



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Tesis para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

**“DISEÑO ÓPTIMO DE PLANTAS DE POTENCIA
INTEGRADAS A SISTEMAS DE ALGAS
INVOLUCRANDO MÚLTIPLES OBJETIVOS”**

Tesis presentada por:

- Paola Miroslava Téllez Vázquez

Dirigida por el asesor:

- Dr. José María Ponce Ortega

Morelia, Mich., mayo del 2021

ÍNDICE

ABSTRACT	4
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	8
ANTECEDENTES.....	11
MARCO TEÓRICO	13
JUSTIFICACIÓN	15
OBJETIVOS	17
Objetivo general	17
Objetivos particulares	17
HIPÓTESIS.....	17
METODOLOGÍA.....	18
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Suministro total de energía en GWh = Gigavatio por hora, de las principales fuentes a nivel mundial.	8
Figura 2 : Emisiones totales en MTCO_2 = dióxido de carbono equivalente, de las principales fuentes de emisión a nivel mundial.	9
Figura 3: Emisiones totales en MTCO_2 = dióxido de carbono equivalente, de las principales fuentes de emisión en México.	10
Figura 4 : Representación de un sistema para la biofijación de CO_2 de plantas de energía de vapor con microalgas para la producción de biocombustibles.....	12
Figura 5 : Representación de la fotosíntesis de las microalgas.....	13
Figura 6 : Representación del sistema de energía que integra la captura biológica de las emisiones de CO_2 de las centrales eléctricas de vapor que utilizan el cultivo de microalgas para la producción de biodiesel.	14
Figura 7 : Categorías de impacto y daño para calcular el valor del Eco-indicador 99.	21
Figura 8 : Flujos de combustible y carbono, sin y con el proceso de producción de biodiesel de algas.	28
Figura 9 : EC vs GANANCIA NETA, corrida No.1.	38
Figura 10 : EC vs GANANCIA NETA, valores a y b.....	39
Figura 11 : EC vs GANANCIA NETA, valores c y d.....	40
Figura 12 : EC vs GANANCIA NETA.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consumo de electricidad para las etapas de las algas al proceso de producción de biodiesel.	20
Tabla 2. Factores generales de daños para materiales y combustibles.....	27
Tabla 3 . Costos unitarios, valores de calefacción y factores de emisiones directas para combustibles.....	34
Tabla 4. Resultados de la corrida No.1.	36
Tabla 5. Resultados de la corrida No.2.	37
Tabla 6. Resultados de la corrida No.3.	37

ABSTRACT

"OPTIMAL DESIGN OF POWER PLANTS INTEGRATED TO ALGAE SYSTEMS INVOLVING MULTIPLE OBJECTIVES"

For:

Paola Miroslava Tellez Vazquez

Directed by:

Dr. José María Ponce Ortega

In this research project, it is proposed to develop a simultaneous and multiobjective optimization model based on genetic algorithms to obtain a set of optimal solutions that provide the best benefit between the production, environmental, and economic part of power generation plants, together with the installation of a biodiesel production plant and other value-added products, using microalgae.

Currently, there is a great need to significantly reduce anthropogenic emissions of greenhouse gases, particularly fossil carbon dioxide (CO₂), since this is the main greenhouse gas and, consequently, one of the most important contributors. for the increase of anthropogenic climate change and global warming.

In this context, this study aims to investigate the economic and environmental aspects of sustainability associated with integrating the production of biodiesel from algae with a steam electric power plant for the biofixation of CO₂ from microalgae in flue gases, to then the conversion of algal biomass into biodiesel. This integrated energy system is a multipurpose process that provides the CO₂ required by microalgae crops, as well as electricity, biodiesel produced from algal biomass, and lipid-depleted biomass which in turn is used as auxiliary fuel. at the power plant.

Using the IAPWS-IF97 formulation, the thermodynamic properties of water and steam are calculated in the steam power cycle. The environmental impact is measured using the methodology of the Eco-99 indicator that follows the principles of the Life Cycle Analysis (LCA). The optimization problem includes the simultaneous selection of multiple primary energy sources for the power plant boiler, such as fossil fuels (coal, oil, and natural gas), biofuels, and biomass (grass, soft, and hardwood) to achieve significant reductions in CO₂ emissions. The main contribution of this work is to provide a multiobjective optimization method through metaheuristic techniques.

The optimization method has been applied to a case study from Mexico, in addition, the system could achieve significant environmental improvements due to the reductions in life cycle greenhouse gases that result not only from the biofixation of CO₂ from gases microalgae combustion and then the conversion and use of algal biomass as renewable fuels (i.e. biodiesel and lipid-depleted biomass) replacing fossil fuels, but also significantly reducing fossil fuel requirements compared to power plants independent coal fighters.

Keywords: Simultaneous Multi-Objective Optimization, Production of biodiesel through algae, Biological capture of CO₂, Mitigation of greenhouse gases.

RESUMEN

“DISEÑO ÓPTIMO DE PLANTAS DE POTENCIA INTEGRADAS A SISTEMAS DE ALGAS INVOLUCRANDO MÚLTIPLES OBJETIVOS”

Por:

Paola Miroslava Téllez Vázquez

Dirigida por:

Dr. José María Ponce Ortega

En este proyecto de investigación se propone desarrollar un modelo de optimización simultánea y multiobjetivo basado en algoritmos genéticos para obtener un conjunto de soluciones óptimas que proporcionen el mejor beneficio entre la producción, la parte ambiental, y económica de las plantas de generación de energía, en conjunto con la instalación de una planta de producción de biodiesel y otros productos de valor agregado, por medio de microalgas.

Actualmente, existe una gran necesidad por reducir significativamente las emisiones antropogénicas de los gases de efecto invernadero, particularmente el dióxido de carbono fósil (CO_2), ya que éste es el principal gas de efecto invernadero y, en consecuencia, uno de los contribuyentes más importantes para el aumento del cambio climático antropogénico y el calentamiento global.

En este contexto, este estudio tiene como objetivo investigar los aspectos económicos y ambientales de la sostenibilidad asociados con la integración de la producción de biodiesel de algas con una planta de energía eléctrica de vapor para la biofijación de CO_2 de microalgas en gases de combustión, para luego la conversión de la biomasa de algas en biodiesel. Este sistema de energía integrado es un proceso multipropósito que proporciona el CO_2 requerido por los cultivos de microalgas, así como la electricidad, el biodiesel producido a partir de la biomasa de algas y la biomasa agotada en lípidos que a su vez se utiliza como combustible auxiliar en la planta de energía.

Con ayuda de la formulación IAPWS-IF97 se calculan las propiedades termodinámicas del agua y el vapor en el ciclo de potencia del vapor. El impacto ambiental se mide mediante la metodología del indicador Eco-99 que sigue los principios del Análisis del Ciclo de Vida (LCA). El problema de optimización incluye la selección simultánea de múltiples fuentes de energía primaria para la caldera de la central eléctrica, como los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), los biocombustibles y la biomasa (pasto, madera blanda y dura) para

lograr reducciones significativas de las emisiones de CO₂. La principal contribución de este trabajo es proporcionar un método de optimización multiobjetivo a través de técnicas metaheurísticas.

El método de optimización se ha aplicado a un caso de estudio de México, además, el sistema podría lograr mejoras ambientales significativas debido a las reducciones de los Gases de efecto invernadero del ciclo de vida que resultan no solo de la biofijación de CO₂ de los gases de combustión por microalgas y luego la conversión y uso de biomasa de algas como combustibles renovables (es decir, biodiesel y biomasa agotada en lípidos) que sustituyen a los combustibles fósiles, pero también reducen significativamente los requisitos de combustibles fósiles en comparación con las centrales eléctricas de carbón independientes.

Palabras clave: Optimización simultanea Multi-Objetivo, Producción de biodiesel por medio de algas, Captura biológica de CO₂, Mitigación de Gases de efecto invernadero.

INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años atrás, y en la actualidad, el uso de la energía eléctrica se está incrementando significativamente a nivel mundial, siendo inevitable debido al crecimiento demográfico y desarrollo económico y social, especialmente en países en desarrollo, esto ha llevado a una preocupación mundial, ya que las principales fuentes de producción de energía eléctrica son el carbón, gas natural, energía nuclear, las hidroeléctricas, el petróleo, los biocombustibles, además de energías renovables (solar, viento, etc.)¹.

La IEA (International Energy Agency)² estimó el consumo de estas fuentes de energía, dando como resultado el aumento anual del carbón y del gas natural, como principales fuentes de energía de 1990 al 2017, como se muestra en la Figura 1.

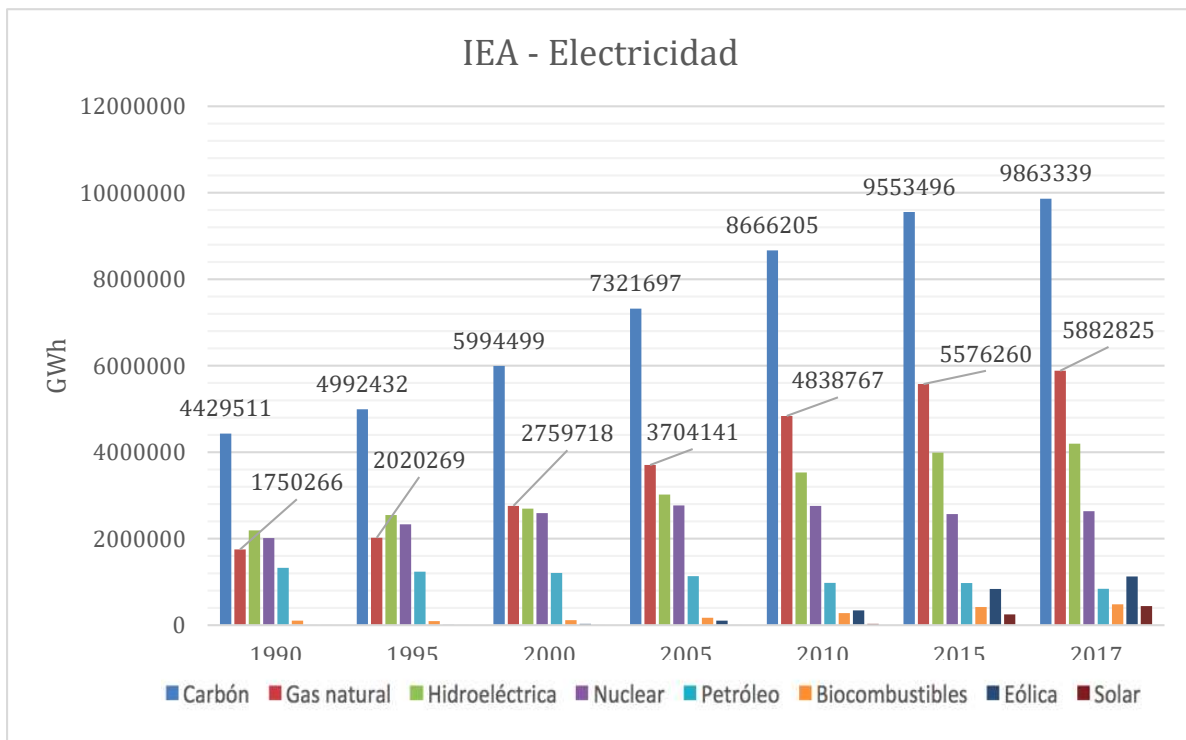


Figura 1 : Suministro total de energía en GWh = Gigavatio por hora, de las principales fuentes a nivel mundial.

Se estima que el consumo de energía seguirá aumentando para poder satisfacer la demanda eléctrica mundial³. En México, la principal fuente de energía eléctrica la obtenemos del gas natural, con 205,641 GWh, petróleo con 35,958 GWh y carbón con 29,144 GWh, en el 2018.

Un desafío importante que enfrenta este sector de la energía eléctrica es cómo conciliar la creciente demanda mundial de electricidad con la urgencia creciente para reducir las emisiones de CO₂ debido a que el dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero y, en consecuencia, uno de los contribuyentes más importantes para el aumento del cambio climático antropogénico y el calentamiento global⁴.

Se ha causado ya un gran daño en el ambiente, sin embargo, no podemos dar marcha atrás con la creciente demanda que se ha generado y que continuará, por lo que se quiere llegar a un punto de equilibrio entre el aumento de la producción y la parte ambiental, y económica que esto conlleva.

En la Figura 2 se muestran las emisiones de CO₂ a nivel mundial, y en la Figura 3 las emisiones de CO₂ en México, de 1990 al 2017.

