6*10 ⁷	9.18	20 a 25°C	10 L/d
9	4000	12%	5.8*10 ⁷	8.98	20 a 25°C	10 L/d

Datos para la regresión lineal múltiple, con ella se obtiene la relación de las variables y la fórmula para la variable población de microalgas

Crecimiento	Lux	%CO ₂	pH	Temperatura	Rotación
0.00000048	2000	2	8.26	20	10
0.00000039	2000	7	8.62	21	10
0.00000041	2000	12	9.11	22	10
0.00000005	3000	2	9.02	23	10
0.00000038	3000	7	8.85	24	10
0.00000036	3000	12	8.64	25	10
0.00000063	4000	2	9.1	20	10
0.00000056	4000	7	9.18	21	10
0.00000058	4000	12	8.98	22	10

Regresión lineal múltiple

Estadísticas de la regresión	
Coficiente de correlación múltiple	0.954098459
Coficiente de determinación R ²	0.91030387
R ² ajustado	0.760810319
Error típico	4.78565E-08
Observaciones	9

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	5	6.97293E-14	1.39459E-14	6.08925178	0.083965692
Residuos	3	6.87072E-15	2.29024E-15		
Total	8	7.66E-14			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	7.0316E-07	6.5538E-07	1.072904447	0.36194131	-1.3825E-06	2.7889E-06	-1.3825E-06	2.78887E-06
Variable X 1	7.5587E-11	2.4836E-11	3.043423363	0.05571643	-3.4528E-12	1.5463E-10	-3.4528E-12	1.54628E-10
Variable X 2	-2.7418E-09	4.6281E-09	-0.592427	0.59525113	-1.747E-08	1.1987E-08	-1.747E-08	1.19869E-08
Variable X 3	2.8721E-08	7.2445E-08	0.396453176	0.7182872	-2.0183E-07	2.5927E-07	-2.0183E-07	2.59272E-07
Variable X 4	-3.13E-08	1.1318E-08	-2.76552755	0.06982886	-6.7318E-08	4.7186E-09	-6.7318E-08	4.7186E-09
Variable X 5	0	0	65535	#¡NUM!	0	0	0	0

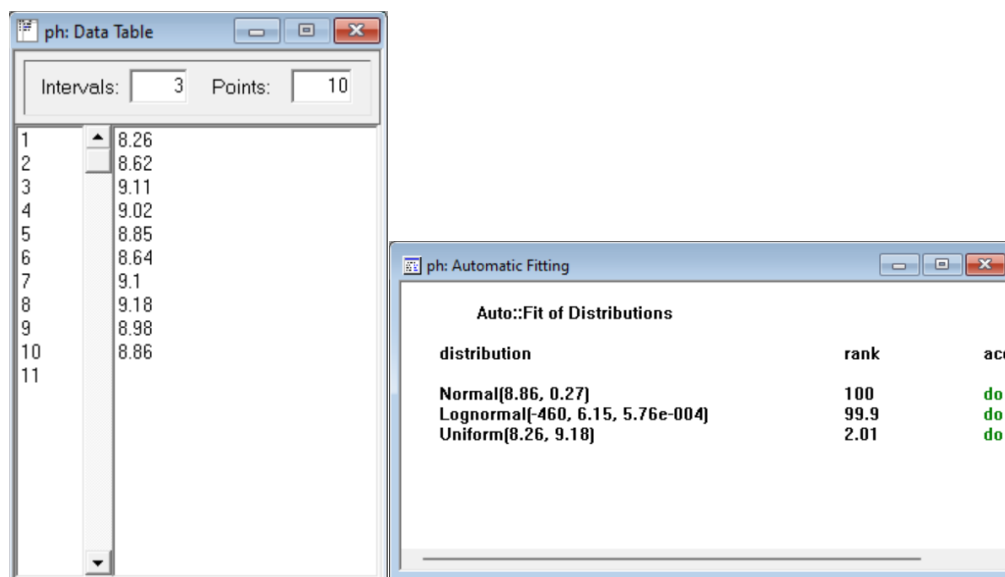
Fórmula: $y=7.0316E-07+7.5587E-11X1-2.742E-09X2+2.8721E-08X3-3.13E-08X4$

Datos para Star Fit, para el manejo de datos en Stella, se obtuvieron las distribuciones normales de algunas variables. Star Fit requiere de 10 datos para determinar el tipo de distribución, por lo que el último dato se obtuvo del promedio de los 9 datos anteriores.