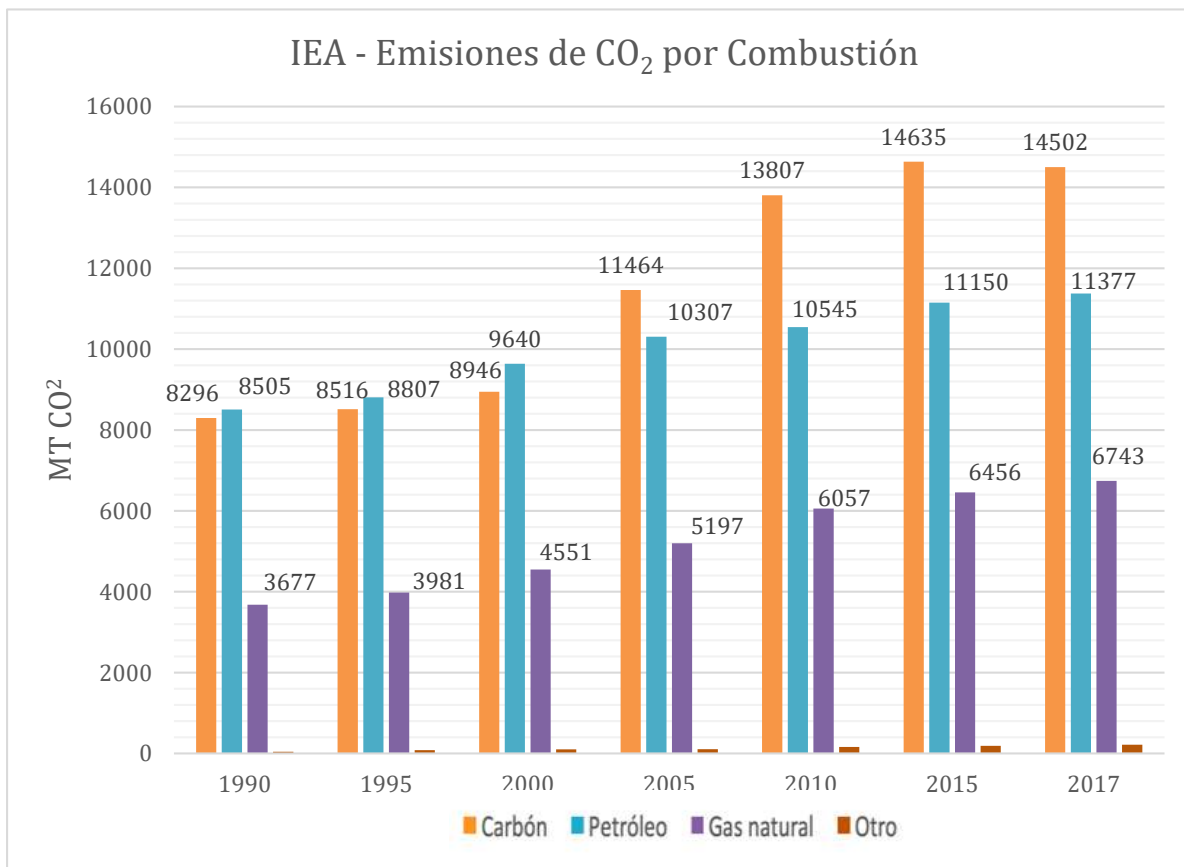


Figura 2 : Emisiones totales en MTCO₂ = dióxido de carbono equivalente, de las principales fuentes de emisión a nivel mundial.

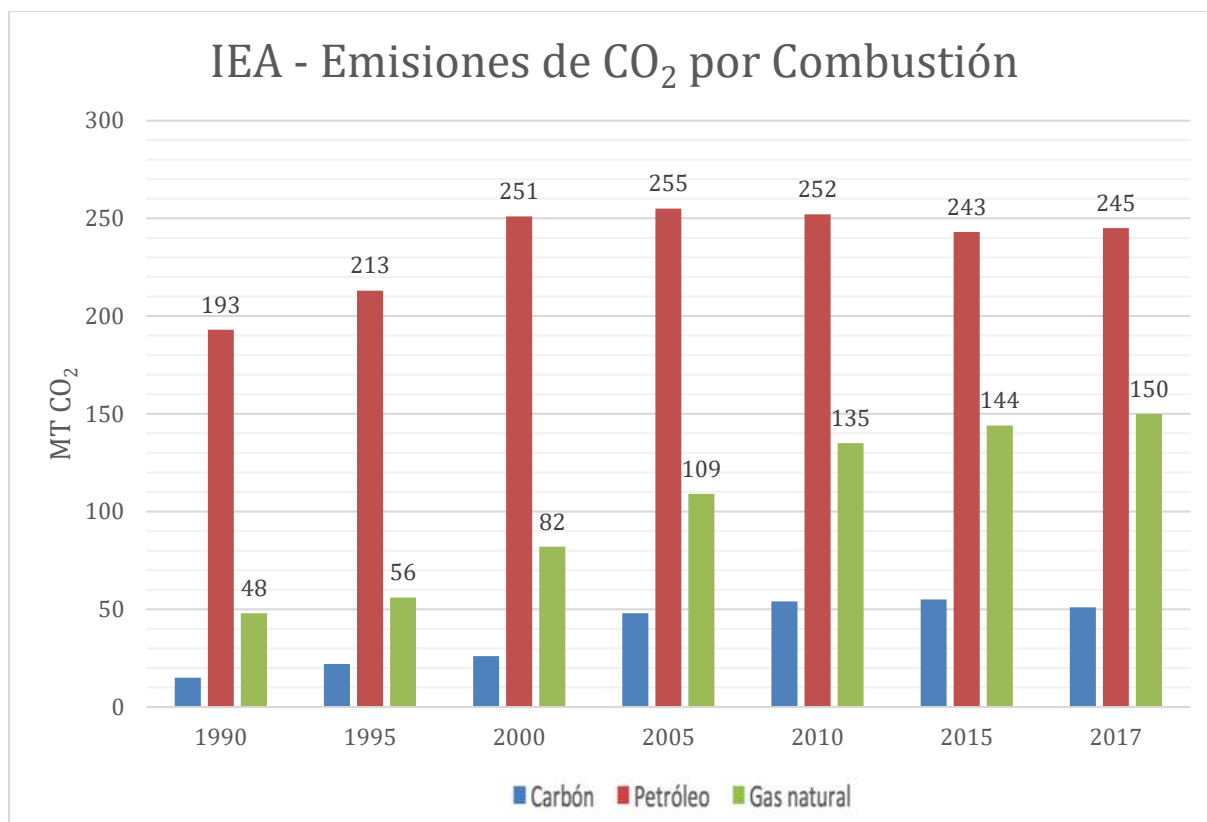


Figura 3: Emisiones totales en MTCO₂ = dióxido de carbono equivalente, de las principales fuentes de emisión en México.

Es claro que sin ninguna estrategia en las próximas décadas no lograremos reducir las emisiones de CO₂ para estabilizar las concentraciones de los gases de efecto invernadero a 350 ppm en la atmósfera², que es el nivel sostenible para evitar el cambio climático a largo plazo. Las emisiones humanas de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso, metano y otros) han aumentado las temperaturas globales en alrededor de 1°C desde los tiempos preindustriales, y por primera vez en más de 800,000 años, las concentraciones no solo aumentaron por encima de las 300 ppm, sino que ahora superan las 400 ppm⁴.

Lo anterior ha llevado a un significativo cambio en el clima, generando una gama de posibles impactos ecológicos, físicos y para la salud, incluidos eventos climáticos extremos (como inundaciones, sequías, tormentas y olas de calor); aumento del nivel del mar; crecimiento alterado del cultivo; y sistemas de agua interrumpidos. La fuente de análisis más extensa sobre los posibles impactos del cambio climático se puede encontrar en el 5º informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)⁵.

ANTECEDENTES

Se ha reconocido que la contribución social y tecnológica en combinación podrían lograr reducciones significativas en las emisiones antropogénicas de CO₂, que van desde los gases de combustión industriales, hasta emisiones de escape de los vehículos de transporte y personales, también incluyen cambios en los estilos de vida para promover la conservación de energía y el control de la población, mejoras en la eficiencia de la conversión de energía y el uso del lado de la demanda, cambio de combustible (es decir, cambio de carbón a combustibles menos intensivos en carbono como el gas natural), integración a gran escala de fuentes renovables de bajo y cero carbono (es decir, eólica, solar y biomasa), captura y almacenamiento de carbono de emisiones de CO₂ de combustibles fósiles y combustión de biomasa, y mitigación biológica de carbono¹.

Se han realizado diversos estudios para desarrollar diseños de procesos innovadores que integren la captura y almacenamiento de CO₂ con plantas de energía que queman combustibles fósiles para evitar la acumulación de emisiones de CO₂ en la atmósfera a corto plazo, sin embargo, su implementación a escala industrial debe superar diversos problemas todavía⁶.

También, se han llevado a cabo otros estudios enfocados a la fabricación de bioproductos aparte del biodiesel⁴³ como hidrógeno, propilenglicol, etc., a partir de microalgas³⁹, el diseño óptimo de una red de procesamiento a gran escala para producir una variedad de combustibles a base de algas y bioproductos de valor agregado bajo incertidumbre⁴⁰, empleando técnicas metaheurísticas para la optimización de un proceso integrado de producción de biodiesel a partir de microalgas *Chlorella Vulgaris*⁴¹, incluyendo análisis de biorefinerías de algas integradas (IABR) y basadas en una combinación de cuatro cadenas de microalgas a productos para la producción de biocombustibles, biopotencia y subproductos⁴², sin embargo ninguna de estas se llevan a cabo por medio de la optimización simultánea de múltiple objetivos usando técnicas metaheurísticas como algoritmos genéticos.

En este caso, una combinación de eliminación biológica de CO₂ emitida por las plantas de energía alimentadas con combustibles fósiles y la producción de biocombustibles para reemplazarlos es una estrategia alternativa de reducción de los gases de efecto invernadero, de la cual podemos describir en dos pasos^{7,8,9}.

Primero, los organismos y plantas autótrofos producen biomasa en el proceso de fijación de CO₂ a través de la fotosíntesis. Posteriormente, la biomasa producida puede convertirse en biocombustibles a través de varias tecnologías de conversión, así como algunos productos químicos de valor agregado¹⁰.

Por lo tanto, los biocombustibles de biomasa renovable pueden ser una parte importante de cualquier estrategia sostenible y rentable para evitar un aumento en la concentración de CO₂ atmosférico al reemplazar los combustibles fósiles y, por lo tanto, sus emisiones de CO₂ asociadas.

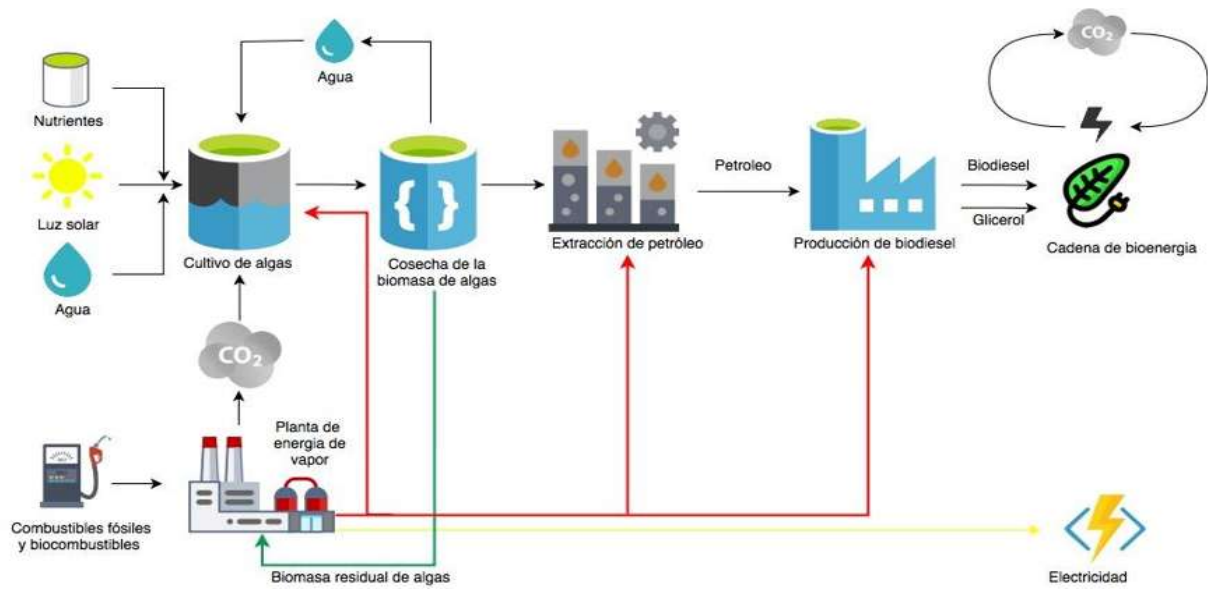


Figura 4 : Representación de un sistema para la biofijación de CO₂ de plantas de energía de vapor con microalgas para la producción de biocombustibles.

MARCO TEÓRICO

En este contexto, hoy en día el cultivo de microalgas para la biofijación de CO_2 está obteniendo un particular interés en todo el mundo, ya que las microalgas son un grupo diverso de microorganismos fotosintéticos procariotas y eucariotas, de crecimiento rápido por su estructura simple, con capacidad de fijar CO_2 mientras capturan energía solar con una eficiencia de 10–50 veces mayor que la de las plantas terrestres, su alta tasa de crecimiento, productividad y eficiencia fotosintética las consideran una materia prima ideal para la producción de biocombustibles de manera económicamente efectiva y ambientalmente sostenible como de otros subproductos de valor agregado^{11,12,13}.

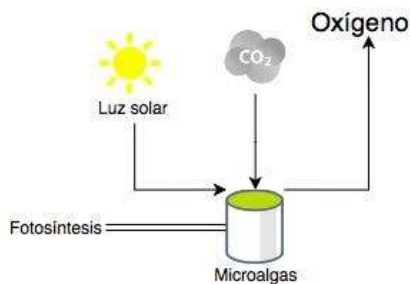


Figura 5 : Representación de la fotosíntesis de las microalgas.

Se han investigado las microalgas para la producción de una serie de biocombustibles diferentes, incluidos biodiesel, bio-oil, bio-syngas y bio-hidrógeno. La producción de estos biocombustibles se puede combinar con la mitigación de CO_2 de gases de combustión, el tratamiento de aguas residuales y la producción de productos químicos de gran valor, se espera que los desarrollos en el cultivo de microalgas mejoren aún más la rentabilidad del biocombustible, además, este sistema de energía integrado podría generar sinérgicamente electricidad y biocombustible líquido a partir de biomasa de microalgas.

Cabe señalar que, en la producción de biocombustibles, el CO_2 fijado por las microalgas se recicla esencialmente porque este dióxido de carbono se liberará a la atmósfera cuando se queme el biocombustible a base de microalgas. Luego, será absorbido por las plantas superiores y las microalgas a través del proceso de fotosíntesis, y finalmente, en la cadena de biomasa a energía, la biomasa resultante se puede convertir nuevamente en biocombustibles utilizando las tecnologías existentes, creando así un equilibrio entre la energía y el ciclo del carbono de manera más sostenible.

Bajo este esquema no se tiene una captura permanente de CO₂; sin embargo, hay una disminución en los flujos netos de carbono a la atmósfera cuando el biocombustible producido a partir de microalgas se usa para la generación de trabajo en lugar de algún combustible fósil. Además, la planta de energía puede suministrar las cargas térmicas requeridas y las demandas de electricidad del subsistema de producción de biocombustibles de algas. Por lo tanto, hay un beneficio neto significativo en términos de emisiones de CO₂ totales evitadas cuando la generación de electricidad con combustibles fósiles se combina con la producción de biocombustibles con microalgas.

La Figura 6 integra las interacciones relevantes de energía y masa entre los componentes del sistema de energía.

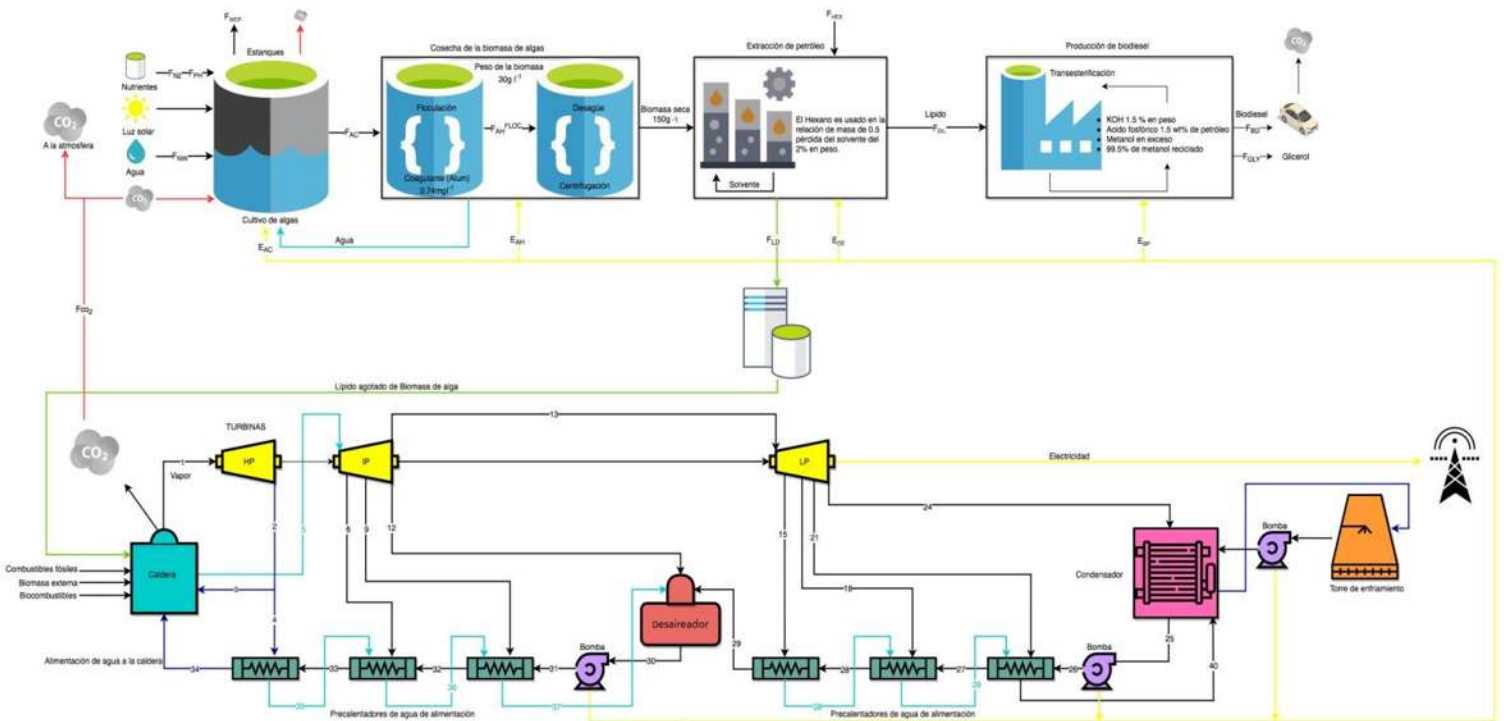


Figura 6 : Representación del sistema de energía que integra la captura biológica de las emisiones de CO₂ de las centrales eléctricas de vapor que utilizan el cultivo de microalgas para la producción de biodiésel.

A pesar de sus ventajas antes mencionadas, no se ha realizado ningún estudio sistemático para optimizar estos sistemas de energía integrados que involucren los aspectos económicos y ambientales de la sostenibilidad¹.

JUSTIFICACIÓN

Hasta ahora, hay varios estudios sobre la evaluación del ciclo de vida de los sistemas independientes para la producción de biocombustibles a partir de materias primas de algas. Aunque todos esos trabajos de investigación pueden o proporcionan información sobre los impactos económicos y ambientales, así como la viabilidad técnica de diferentes opciones para condiciones de cultivo, configuraciones de fotobiorreactores, recolección de algas y procesamiento de biomasa de algas, no logran mejoras significativas en los objetivos económicos y ambientales. También se han presentado estrategias de optimización multiobjetivo como la de Gutiérrez-Arriaga¹⁴, en donde las centrales eléctricas de vapor y la producción de biocombustibles de algas, se combinan en un modelo matemático para la optimización de objetivos múltiples de los sistemas de energía integrados, en base a eso se podría mejorar el modelo matemático para obtener un mejor resultado.

En este proyecto se llevará a cabo la propuesta de optimización del modelo de Gutiérrez-Arriaga integrando la optimización simultánea multiobjetivo a través de técnicas metaheurísticas. De esta manera, y en base al modelo de Gutiérrez-Arriaga, las interacciones entre ambos componentes del sistema pueden tomarse en cuenta en la formulación del problema de optimización en el que el impacto medioambiental debe minimizarse al tiempo que se maximiza el beneficio bruto anual del sistema.

Sólo se investiga el cultivo de microalgas en estanques abiertos, donde el CO₂ se entrega 12 horas al día, (sólo durante el día). El procedimiento propuesto implica la selección de fuentes de energía primaria adecuadas (es decir, combustibles fósiles, biomasa, biocombustibles y energía solar) para la generación sostenible de electricidad. La técnica de evaluación del ciclo de vida (LAC)^{15,16} se utiliza para cuantificar el impacto ambiental general y las emisiones de Gases de efecto invernadero resultantes de diferentes combinaciones de fuentes de energía y condiciones de operación del sistema integrado.

Esta técnica se basa en el marco cuantitativo del Eco-indicador-99 que expande los límites del sistema para incorporar los impactos ambientales asociados con sus etapas del ciclo de vida (todos los procesos asociados con la extracción y procesamiento de materias primas, la generación de energía y la generación de capital), para que pueda generar y evaluar alternativas de diseño con conciencia ambiental que se encuentren a nivel "global" (sistema de producción ampliado) en lugar de a nivel de planta.

Las propiedades termodinámicas para el agua líquida y el vapor se calculan rigurosamente utilizando la formulación IAPWS-IF 97¹⁷, además, el impacto del precio

comercial de las emisiones de carbono (es decir, impuesto / crédito de carbono) en las ganancias del sistema se incluyen en la parte matemática.

La compensación entre los objetivos económicos y ambientales se obtiene a través de un método metaheurístico basado en algoritmos genéticos para generar la curva de Pareto. Se presenta un caso de estudio ilustrativo, el cual consiste en un estudio avanzado en una planta de energía de vapor de recalentamiento regenerativo integrada con una instalación para la producción de biodiesel de algas en la parte central de México. Los resultados muestran que el sistema energético integrado podría ser rentable. Además, podría contribuir a mejorar la sostenibilidad, ya que puede cultivar biomasa de microalgas utilizando emisiones de CO₂ de las centrales termoeléctricas para la producción simultánea de biomitigación de CO₂ y biodiésel.

OBJETIVOS

Objetivo general

Este trabajo tiene como objetivo general proponer una estrategia de optimización multiobjetivo a través de algoritmos metaheurísticos que proporcionen el mejor beneficio entre la producción, la parte ambiental, y económica de las plantas de generación de energía, en conjunto con la instalación de una planta de producción biodiesel y otros productos de valor agregado, por medio de microalgas.

Objetivos particulares

- Implementar una estrategia de optimización metaheurística para el diseño de plantas de potencia integradas con sistemas de captura de gases.
- Determinar la mejor forma de integrar plantas de potencia con sistemas de captura de algas para obtener diseños de máximo beneficio económico y menor impacto ambiental.
- Determinar los factores clave para recuperación de masa y energía en sistemas de potencia integrados.
- Implementar un algoritmo riguroso para el diseño óptimo de sistemas de potencia integrados

HIPÓTESIS

Una estrategia de optimización metaheurística y multiobjetivo para el diseño de un sistema integrado para la producción de potencia y recuperación de gases de efecto invernadero producirá beneficios tanto económicos como ambientales a través de propuestas de solución que compensen ambos objetivos identificados en curvas de Pareto.

METODOLOGÍA

Se abordará el problema por partes, primero la evaluación de impacto ambiental y posteriormente, se describirá el procedimiento de solución.

La Figura 6, propuesta para el sistema de energía integrado, resume las principales operaciones del proceso, así como los flujos de masa y energía, este sistema se ocupa de la generación sostenible de electricidad que incorpora una avanzada planta de energía de vapor de recalentamiento regenerativo que utiliza diferentes fuentes de energía (es decir, combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa), junto con la biofijación de CO₂ por microalgas en el gas de combustión de la central eléctrica, la conversión de biomasa de algas en biodiésel y el uso de biomasa de microalgas empobrecida en lípidos (LD) para la co-combustión en la central eléctrica.

Se planea instalar el sistema en un área soleada, cerca del lago Cuitzeo, en la parte central de México, debido a la gran cantidad de agua y tierra disponible para apoyar la instalación del cultivo de algas.

La planta de energía se describe en un trabajo anterior de Gutiérrez-Arriaga¹⁴ para la optimización multiobjetivo de centrales de vapor. El modelado detallado de la central eléctrica utiliza la formulación IAPWS-IF 97¹⁷ para la predicción de las propiedades termodinámicas del vapor y el agua, la caldera de la planta de energía puede consumir combustibles fósiles, biocombustibles, biomasa externa y la biomasa de algas empobrecidas en lípidos provenientes de la planta de extracción de petróleo como fuentes de energía para generar electricidad.

La cantidad de 400 MW de energía eléctrica producida por la planta se elige como escenario de referencia para la evaluación ambiental del sistema. La producción de biodiésel de algas comienza con la etapa de cultivo de biomasa que requiere el cultivo de *Chlorella Vulgaris*, agua, gases de combustión (CO₂), luz solar, y nutrientes inorgánicos, incluidos principalmente nitratos y fosfatos.

La *Chlorella Vulgaris* se cultiva en estanques abiertos mezclados con ruedas de paletas durante una temporada de crecimiento de 12 meses (el número de días de cultivo es de 347 por año según las condiciones climáticas de la instalación de cultivo). El modelo de biomasa considera que la tasa de producción es 30g/m² d¹⁸, y el contenido de lípidos microalgales es 30% en peso¹⁹. Además, considera que el agua de cosecha se recicla, por lo que, para generar 1 kg de biodiesel, se requieren 0.182 kg de nitrógeno y 0.039 kg de fosfato²⁰.

El dióxido de carbono de la central eléctrica adyacente que opera continuamente las 24h/día se suministra directamente a los estanques a través de un sistema de distribución de tuberías.