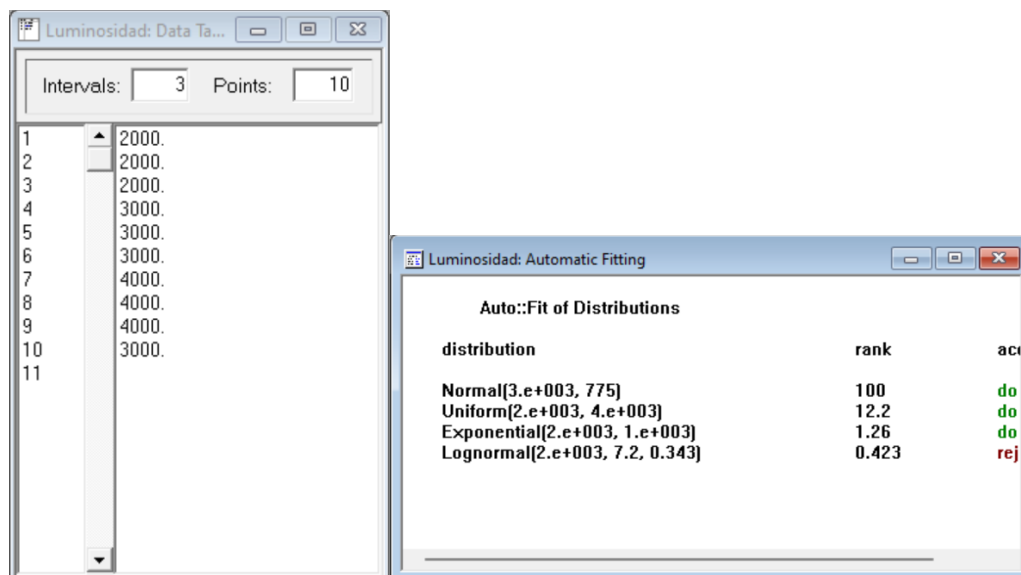
Crecimiento	Lux	%CO ₂	pH	Temperatura	Rotación
0.00000048	2000	2	8.26	20	10
0.00000039	2000	7	8.62	21	10
0.00000041	2000	12	9.11	22	10
0.00000005	3000	2	9.02	23	10
0.00000038	3000	7	8.85	24	10
0.00000036	3000	12	8.64	25	10
0.00000063	4000	2	9.1	20	10
0.00000056	4000	7	9.18	21	10
0.00000058	4000	12	8.98	22	10
0.00000048	3000	7	8.86	22	10

Datos de los que se obtuvo el tipo de distribución:

pH



Luminosidad



Datos para la regresión lineal múltiple para la obtención de la fórmula para Temperatura

Temperatura	Lux	Rotación
20	2000	10
21	2000	10
22	2000	10
23	3000	10
24	3000	10
25	3000	10
20	4000	10
21	4000	10
22	4000	10

Regresión lineal múltiple

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.1259866
Coefficiente de determinación R ²	0.0158726
R ² ajustado	-
Error típico	0.3121698
Observaciones	1.9840638
	6
	9

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0.38094348	0.19047174	0.04838595	0.953133889
Residuos	6	23.61905652	3.93650942		
Total	8	24			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	22	2.51836337	8.73583227	0.00012448	15.83778682	28.16221318	15.83778682	28.16221318
Variable X 1	0	0.000809991	0	1	-0.00198198	0.001981976	-0.00198198	0.001981976
Variable X 2	0	0	65535	#¡NUM!	0	0	0	0

Fórmula: $y = 2.51836337 + 0.00080999X_1$

Datos para la regresión lineal múltiple para la obtención de la fórmula para CO₂

%CO ₂	pH	Rotación
2	8.26	10
7	8.62	10
12	9.11	10
2	9.02	10
7	8.85	10
12	8.64	10
2	9.1	10
7	9.18	10
12	8.98	10

Regresión lineal múltiple

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0.51097462
Coeficiente de determinación R ²	0.26109506
R ² ajustado	0.01479341
Error típico	4.29797901
Observaciones	9

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	39.16425871	19.58212935	1.06006217	0.403427699
Residuos	6	110.8357413	18.47262355		
Total	8	150			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-14.28717401	44.64772026	-0.3199978	0.75981988	-123.53621	94.9618618	-123.5362098	94.96186182
Variable X 1	2.402013116	5.035388142	0.47702641	0.65022126	-9.9191378	14.723164	-9.919137804	14.72316404
Variable X 2	0	0	65535	#¡NUM!	0	0	0	0

Fórmula: $y = -14.287174 + 2.40201312X_1$

Nota: Las tablas son creación propia, de datos recopilados de la investigación documental del uso del fotobiorreactor del Tecnológico Nacional de México Campus Orizaba.

Referencias bibliográficas

- Altshuller, G. S. (1999). The innovation algorithm: TRIZ, systematic innovation and technical creativity. Technical innovation center, Inc.
- Caballero, M. (2019). Desarrollo de estrategias de operación de fotobiorreactores para la producción de pigmentos y nutrientes a partir de microalgas. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Orizaba. Veracruz, México.
- Kaplan, S. (2016). An introduction to TRIZ: The Russian Theory of Inventive Problem Solving. Southfield, MI: Ideation International Inc.