El CO₂ se entrega con una proporción de 1.83 toneladas/toneladas de biomasa de algas²¹. Se supone que la absorción total del CO₂ es 70% eficiente y que el CO₂ que se destina al medio de crecimiento de algas durante un total de 12 h (sólo durante el día), asegurando que las células de algas estén expuestas a un ciclo de luz solar y oscuridad para mantener la actividad fotosintética. Se supone que el diseño de cada estanque de canalización es consistente con los estándares industriales: 100m de largo, 10m de ancho y 0.3m de profundidad. La velocidad del agua del estanque se mantiene a 0.25 m/s mediante mezcladoras de paletas, y se supone que el ciclo de cosecha-crecimiento-cosecha es de 3 días. Durante el proceso de cultivo en estanques abiertos, el agua se pierde principalmente debido a la evaporación. En este estudio, se supone que la sección de cultivo requiere una adición de agua de reposición debido a la evaporación y fugas de 0.5 cm/d^{22,23}.

La etapa de cultivo de microalgas es seguida por la recolección de algas que consiste en la recuperación de biomasa del medio de cultivo. La biomasa de algas se recupera primero mediante una operación de coagulación-floculación- asentamiento con un rendimiento de recuperación del 97%. La concentración de coagulante de alumbre es de 0.74 mg/L. Se supone que la biomasa de algas que sale de la recolección primaria tiene una concentración de 30 g/L^{24,25}.

Este concentrado se deshidrata en una etapa de recolección secundaria utilizando centrifugadoras de discos auto descargados con un rendimiento de recuperación del 85%, en el que se obtiene en una concentración final de 150 g/L de biomasa de algas^{25,26,27}.

Los nutrientes acuosos solubles en agua que contienen caldo de ambos pasos de cosecha se capturan y se devuelven al proceso de cultivo para disminuir las demandas de agua dulce y nutrientes del sistema, mientras que la suspensión de algas que sale de las unidades de centrifugación se seca a 12% en peso de humedad en un secador térmico sin pérdida de biomasa, en el proceso de extracción de aceite, el n-hexano se usa para extraer moléculas de lípidos de la biomasa de microalgas en una relación de masa de 0.5 hexano/biomasa. Este proceso tiene un rendimiento de recuperación de lípidos del 80% y da como resultado una pérdida de disolvente del 2% en peso, sin embargo, el disolvente se recupera por destilación y se reutiliza.

Después de la extracción de petróleo, la biomasa empobrecida en lípidos (biomasa residual) se quema en la caldera de la central eléctrica para desplazar las fuentes de combustibles fósiles. En la etapa final, cada gramo de triglicéridos extraídos se convierte aproximadamente en 1 g de biodiésel y 0.11 de glicerol mediante la transesterificación con catalizador alcalino (1.5% en peso de KOH) y metanol (más de 6 M). El exceso de metanol sin reaccionar se recupera por destilación con una eficiencia del 95%, mientras que el biodiésel crudo se limpia con ácido fosfórico (1.5% en peso de aceite) y agua (15% en peso de aceite). Asumiendo que la central eléctrica abastece las demandas de electricidad y energía térmica del proceso de algas a biodiésel.

En el artículo “*Lifecycle and techno-economic analysis of utility-connected algae systems*”²⁸, demostraron que el secado de la biomasa de algas se puede lograr utilizando el calor residual del gas de combustión de la central eléctrica. Por lo tanto, es una consideración razonable suponer que la corriente de humos de la central eléctrica proporciona la energía térmica requerida por las columnas de destilación para secar la biomasa de algas utilizando un proceso de recuperación de calor residual. La energía eléctrica requerida para cada etapa del proceso de producción de algas a biodiésel se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo de electricidad para las etapas de las algas al proceso de producción de biodiesel.

PARÁMETRO (kWh/tonelada de alga)	VALOR
CULTIVO	
CO ₂ Transporte	45
Rueda de paletas	200
Inyección de CO ₂ /bombeo	28.9
Bombeo de agua y caldo	153
COSECHA	
Coagulación de alumbre	167
Centrifugación	26.5
EXTRACCIÓN DE PETROLEO	
Extracción	130.7
TRANSESTERIFICACIÓN	
Mezcla	20.4

Estas demandas de energía se tomaron de “*Life cycle analyses of CO₂, energy and cost for four different routes of microalgal bioenergy conversion*”²⁷. Tomando en cuenta que la potencia requerida para el transporte y la inyección de CO₂, así como para el bombeo y la mezcla de agua y caldo, se incluyen en el análisis de la etapa de cultivo.

En el planteamiento del problema, el propósito de este es abordar la optimización económica y ambiental del sistema, la función del objetivo económico es maximizar el beneficio bruto anual (PROFIT), que se define como el ingreso por la venta de electricidad y bioproductos (biodiesel y glicerol) menos el costo total anualizado (TAC) más el subsidio total (CRÉDITO FISCAL) debido a la reducción de emisiones de Gases de efecto invernadero.

$$PROFIT = REVENUE - TAC + TAXCREDIT \quad (1)$$

Debido a que nuestro interés principal está en la etapa de diseño preliminar del sistema, se ha seleccionado el beneficio económico (PROFIT) como un objetivo apropiado para evaluar la rentabilidad potencial del sistema y decidir si se pueden justificar diseños más detallados. La función objetivo ambiental es minimizar el impacto ambiental general (EI99) asociado con la generación de electricidad y biodiesel en el sistema de energía integrado utilizando diferentes tipos de fuentes de energía primaria. El impacto ambiental se define en la ecuación 7 y se mide a través del Eco-indicador 99 que se calcula a continuación^{15,16}.



Figura 7 : Categorías de impacto y daño para calcular el valor del Eco-indicador 99.

En esta metodología se evalúa el impacto ambiental no solo a nivel de planta del sistema integrado, sino que también incluye la evaluación de los impactos resultantes de las operaciones de cada una de sus etapas asociadas del ciclo de vida (es decir, todos los procesos asociados con las materias primas extracción y procesamiento, generación de energía y fabricación de capital). Por lo tanto, este enfoque determina el desempeño ambiental general del sistema integrado expandido (ciclo de vida completo del sistema), que puede ser útil desde el punto de vista de la toma de decisiones.

El problema de optimización del sistema de energía integrado se aborda a través de un enfoque de simulación-optimización que apunta a la maximización de la ganancia bruta anual PROFIT y la minimización del impacto ambiental general (EI99). La solución al problema de objetivos múltiples está dada por un conjunto de puntos óptimos de Pareto que involucran diseños alternativos, cada uno de los cuales representa un compromiso óptimo entre los criterios ambientales y económicos.

En la evaluación de Impacto Ambiental, LCA es un método analítico sistemático para la evaluación ambiental^{29,30,31}, normalizado por el sistema de gestión ambiental ISO. Para el cálculo de la IE99 se compone de cuatro pasos descritos en la referencia, primero definición de objetivos y alcances, segundo análisis de inventario, tercero evaluación de impacto, y cuarto interpretación e informes. En este caso se usarán los pasos de la metodología LCA para nuestro caso de estudio.

El objetivo del estudio de LCA es determinar el impacto ambiental del sistema para ayudar al proceso de toma de decisiones, para la generación sostenible de electricidad en la planta de energía de vapor integrada con la instalación de producción de algas a biodiésel. El alcance que se tiene es realizar un análisis que tenga en cuenta la generación de fuentes de energía primaria (es decir, combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa) y nutrientes consumidos por el sistema, así como el impacto de la fase de construcción de las principales unidades de equipamiento de la central eléctrica y las emisiones emitidas a la atmósfera. Por lo tanto, el sistema mostrado en la Figura 6 se expande para incluir todos los procesos, desde la producción de biomasa de microalgas en estanques abiertos hasta la combustión de biodiesel, además de los asociados con la extracción de materia prima y la generación de energía, así como la producción de nutrientes y materiales de construcción para las principales unidades de equipamiento de la central eléctrica.

Se supone que el impacto ambiental durante la construcción del subsistema de algas a biodiésel es insignificante en comparación con el que se produce durante la operación³². Además, se supone que el agua de reposición para el cultivo de microalgas está disponible sin penalización ambiental, la cantidad de 400 MW de energía eléctrica producida por la central eléctrica se toma como la unidad funcional o base para la comparación de este estudio, mientras que la unidad temporal es de 1 año calendario.

Debido a que la producción de electricidad excede la del biodiesel en términos de valor y contenido de energía total, se supone que la electricidad es responsable de todos los impactos ambientales del sistema integrado. Este supuesto también refleja que la función principal de la instalación de algas para biodiésel es contribuir a mejorar la sostenibilidad de la central termoeléctrica mediante el uso de sus emisiones de CO₂ para la biomitigación simultánea de CO₂ y la producción de biodiesel para reemplazar el combustible fósil.

Para clasificar y caracterizar los inventarios de emisiones de cada etapa del ciclo de vida del Eco-indicador 99, se proponen 11 categorías de impacto, cada categoría de impacto se agrega en una de las tres categorías principales: daño a la salud humana (HH), daño a la calidad del ecosistema (EQ) y daño debido al agotamiento de los recursos (RD). Estas categorías principales se traducen en una sola métrica, el Eco-indicador 99 total. Además, las reducciones de emisiones de Gases de efecto invernadero del ciclo de vida en relación con los combustibles fósiles se modelan en este estudio para determinar el CRÉDITO FISCAL asociado con la operación del sistema integrado.

En el segundo paso de LCA, descrito como análisis de inventario, se realizan los balances de masa y energía para cuantificar las entradas y salidas de materiales y energía asociados con la operación y construcción del sistema para la producción de electricidad y biodiesel.

En este caso, se considerarán las tasas de consumo de fuentes de energía primaria (combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa) y las tasas de flujo de nutrientes y agua como entradas, mientras que las emisiones emitidas a la atmósfera salidas del sistema. Las cantidades de material (acero inoxidable, acero al carbono, vidrio o plástico) requeridas para la construcción de las principales unidades de equipos de las centrales eléctricas también son insumos. El inventario de entradas y salidas directas de energía y masa (recursos utilizados y emisiones liberadas) debe traducirse en el inventario del ciclo de vida correspondiente (es decir, las cargas ambientales) de todos los requisitos relevantes de materia prima y las emisiones liberadas al medio ambiente durante

todo el ciclo de vida del sistema. Matemáticamente, la entrada del inventario del ciclo de vida total (es decir, los requisitos de emisiones y materias primas) del químico \underline{b} está representada por una variable continua LCI_b^{tot} , que se expresa como una función de las corrientes de entrada de energía y masa, así como las emisiones durante la operación del sistema de energía integrado, como se muestra en la ecuación 2.

$$LCI_b^{tot} = \left[\sum_f LCIE_b^f F_f + \sum_{bf} LCIE_b^{bf} F_{bf} + \sum_{bm} LCIE_b^{bm} F_{bm} + \sum_n LCIE_b^n F_n + \sum_{emis} LCIE_b^{emis} F_{emis} + \sum_u LCIE_b^u we_u \right] \cdot b \quad (2)$$

En esta ecuación, las variables: $LCIE_b^f$, $LCIE_b^{bf}$, $LCIE_b^{bm}$ y $LCIE_b^n$ determinan las entradas del inventario del ciclo de vida del químico \underline{b} por unidad de combustible fósil \underline{f} , biocombustible \underline{bf} , biomasa externa \underline{bm} y nutriente \underline{n} , respectivamente. Por otro lado, el parámetro $LCIE_b^u$ representa los requisitos de emisiones liberadas/materia prima del químico \underline{b} durante la fase de construcción por unidad de masa del equipo \underline{u} , y la emisión $LCIE_b^{emis}$ que se refiere a las emisiones del químico \underline{b} por unidad de emisión emitida durante la operación del sistema. Las variables continuas F_f , F_{bf} y F_{bm} son los caudales del combustible fósil \underline{f} , el biocombustible \underline{bf} y la biomasa externa \underline{bm} quemada en la caldera de la central eléctrica, respectivamente; F_n y F_{emis} denotan el consumo de nutrientes \underline{n} y las emisiones totales liberadas durante la operación del sistema. Finalmente, we_u representa el peso del material de construcción para la unidad principal \underline{u} . Cabe señalar que los valores de las entradas de inventario del ciclo de vida se pueden obtener de las bases de datos ambientales o realizando un análisis ad hoc LCA para aquellos componentes que no están en la base de datos³³.

En la evaluación del impacto, como se muestra en la Figura 7, este paso implica la agregación de las emisiones liberadas y los recursos utilizados (fuentes de energía, nutrientes y materiales de construcción) para cuantificar sus posibles impactos ambientales, que luego se reducen a una sola medida del desempeño ambiental del sistema (Eco-indicador 99). Primero, las sustancias del inventario del ciclo de vida se reúnen en una serie de grupos que representan las 11 categorías de impacto del marco del Eco-indicador 99, como se indica en la ecuación 3.

$$IMP_c = \underset{b}{\overset{\circ}{a}} DF_b^c LCI_b^{tot} \cdot c \quad (3)$$

Donde IMP_c es el daño ambiental causado en la categoría de impacto \underline{c} , LCI_b^{tot} es el inventario del ciclo de vida de las emisiones y los requisitos de materia prima

asociados con el químico b y DF_b^c es el factor de daño asociado con el químico b y la categoría de impacto c . Los factores de daño están dados por modelos ambientales específicos que están disponibles en la literatura para cada categoría de impacto¹⁵. Como se muestra en la ecuación anterior, estos factores se utilizan para traducir las entradas y salidas del ciclo de vida en los impactos ambientales a los que pueden contribuir. Además, de que una sustancia del inventario del ciclo de vida puede contribuir a más de una categoría de impacto y que varias sustancias de un grupo pueden contribuir al mismo problema ambiental.

La Figura 7 nos muestra 11 categorías de impacto que se agrupan en tres categorías de daños:

- ✓ La categoría de daños a la salud humana incluye los siguientes impactos: (1) efectos cancerígenos en humanos, (2) efectos respiratorios en humanos causados por sustancias orgánicas, (3) efectos respiratorios en humanos causados por sustancias inorgánicas, (4) daños a la salud humana causados por el cambio climático, (5) efectos en la salud humana causados por radiaciones ionizantes y (6) efectos en la salud humana que son causadas por el agotamiento de la capa de ozono.

Los daños a la salud humana se expresan como AVAD, Años de vida ajustados por discapacidad. El daño de 1 significa que se pierde 1 año de vida de un individuo o que una persona sufre 4 años de una discapacidad con un peso de 0.25.

- ✓ La categoría de calidad del ecosistema incluye los siguientes impactos: (7) daño a la calidad del ecosistema causado por emisiones tóxicas del ecosistema, (8) daño a la calidad del ecosistema causada por la ocupación de la tierra y la conversión de la tierra y (9) daño a la calidad del ecosistema causado por el efecto combinado de acidificación y eutrofización.

Los daños a la calidad del ecosistema se expresan como PDF·m²·año, desaparecen potencialmente la fracción de especies por metro cuadrado y año. Daño de 1 significa que todas las especies desaparecen de 1 m² durante 1 año o el 10% de todas las especies desaparecen de 1 m² durante 10 años.

- ✓ La categoría de agotamiento de recursos incluye los siguientes impactos: (10) daños a los recursos causados por la extracción de combustibles fósiles y (11) daños a la calidad del ecosistema causados por la extracción de minerales.

Los daños a los recursos se expresan como energía excedente MJ. El daño de 1 significa que, debido a una cierta extracción de recursos, la extracción adicional de estos mismos, en el futuro requerirá un MJ adicional de energía debido a la menor concentración de recursos u otras características desfavorables de las reservas restantes.

Por lo tanto, el impacto causado en cada categoría de daño se calcula como:

$$DAM_d = \sum_{c \in IC(d)} \hat{a}_c IMP_c \quad (4)$$

donde IC (d) denota el conjunto de categorías de impacto c que contribuyen a la categoría de daño d .

De acuerdo con la Figura 7, las categorías de daños finalmente se agregan y multiplican por factores de normalización específica (NF_d) y ponderación (WF_d) para calcular la métrica única llamada Eco-indicador 99 (impacto ambiental general), con la siguiente ecuación:

$$EI_{99} = \sum_d \hat{a}_d NF_d WF_d DAM_d \quad (5)$$

Para realizar el proceso de normalización en este estudio, el daño a la salud humana se divide por un factor de 1.54×10^{-2} , el daño a la calidad del ecosistema por 5.13×10^3 y el daño a los recursos por 8.41×10^3 .

La perspectiva de las jerarquías se usa combinada con los factores de ponderación predeterminados (400-400-200 para HH, EQ y RD, respectivamente)²⁹.

La ecuación anterior puede considerarse más en términos del factor de daño general (ODF_{re}) para cada recurso utilizado y la emisión liberada por unidad de flujo de referencia (combustible fósil, biocombustible, biomasa, nutrientes, emisión) o por unidad de peso del equipo u , que puede calcularse mediante la siguiente expresión general:

$$ODF_{re} = \sum_{d \in IC(d)} \hat{a}_d \sum_{c \in IC(d)} \hat{a}_c NF_d WF_d DF_b^c LCIE_b^{re} \quad (6)$$

$re \in (f, bf, bm, n, emis, u)$

Como resultado, el impacto ambiental general del sistema de energía integrado se calcula como la suma del factor de daño general para cada recurso utilizado y la emisión liberada multiplicado por su caudal o peso asociado en el caso del material de construcción, como se indica a continuación:

$$EI_{99} = \left[\sum_f ODF_f F_f + \sum_{bf} ODF_{bf} F_{bf} + \sum_{bm} ODF_{bm} F_{bm} + \sum_n ODF_n F_n + \sum_{emis} ODF_{emis} F_{emis} + \sum_u ODF_u w_u \right] \quad (7)$$

Por lo tanto, el objetivo ambiental consiste en minimizar el impacto ambiental general dado por la ecuación 7. Los factores de daño generales para los recursos utilizados y las emisiones liberadas se dan en la Tabla 2, estos factores se calcularon en base a los datos ambientales proporcionados por PRé Consultants Database²⁹.

Tabla 2. Factores generales de daños para materiales y combustibles.

Material/Combustible	Factor de daño general	Unidades
Acero	0.09	Eco-points/kg de acero
Urea (nitrógeno)	0.13	Eco-points/kg de urea
DAP (fosfato)	0.1	Eco-points/kg de fosfato
Carbón	24.13	Eco-points/toneladas de carbón
Petróleo	157.99	Eco-points/toneladas de petróleo
Gas natural	124.52	Eco-points/toneladas de gas natural
Pasto	2.49	Eco-points/toneladas de pasto
Biogás	15.44	Eco-points/toneladas de biogás
Madera blanda	12.64	Eco-points/toneladas de madera blanda
Madera dura	11.42	Eco-points/toneladas de madera dura
Biodiesel	14.41	Eco-points/toneladas de biodiesel

$$\text{TAX CREDIT} = (\text{Total GHG Reducción de emisiones}) \cdot S^{\text{GHG}}$$

También, la reducción de las emisiones de Gases de efecto invernadero del ciclo de vida de la producción de electricidad y biodiésel por parte del sistema de energía integrado debe tomarse en cuenta para calcular el subsidio total alcanzado de la siguiente forma, donde S^{GHG} es el subsidio unitario para la reducción de las emisiones de Gases de efecto invernadero del ciclo de vida (\$/tonelada de GEI reducida), cada combustible tiene en cuenta las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O que se agrupan en un solo factor de emisión, que se estima utilizando el modelo de Potencial de Calentamiento Global (GWP)³⁴ del IPCC con un marco de tiempo de 100 años. De hecho, para cada combustible, este factor GWP representa el factor de daño total asociado con todas sus emisiones de

gases de efecto invernadero y la categoría de impacto del calentamiento global. Este factor se expresa en kilogramos de emisiones equivalentes de dióxido de carbono por unidad de energía de combustible (es decir, kg de CO₂ equivalentes/kJ). Por lo tanto, la velocidad de flujo de cada fuente de energía primaria (combustible fósil, biocombustible y biomasa) que puede quemarse en la caldera de la central eléctrica se multiplica por el valor de calentamiento más bajo y el factor GWP del combustible para dar sus emisiones de Gases de efecto invernadero del ciclo de vida.

Para determinar la cantidad de reducción de emisiones de Gases de efecto invernadero del ciclo de vida, el sistema de energía integrado debe compararse con las emisiones de un sistema de referencia para la misma cantidad de energía eléctrica producida.

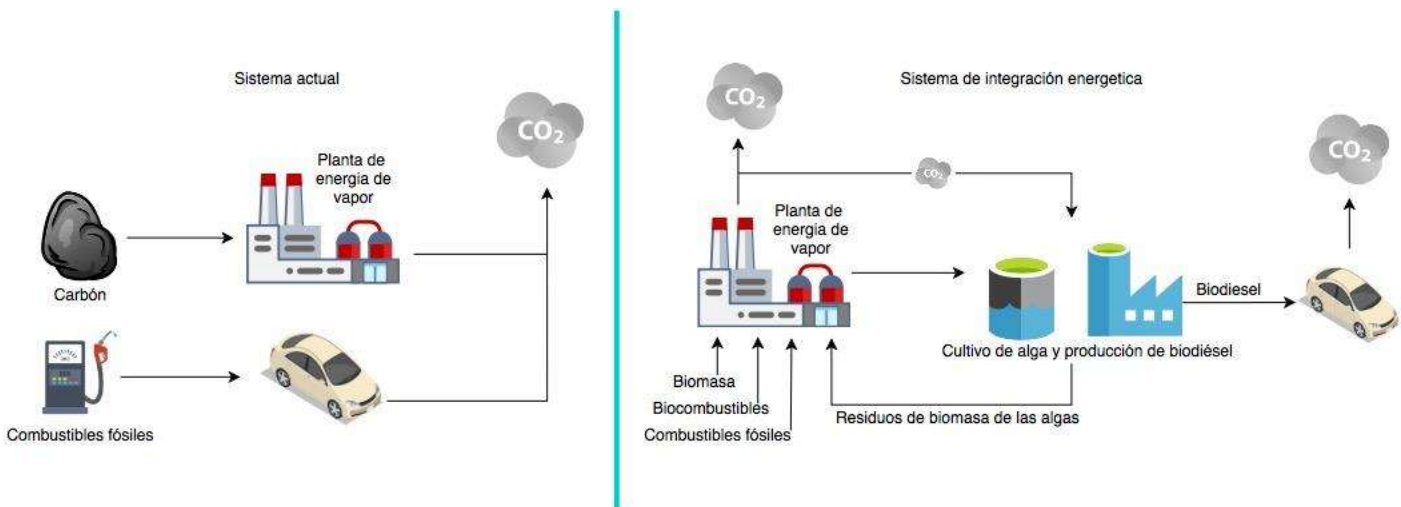


Figura 8 : Flujos de combustible y carbono, sin y con el proceso de producción de biodiésel de algas.

La Figura 8 muestra los flujos de combustible y carbono para el sistema de referencia sin el proceso de producción de biocombustibles de algas y el sistema de energía integrado, que incluye todos los procesos. Debido a que el cambio de combustible de carbón a materia prima de biomasa en la caldera de la planta de energía podría lograrse sin utilizar el enfoque integrador propuesto, sin embargo, solo consideramos la reducción de emisiones de los Gases de efecto invernadero debido al desplazamiento del diésel derivado de fósiles con biodiésel en el sector del transporte para calcular el CRÉDITO TRIBUTARIO para el sistema energético integrado. Por lo tanto, esta variable está dada por:

$$TAX CREDIT = (HV_{FD} Em_{FD}^{LCA} F_{FD} - HV_{BD} Em_{BD}^{LCA} F_{BD}) S^{GHG} \quad (8)$$

donde HV_{FD} y HV_{BD} son los valores de calentamiento del diésel fósil y el biodiesel, respectivamente; Em_{FD}^{LCA} y Em_{BD}^{LCA} son las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida también del diésel fósil y el biodiesel, respectivamente. Cabe señalar que las emisiones directas de CO_2 eliminadas de los gases de combustión de la planta de energía por microalgas no están incluidas en la ecuación anterior porque dicho carbono está incrustado entre dos combustibles renovables (biodiesel y biomasa de algas residuales), y se libera inmediatamente a la atmósfera durante la combustión de los combustibles que resulta en un retiro a largo plazo.

La velocidad de flujo del diésel fósil desplazado se calcula en base al contenido de energía neta equivalente del diésel y biodiesel derivados de fósiles.

Por lo tanto, este caudal se define como:

$$F_{FD} = \frac{HV_{BD}}{HV_{FD}} F_{BD} \quad (9)$$

Los valores de calentamiento y las emisiones de Gases de efecto invernadero del ciclo de vida para el biodiesel y el diésel derivado de fósiles se tomaron de Stephenson³⁵.

Los valores caloríficos más bajos del biodiesel y el diésel fósil se tomaron en 37.2 y 43.1 MJ/kg, mientras que sus emisiones para biodiesel y diésel fósil se tomaron como 713 kg de CO_2 equivalente/tonelada de biodiesel y 3707 kg de CO_2 equivalente/tonelada de diésel.

La interpretación para la solución del problema multi-objetivo consiste en un conjunto de puntos óptimos (de Pareto) que representan diseños de sistemas alternativos, cada uno de los cuales logra una combinación única de los criterios de optimización dados.

En el último paso de la metodología LCA, se analizan las soluciones de Pareto para elegir la mejor solución donde se pueden lograr mejoras ambientales significativas con una disminución marginal en la ganancia bruta anual o de acuerdo con la preferencia del tomador de decisiones y las regulaciones ambientales aplicables.

En el método de solución o método de restricción ξ ^{36,37}, el principal beneficio de usar biocombustibles y biomasa como fuentes de energía en la planta de energía

de vapor junto con la eliminación de microalgas de CO₂ de la corriente de humos para la producción de biodiesel es la reducción del impacto ambiental general. Sin embargo, un menor impacto ambiental se asocia con un menor beneficio bruto anual del sistema. Esto plantea un desafiante problema de optimización multi-objetivo donde el impacto ambiental general (EI99) necesita ser minimizado mientras se maximiza la ganancia bruta anual (PROFIT) del sistema.

Utilizamos el método de restricción $\underline{\epsilon}$ para generar el conjunto de soluciones óptimas que representan las compensaciones entre los criterios económicos y ambientales. La estrategia básica de esta técnica es transformar el problema de optimización de objetivos múltiples en una serie de problemas de optimización de objetivo único, en el que uno de los objetivos se elige para maximizar mientras que el otro se convierte en una restricción adicional que se ve obligado a ser inferior al parámetro épsilon.

Por lo tanto, el problema de optimización de objetivos múltiples de interés puede formularse matemáticamente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \blacksquare \text{ Maximize} \\
 & \text{PROFIT}(x, u, x_D) \\
 & \text{subject to} \\
 & \text{EI99}(x, u, x_D) \leq \epsilon \\
 & h_1(x, u, x_D) = 0 \\
 & g_E(x, u, x_D) \leq 0
 \end{aligned} \tag{P1}$$

en donde $\underline{\epsilon}$ es un parámetro auxiliar que toma diferentes valores para obtener el conjunto completo de soluciones de Pareto. Las restricciones de igualdad h_1 son el sistema de ecuaciones algebraicas no lineales (es decir, relaciones de propiedades termodinámicas, balances de masa y energía, costos y restricciones LCA) que modelan el problema, mientras que las restricciones de desigualdad g_E representan especificaciones de diseño (es decir, límites de capacidad y valores superiores y límites inferiores en las variables de decisión). Los objetivos económicos y ambientales están definidos por las ecuaciones 1 y 7 respectivamente.

El problema bajo consideración involucra un conjunto de variables continuas de optimización \underline{D} llamadas variables de decisión, que se denotan por el vector \underline{x}_D . El vector \underline{x} representa las variables continuas que salen del proceso de optimización (propiedades termodinámicas, tasas de flujo másico, condiciones de operación, y tamaños de unidades de equipo), las variables continuas están relacionadas con

las variables de decisión \underline{x}_D por ecuaciones modelo, los parámetros no modificados durante los cálculos están representados por el vector \underline{u} .

El método de solución propuesto tiene dos bucles anidados externos como el propuesto por Gutiérrez-Arriaga¹⁴. En el bucle externo, el método define los valores $\underline{\varepsilon}$ para los impactos ambientales, en el bucle interno, el problema de optimización única (P1) se resuelve para un valor dado de $\underline{\varepsilon}$.

El algoritmo para resolver el problema del bucle interno combina un módulo de simulación del sistema con una metodología de optimización de dos niveles que involucra algoritmos genéticos (GA)³⁸ y programación lineal (LP).

Los pasos del algoritmo GA-LP acoplado para resolver cada problema de objetivo único son los siguientes:

Primero se genera aleatoriamente una población inicial de un tamaño específico, el número de individuos N_{pop} , la identidad de cada individuo (es decir, el cromosoma) de la población está determinada por las variables de decisión del problema, que pueden cambiar dentro del proceso de optimización de acuerdo con los límites previamente establecidos, por lo tanto, hay N_{pop} diferentes combinaciones de variables de decisión o individuos.

El conjunto de variables de decisión (es decir, variables independientes) para las plantas de energía de vapor que se muestran en la Figura 4 incluye la presión/temperatura del vapor principal, la presión/temperatura del vapor de recalentamiento, las presiones de extracción de vapor, la presión del desaireador y la presión del condensador.

En el siguiente paso, cada generación, la función de aptitud de cada individuo se evalúa mediante simulación y los individuos se clasifican según este criterio.

En este trabajo la función de aptitud corresponde a la función del objetivo económico (beneficio bruto anual), y el objetivo es maximizar su valor, el módulo de simulación proporciona las condiciones de los componentes de la central eléctrica (es decir, variables dependientes) para cada individuo: condiciones de caldera y vapor (temperatura, presión, caudal, caída de presión), condiciones de recalentamiento (temperatura de salida y caída de presión), turbinas de vapor (condiciones de entrada y condiciones de salida de temperatura, presión, entalpía, velocidad de flujo), condiciones de extracción (temperatura, presión, entalpía, velocidad de flujo), condensador (área, así como condiciones de entrada y salida de temperatura, presión, entalpía, velocidad de flujo), calentadores de agua de alimentación (área, entrada de condensado, salida de condensado, entrada de vapor de extracción, condiciones de drenaje de temperatura, presión, entalpía, caudal) y bombas (potencia de la bomba, presión de entrada, presión de salida, caudal). Además, para cada individuo, el módulo de simulación proporciona el calor agregado en la caldera, los flujos de emisión, el costo del equipo en función

del tamaño y otra información para calcular la función del objetivo económico que corresponde a la función de aptitud.

La descripción detallada del problema para obtener el costo mínimo de energía es la siguiente: para cada individuo, el calor requerido por la caldera puede ser proporcionado por múltiples fuentes de energía, incluidos los combustibles fósiles, los biocombustibles y la biomasa.

Por lo tanto, hay varias combinaciones factibles de fuentes de energía en lugar de una sola para satisfacer las demandas de energía de la caldera. Pero sólo uno de ellos permite que la planta de energía de vapor opere al costo mínimo anual de energía para un valor dado del impacto ambiental (es decir, el parámetro $\underline{\epsilon}$ del método de restricción). El problema de la combinación óptima de fuentes de energía se puede formular como un problema de programación lineal para cada individuo de la siguiente forma:

Función objetivo

$$\minimize Z = \sum_{f \in F(nc)} \dot{a}_f c_f F_f + \sum_{bf} \dot{a}_{bf} c_{bf} F_{bf} + \sum_{bm} \dot{a}_{bm} c_{bm} F_{bm} + c_{LD} F_{LD} \quad (10)$$

Sujeto a

$$\blacksquare \quad EI99 = \left[\sum_f ODF_f F_f + \sum_{bf} ODF_{bf} F_{bf} + \sum_{bm} ODF_{bm} F_{bm} + \sum_n ODF_n F_n + \sum_{emis} ODF_{emis} F_{emis} + \sum_u ODF_u we_u \right]$$

$$\sum_{f \in F(nc)} \dot{a}_f h_f HV_f F_f + \sum_{bf} \dot{a}_{bf} h_{bf} HV_{bf} F_{bf} + \sum_{bm} \dot{a}_{bm} h_{bm} HV_{bm} F_{bm} + h_{LD} HV_{LD} F_{LD} = QH \quad (11)$$

$$\sum_{f \in F(nc)} \dot{a}_f Em_f^{Comb} F_f + \sum_{bf} \dot{a}_{bf} Em_{bf}^{Comb} F_{bf} + \sum_{bm} \dot{a}_{bm} Em_{bm}^{Comb} F_{bm} + Em_{LD}^{Comb} F_{LD} = F_{CO_2} \quad (12)$$

$$F_{LD} = S_{Alga} F_{CO_2} \quad (A7)$$

$$F_{N_2} = (0.0689) F_{CO_2} \quad (A12)$$

$$F_{PH} = (0.001475) F_{CO_2} \quad (A13)$$

$$F_f \geq 0, F(nc), F_{bf} \geq 0, F_{bm} \geq 0, F_n \geq 0$$

$$F_{LD} \geq 0, F_{CO_2} \geq 0$$

donde Z es el costo anual de las fuentes de energía; HV_f, HV_{bf}, HV_{bm} y HV_{LD} son los valores de calentamiento del combustible fósil f, biocombustible bf, biocombustible bm y biomasa de algas empobrecidas en lípidos, respectivamente. Em_f^{comb}, Em_{bf}^{comb}, Em_{bm}^{comb} y Em_{LD}^{comb}, son factores de emisión directa de CO₂ de la combustión en la planta de energía para combustibles fósiles f, biocombustibles bf, biomasa bm y biomasa de algas empobrecidas en lípidos, respectivamente. F(nc) denota el conjunto de combustibles fósiles que contribuyen a la reducción de emisiones de Gases de efecto invernadero (gas natural y petróleo) en comparación con el carbón.

En la restricción 7, EI99 es el límite de impacto ambiental previamente fijado por el método de restricción (parámetro ε), la restricción 11, que representa el balance de energía sobre la caldera, muestra que el flujo de energía proporcionado por las fuentes de energía sirve para satisfacer la carga de calor de la caldera QH, η_f, η_{bf}, η_{bm} y η_{LD} son la eficiencia de la caldera para combustibles fósiles f, biocombustibles bf, biomasa bm y biomasa de algas empobrecidas en lípidos, respectivamente, C_f, C_{bf}, C_{bm} y C_{LD} son los costos unitarios para combustibles fósiles f, biocombustibles bf, biomasa bm y biomasa de algas empobrecidas en lípidos, respectivamente, la restricción 12 proporciona el caudal total de CO₂ de la combustión de combustibles fósiles, biocombustibles, biomasa externa y biomasa de algas en la caldera de la central eléctrica.

La Tabla 3 presenta los costos unitarios, los valores de calefacción y las emisiones directas de CO₂ para los combustibles asociados con el problema. Las emisiones directas se obtuvieron del informe SENER-CONUEE¹, como se muestra en esta tabla, el costo unitario de la biomasa de algas empobrecida en lípidos es muy pequeño, por lo que esto siempre será parte de cualquier solución óptima. Por lo tanto, el problema de LP calcula el óptimo de los tipos y cantidades de fuentes de energía primaria, requeridas por la caldera para cada individuo en cada generación (es decir, iteración) del proceso de optimización. Para cada individuo, el modelo LP tiene en cuenta las interacciones de masa y energía entre la central eléctrica y el subsistema de producción de algas a biodiésel.

Tabla 3 . Costos unitarios, valores de calefacción y factores de emisiones directas para combustibles.

Combustibles	Costo unitario (\$/tonelada)	Valores de calentamiento (MJ/tonelada)	Emisiones directas (gCO ₂ /MJ)
Carbón	97.10	35,000	94.60
Petróleo	740	45,200	72.79
Gas natural	855.20	54,000	56.10
Pasto	45	4,480	100.44
Biogás	444	52,000	54.42
Madera blanda	51.67	20,400	111.76
Madera dura	53.31	18,400	111.95
Biodiesel	0.01	28,000	21.43

Posteriormente, los individuos con los mayores valores de la función de condición física (es decir, los individuos más aptos) se seleccionan como padres para generar un nuevo conjunto de individuos (es decir, un nuevo conjunto de variables de decisión). El enfoque de selección fue el enfoque de la ruleta, que se basa en la selección de los padres a través de la simulación en la ruleta, donde el área de selección es proporcional a la función de aptitud. Los padres seleccionados se utilizan para generar una nueva población. Para este propósito, las reproducciones de operadores genéticos, como el conteo de élite (los dos mejores individuos sin cambio pasan a la próxima generación), el cruce (dos individuos seleccionados al azar se combinan para producir un nuevo individuo) y la mutación (se realiza un cambio aleatorio en las variables de búsqueda de un individuo dado para producir un nuevo individuo) se aplican a este grupo seleccionado. De esta manera, se genera una nueva población con el mismo número de individuos que la anterior.

Para el último paso, los individuos de la nueva población se evalúan nuevamente en función de la función de aptitud física. El algoritmo puede continuar evolucionando la población de esta manera indefinidamente. Sin embargo, el proceso de cálculo continúa hasta que se cumpla el criterio de detención (si el número de generaciones es mayor que un número fijo). Cuando se alcanza el criterio de convergencia, el algoritmo se detiene y la mejor solución es una de las generaciones actuales con el mayor beneficio. Tenga en cuenta que este enfoque satisface la restricción ambiental previamente fijada por el método de restricción ϵ .

Se desarrolló un modelo en MATLAB para este análisis en el cual se realizarán equilibrios de materiales y energía del sistema de energía integrado para determinar la materia prima y los insumos de energía, así como para resolver el problema de optimización utilizando GA. Para el presente estudio, utilizamos un tamaño de población de 120 cromosomas y un recuento de élite de dos individuos. La fracción cruzada se tomó como 0.8 y el número de generaciones máximas se seleccionó como 2000.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron las corridas en Matlab del modelo planteado, los resultados obtenidos de los algoritmos genéticos fueron por medio del procedimiento Multi-stage-Holder, los resultados fueron muy similares en cada corrida ya que, si esto no fuese así, se tendría que aumentar el número de generaciones.

En las Tablas 4, 5, 6 se pueden observar los resultados obtenidos, y como se mencionaba anteriormente estos son muy similares, por lo que, solo analizaremos la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la corrida No.1.

MULTI STRANGE HOLDER							
Corrida No.1							
MINIMIZANDO FO	VALOR	EC (EC/AÑO)	VALOR	GANANCIA NETA (\$)	BIODIESEL (\$/AÑO)	GLICEROL (\$/AÑO)	
	0.1	1.65E+08	0.9	\$ 774,874,369.66	\$173,573,000.00	\$1,351,760.00	
	0.2	1.57E+08	0.8	\$ 617,658,918.48	\$164,744,000.00	\$1,282,990.00	
	0.3	1.55E+08	0.7	\$ 514,737,515.60	\$163,151,000.00	\$1,270,590.00	a
	0.4	1.55E+08	0.6	\$ 419,032,992.90	\$163,515,000.00	\$1,273,420.00	
	0.5	1.59E+08	0.5	\$ 337,195,523.58	\$167,602,000.00	\$1,305,250.00	
	0.6	2.99E+07	0.4	\$ 253,226,202.70	\$214,479,000.00	\$1,670,330.00	
	0.7	2.98E+07	0.3	\$ 181,007,411.54	\$213,533,000.00	\$1,662,950.00	b
	0.8	2.87E+07	0.2	\$ 103,796,156.15	\$206,056,000.00	\$1,604,730.00	
	0.9	2.96E+07	0.1	\$ 40,089,182.87	\$212,436,000.00	\$1,654,420.00	
	10	1.57E+08	100	\$ 79,681,474,303.53	\$164,883,000.00	\$1,284,080.00	c
	100	2.71E+07	10	\$ 3,024,385,908.56	\$194,322,000.00	\$1,513,340.00	d
	0	1.62E+08	0	\$ 694,282,728.63	\$170,635,000.00	\$1,328,880.00	

Tabla 5. Resultados de la corrida No.2.

MULTI STRANGE HOLDER Corrida No.2						
MINIMIZANDO FO	VALOR	EC (EC/AÑO)	VALOR	GANANCIA NETA (\$)	BIODIESEL (\$/AÑO)	GLICEROL (\$/AÑO)
	0.1	1.60E+08	0.9	\$ 742,401,356.53	\$168,728,000.00	\$1,314,020.00
	0.2	1.58E+08	0.8	\$ 628,223,796.43	\$166,527,000.00	\$1,296,880.00
	0.3	1.50E+08	0.7	\$ 483,669,373.18	\$157,412,000.00	\$1,225,890.00
	0.4	1.56E+08	0.6	\$ 419,867,260.47	\$163,629,000.00	\$1,274,310.00
	0.5	1.58E+08	0.5	\$ 333,730,554.19	\$166,634,000.00	\$1,297,720.00
	0.6	2.93E+07	0.4	\$ 244,558,101.79	\$210,154,000.00	\$1,636,640.00
	0.7	2.81E+07	0.3	\$ 162,789,631.43	\$201,299,000.00	\$1,567,680.00
	0.8	2.99E+07	0.2	\$ 111,841,871.18	\$214,674,000.00	\$1,671,840.00
	0.9	2.98E+07	0.1	\$ 40,596,886.58	\$213,754,000.00	\$1,664,680.00
	10	1.56E+08	100	\$ 78,812,618,495.64	\$163,662,000.00	\$1,274,570.00
	100	3.11E+07	10	\$ 4,136,127,886.42	\$223,438,000.00	\$1,740,090.00
0	1.49E+08	0	\$ 600,819,791.94	\$156,699,000.00	\$1,220,340.00	

Tabla 6. Resultados de la corrida No.3.

MULTI STRANGE HOLDER Corrida No.3						
MINIMIZANDO FO	VALOR	EC (EC/AÑO)	VALOR	GANANCIA NETA (\$)	BIODIESEL (\$/AÑO)	GLICEROL (\$/AÑO)
	0.1	1.67E+08	0.9	\$ 785,571,644.93	\$175,178,000.00	\$1,364,250.00
	0.2	1.56E+08	0.8	\$ 617,106,993.87	\$164,607,000.00	\$1,281,930.00
	0.3	1.59E+08	0.7	\$ 532,932,635.05	\$167,068,000.00	\$1,301,090.00
	0.4	1.63E+08	0.6	\$ 451,874,287.52	\$171,291,000.00	\$1,333,980.00
	0.5	1.61E+08	0.5	\$ 342,957,714.18	\$169,300,000.00	\$1,318,480.00
	0.6	2.99E+07	0.4	\$ 253,413,526.94	\$214,545,000.00	\$1,670,840.00
	0.7	2.78E+07	0.3	\$ 159,739,075.58	\$199,183,000.00	\$1,551,200.00
	0.8	2.93E+07	0.2	\$ 107,853,889.25	\$210,308,000.00	\$1,637,840.00
	0.9	2.94E+07	0.1	\$ 39,446,095.84	\$210,830,000.00	\$1,641,910.00
	10	1.63E+08	100	\$ 84,396,763,034.87	\$171,053,000.00	\$1,332,130.00
	100	2.78E+07	10	\$ 3,213,577,330.34	\$199,607,000.00	\$1,554,510.00
0	1.52E+08	0	\$ 620,042,527.73	\$159,442,000.00	\$1,241,700.00	

Se graficaron todos los datos de la Tabla 4, con lo cual podemos observar en la Figura 9 la tendencia de los datos, los puntos localizados en la parte inferior, de la gráfica de color azul muestran los valores del EC más altos, mientras que los valores de color rojo muestran los vales de EC más bajos, excluyendo el punto medio donde se le dio un valor de 0.5 al EC y de igual forma 0.5 a la Ganancia que aparece de color verde.

Tabla 4. Resultados de la corrida No.1.

MULTI STRANGE HOLDER Corrida No.1						
MINIMIZANDO FO	VALOR	EC (EC/AÑO)	VALOR	GANANCIA NETA (\$)	BIODIESEL (\$/AÑO)	GLICEROL (\$/AÑO)
	0.1	1.65E+08	0.9	\$ 774,874,369.66	\$173,573,000.00	\$1,351,760.00
	0.2	1.57E+08	0.8	\$ 617,658,918.48	\$164,744,000.00	\$1,282,990.00
	0.3	1.55E+08	0.7	\$ 514,737,515.60	\$163,151,000.00	\$1,270,590.00
	0.4	1.55E+08	0.6	\$ 419,032,992.90	\$163,515,000.00	\$1,273,420.00
	0.5	1.59E+08	0.5	\$ 337,195,523.58	\$167,602,000.00	\$1,305,250.00
	0.6	2.99E+07	0.4	\$ 253,226,202.70	\$214,479,000.00	\$1,670,330.00
	0.7	2.98E+07	0.3	\$ 181,007,411.54	\$213,533,000.00	\$1,662,950.00
	0.8	2.87E+07	0.2	\$ 103,796,156.15	\$206,056,000.00	\$1,604,730.00
	0.9	2.96E+07	0.1	\$ 40,089,182.87	\$212,436,000.00	\$1,654,420.00

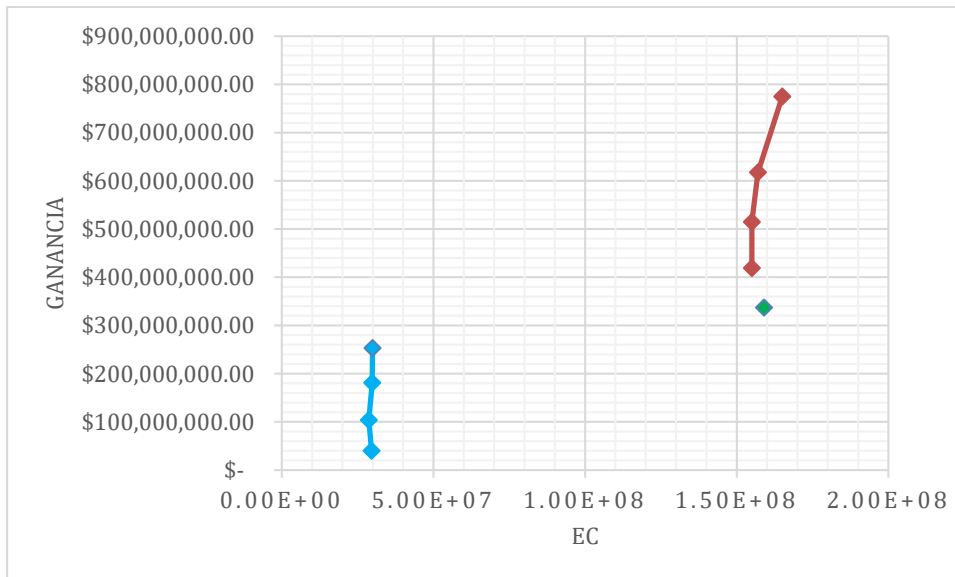


Figura 9 : EC vs GANANCIA NETA, corrida No.1.

Posteriormente se graficaron los datos individuales “a, b” y “c, d” de la Tabla 4, para observar su comportamiento y obtener los resultados pertinentes, pudimos notar que cuando se le dan valores diferentes a la función objetivo llamados “Valor”, ya sea de mayor o menor peso a cada una de las partes su diferencia es exponencial entre ambas.

En la primera parte de la Figura 10, tenemos los datos individuales de a y b donde podemos ver que a pesar de darles valores mínimos de 0.3 y 0.7 en ambas parte de la función objetivo, se puede notar que a mayor EC menor es la GANANCIA NETA y a menor EC mayor será esta.

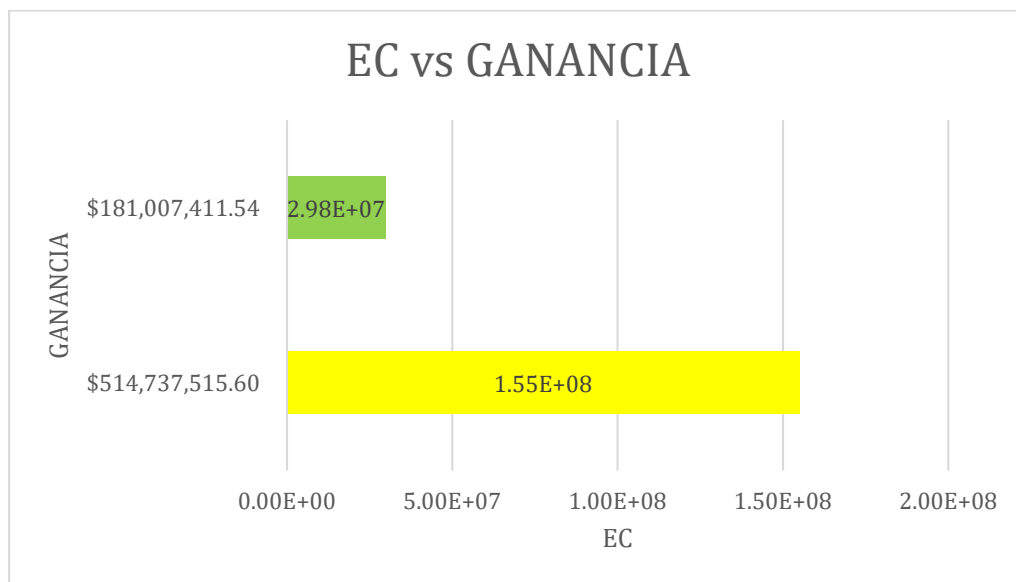


Figura 10 : EC vs GANANCIA NETA, valores a y b.

En la segunda parte en la Figura 11 se graficaron los valores c y d, los cuales su diferencia son mucho mayor, de 10 y 100; sin embargo, a pesar de esto se puede encontrar la similitud con la figura anterior, ya que a pesar de que los resultados son mayores de ambas partes la base sigue siendo la misma a mayor EC menor es la GANANCIA NETA y viceversa.

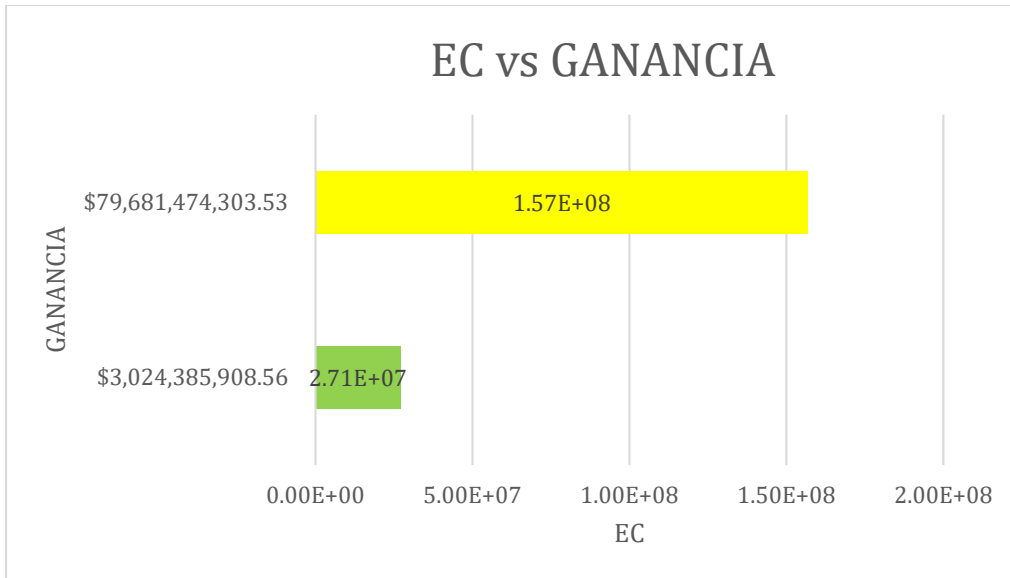


Figura 11 : EC vs GANANCIA NETA, valores c y d.

Se puede representar mejor en la Figura 12, los valores graficados de “c y d”.

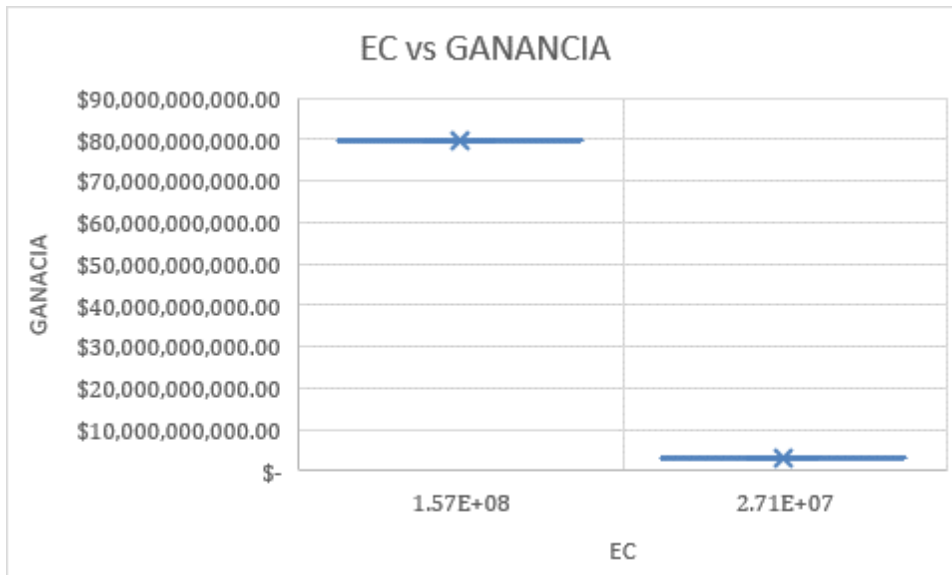


Figura 12 : EC vs GANANCIA NETA.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos como “GANANCIA NETA (\$)” ya tienen contemplado todo, como la venta de electricidad de la planta de potencia, los créditos fiscales, la venta del sistema de algas y la resta del costo total.

CONCLUSIONES

En ese trabajo se ha presentado una estrategia de optimización sistemática para la integración de plantas de potencia y la captura y valorización de las emisiones generadas a través de un sistema de microalgas. El algoritmo contempla el uso de herramientas metaheurísticas programadas en el software Matlab, lo cual permite resolver el problema altamente no convexo. Se implementó un algoritmo de optimización multi-objetivo con una estrategia que permite considerar las diferentes partes involucradas.

Se abordó un caso de estudio para mostrar la aplicabilidad de la metodología propuesta. En base a los resultados obtenidos podemos concluir que se cumplieron con los objetivos planteados, así como podemos afirmar que la hipótesis planteada en base a una estrategia de optimización metaheurística para el diseño de un sistema integrado para la producción de potencia y recuperación de gases de efecto invernadero, produce beneficios tanto económicos como ambientales a través de los resultados obtenidos en el modelo de algoritmos genéticos de Matlab, sin embargo el tomador de decisiones decidirá qué es lo que quiere obtener ya que como pudimos observar en las Figuras 9 y 10, si queremos obtener mayor ganancia tendríamos que perder en la parte del impacto ambiental y viceversa .

REFERENCIAS

- [1] C. G. Gutiérrez-Arriaga, M. Serna-González, J. M. Ponce-Ortega, and M. M. El-Halwagi, "Sustainable integration of algal biodiesel production with steam electric power plants for greenhouse gas mitigation," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 6, pp. 1388–1403, Jun. 2014, doi: 10.1021/sc400436a.
- [2] International Energy Agency, "Global CO₂ emissions in 2019 – Analysis - IEA," 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [3] IEA, "Data & Statistics - IEA," *International Energy Agency*, 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy supply&indicator=Coal production by type>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [4] H. Ritchie and M. Roser, "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions - Our World in Data," *Our World in Data*, 2020. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [5] "Intergovernmental Panel on Climate Change," in *Encyclopedia of Corporate Social Responsibility*, 2013, pp. 1492–1492.
- [6] K. E. Jenni, E. D. Baker, and G. F. Nemet, "Expert elicitations of energy penalties for carbon capture technologies," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 12, pp. 136–145, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.11.022.
- [7] D. J. Farrelly, C. D. Everard, C. C. Fagan, and K. P. McDonnell, "Carbon sequestration and the role of biological carbon mitigation: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21. Elsevier Ltd, pp. 712–727, 01-May-2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.038.
- [8] M. K. Lam, K. T. Lee, and A. R. Mohamed, "Current status and challenges on microalgae-based carbon capture," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 10. Elsevier, pp. 456–469, 01-Sep-2012, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.07.010.
- [9] J. C. M. Pires, M. C. M. Alvim-Ferraz, F. G. Martins, and M. Simões, "Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5. Pergamon, pp. 3043–3053, 01-Jun-2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.055.
- [10] B. Wang, Y. Li, N. Wu, and C. Q. Lan, "CO₂ bio-mitigation using microalgae," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 79, no. 5. Springer, pp. 707–718, 01-Jul-2008, doi: 10.1007/s00253-008-1518-y.
- [11] D. Yue, M. A. Kim, and F. You, "Design of sustainable product systems and supply chains with life cycle optimization based on functional unit: General modeling framework, mixed-integer nonlinear programming algorithms and case study on hydrocarbon biofuels," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 1, no. 8, pp. 1003–1014, Aug. 2013, doi: 10.1021/sc400080x.

- 12.[12] M. R. Brown and S. I. Blackburn, "Biofuels from microalgae," in *Sustainable Energy Solutions in Agriculture*, vol. 0, no. 0, American Chemical Society (ACS), 2014, pp. 277–321.
- 13.[13] M. R. Tredici, "Photobiology of microalgae mass cultures: Understanding the tools for the next green revolution," *Biofuels*, vol. 1, no. 1. Future Science Ltd London, UK, pp. 143–162, Jan-2010, doi: 10.4155/bfs.09.10.
- 14.[14] C. G. Gutiérrez-Arriaga, M. Serna-González, J. M. Ponce-Ortega, and M. M. El-Halwagi, "Multi-objective optimization of steam power plants for sustainable generation of electricity," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 15, no. 4, pp. 551–566, Aug. 2013, doi: 10.1007/s10098-012-0556-4.
- 15.[15] ISO 14040:2006, "Environmental Management, Life Cycle Assessment, Principles and framework," International Standards Organization (ISO): Geneva, Switzerland, 2006.
- 16.[16] ISO 14044:2006, "Environmental Management, Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines.," International Standards Organization (ISO): Geneva, Switzerland, 2006.
- 17.[17] W. Wagner and H.-J. Kretzschmar, "IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam," in *International Steam Tables*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 7–150.
- 18.[18] P. K. Campbell, T. Beer, and D. Batten, "Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 50–56, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.048.
- 19.[19] J. R. Benemann and W. J. Oswald, "Systems and Economic Analysis of Microalgae Ponds for Conversion of CO₂ to Biomass," *Final Rep. to Dep. Energy, Pittsburgh Energy Technol. Cent.*, vol. 95, p. DOE/PC/93204-T5, 1996, doi: 10.2172/493389.
- 20.[20] J. Yang, M. Xu, X. Zhang, Q. Hu, M. Sommerfeld, and Y. Chen, "Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 159–165, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.07.017.
- 21.[21] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae," *Biotechnology Advances*, vol. 25, no. 3. Elsevier, pp. 294–306, 01-May-2007, doi: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.
- 22.[22] D. E. Brune, T. J. Lundquist, and J. R. Benemann, "Microalgal biomass for greenhouse gas reductions: Potential for replacement of fossil fuels and animal feeds," *J. Environ. Eng.*, vol. 135, no. 11, pp. 1136–1144, 2009, doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000100.
- 23.[23] L. Lardon, A. Hélias, B. Sialve, J. P. Steyer, and O. Bernard, "Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae," *Environmental Science and Technology*, vol. 43, no. 17. pp. 6475–6481, 01-Sep-2009, doi: 10.1021/es900705j.
- 24.[24] J. R. Benemann and D. M. Tillett, "Effects of Fluctuating Environments on the Selection of High Yielding Microalgae. Final Report to the Solar Energy Research Institute.," Golden, CO (United States), Feb. 1987.

- 25.[25] E. Molina Grima, E. H. Belarbi, F. G. Acién Fernández, A. Robles Medina, and Y. Chisti, "Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics," *Biotechnol. Adv.*, vol. 20, no. 7–8, pp. 491–515, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0734-9750(02)00050-2.
- 26.[26] M. Heasman, J. Diemar, W. O'connor, T. Sushames, and L. Foulkes, "Development of extended shelf-life microalgae concentrate diets harvested by centrifugation for bivalve molluscs - a summary," *Aquac. Res.*, vol. 31, no. 8–9, pp. 637–659, Aug. 2000, doi: 10.1046/j.1365-2109.2000.318492.x.
- 27.[27] J. R. S. Ventura, B. Yang, Y. W. Lee, K. Lee, and D. Jahng, "Life cycle analyses of CO₂, energy, and cost for four different routes of microalgal bioenergy conversion," *Bioresour. Technol.*, vol. 137, pp. 302–310, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.02.104.
- 28.[28] M. Rickman, J. Pellegrino, J. Hock, S. Shaw, and B. Freeman, "Life-cycle and techno-economic analysis of utility-connected algae systems," *Algal Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 59–65, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.algal.2012.11.003.
- 29.[29] A. Audenaert, S. H. De Cleyn, and M. Buyle, "LCA of low-energy flats using the Eco-indicator 99 method: Impact of insulation materials," *Energy Build.*, vol. 47, pp. 68–73, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.028.
- 30.[30] G. Guillen-Gosalbez, J. X.; A. Caballero, L. J. Esteller, and M. Gadalla, "Application of life cycle assessment to the structural optimization of process flowsheets," *Comput. Aided Chem. Eng.*, vol. 24, pp. 1163–1168, 2007, doi: 10.1016/S1570-7946(07)80218-5.
- 31.[31] J. M. Ponce-Ortega, F. W. Mosqueda-Jiménez, M. Serna-González, A. Jiménez-Gutiérrez, and M. M. El-Halwagi, "A property-based approach to the synthesis of material conservation networks with economic and environmental objectives," *AIChE J.*, vol. 57, no. 9, pp. 2369–2387, Sep. 2011, doi: 10.1002/aic.12444.
- 32.[32] A. F. Clarens, E. P. Resurreccion, M. A. White, and L. M. Colosi, "Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 5, pp. 1813–1819, Mar. 2010, doi: 10.1021/es902838n.
- 33.[33] B. Whitehead, D. Andrews, and A. Shah, "The life cycle assessment of a UK data centre," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20, no. 3, pp. 332–349, 2015, doi: 10.1007/s11367-014-0838-7.
- 34.[34] T. F. Stocker et al., *Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, vol. 9781107057. 2013.
- 35.[35] A. L. Stephenson, E. Kazamia, J. S. Dennis, C. J. Howe, S. A. Scott, and A. G. Smith, "Life-cycle assessment of potential algal biodiesel production in the United Kingdom: A comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors," *Energy and Fuels*, vol. 24, no. 7, pp. 4062–4077, Jul. 2010, doi: 10.1021/ef1003123.
- 36.[36] HAIMES YV, LASDON LS, and WISMER DA, "On a bicriterion formation of the problems of integrated system identification and system

- optimization,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. SMC-1, no. 3, pp. 296–297, Jan. 1971, doi: 10.1109/TSMC.1971.4308298.
- 37.[37] U. M. Diwekar, “A novel sampling approach to combinatorial optimization under uncertainty,” *Comput. Optim. Appl.*, vol. 24, no. 2–3, pp. 335–371, Feb. 2003, doi: 10.1023/A:1021866210039.
- 38.[38] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search and Optimization*. Addison Wesley Publishing Co. Inc., 1989.
- 39.[39] J. Gong and F. You, “Value-added chemicals from microalgae: Greener, more economical, or both?,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 82–96, Jan. 2015, doi: 10.1021/sc500683w.
- 40.[40] J. Gong and F. You, “Optimal processing network design under uncertainty for producing fuels and value-added bioproducts from microalgae: Two-stage adaptive robust mixed integer fractional programming model and computationally efficient solution algorithm,” *AIChE J.*, vol. 63, no. 2, pp. 582–600, Feb. 2017, doi: 10.1002/aic.15370.
- 41.[41] L. G. Hernández-Pérez, E. Sánchez-Tuirán, K. A. Ojeda, M. M. El-Halwagi, and J. M. Ponce-Ortega, “Optimization of Microalgae-to-Biodiesel Production Process Using a Metaheuristic Technique,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 9, pp. 8490–8498, May 2019, doi: 10.1021/acssuschemeng.9b00274.
- 42.[42] W. Wu and J. S. Chang, “Integrated algal biorefineries from process systems engineering aspects: A review,” *Bioresource Technology*, vol. 291. Elsevier Ltd, p. 121939, 01-Nov-2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121939.
- 43.[43] S. Dickinson *et al.*, “A review of biodiesel production from microalgae,” *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 19, no. 3. Springer Verlag, pp. 637–668, 18-Nov-2017, doi: 10.1007/s10098-016-1309-6.