



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“Optimización en la producción de electricidad utilizando energía solar acoplada a sistemas de almacenamiento térmico y a la captura de CO₂ con un sistema de algas”

TESIS presentada por:

José Francisco Hernández Martínez

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: **Doctor en Ciencias en Ingeniería Química José María Ponce Ortega**

Co-Asesor: **Doctor en Ciencias en Ingeniería Química Medardo Serna González**

Morelia, Michoacán

Octubre Del 2016

ABSTRACT

Optimal Design of Integrated Solar Power Plants Accounting for the Thermal Storage System and CO₂ Mitigation through an Algae System

By:

I.Q José Francisco Hernández Martínez

October of 2016

Master in Sciences in Chemical Engineering

Supervised by Dr. José María Ponce Ortega

The electricity generation through the burning of fossil fuels is one of the main contributors to the climate change problem. The use of renewable energy is a promising strategy to help mitigating this problem. This paper considers two forms of renewable energy: solar and biomass (algae) for power generation. The paper also accounts for the thermal storage of solar energy. A multi-objective optimization formulation is developed to reduce greenhouse gas emissions and cost in the electricity generation process. The model is based on a new superstructure that incorporates various design configurations and screens different thermal storage systems. A case study is presented to show the applicability of the proposed approach and how the economic and environmental objectives can be reconciled.

RESUMEN

Optimización en la producción de electricidad utilizando energía solar acoplada a sistemas de almacenamiento térmico y a la captura de CO₂ con un sistema de algas

Por

I.Q José Francisco Hernández Martínez

Octubre 2016

Maestría en Ingeniería Química

Dirigido por: Dr. José María Ponce Ortega

La generación de electricidad a través de la quema de combustibles fósiles en los ciclos de potencia es uno de los principales sistemas que contribuyen a las emisiones de gases con efecto invernadero. En la actualidad, el uso de energías renovables con el fin de mitigar los efectos que ha tenido el uso de combustibles fósiles es una realidad en varias partes del mundo. En esta Tesis se presenta un modelo matemático de optimización multi-objetivo con el cual se desea minimizar el CO₂ emitido a la atmosfera por el proceso de generación de electricidad al menor costo. Se propone el uso de energía solar a través de un concentrador solar y se incorpora la posibilidad del uso de nuevas tecnologías como lo son los sistemas de almacenamiento térmico, aunados a un ciclo de potencia convencional. Esto para disminuir el uso de combustibles fósiles y las emisiones de gases con efecto invernadero. También se propone utilizar como nutriente las emisiones generadas en la caldera para el cultivo de algas, con lo cual se pretende reducir aún más las emisiones al ambiente. El modelo está basado en una nueva superestructura que incorpora el diseño y la selección óptima de diferentes unidades de almacenamiento y la producción de biodiesel utilizando algas. Un caso de estudio es presentado, el cual muestra soluciones atractivas desde el punto de vista ambiental y económico.

Palabras clave: *Energía solar, sistemas de almacenamiento térmico, cultivo de algas, emisiones de CO₂, optimización multi-objetivo.*

DEDICATORIA

A mi padre José Julián Hernández Juárez:

Por apoyarme y orientarme en todas las decisiones que he tomado.

A mi madre Petra Esther Martínez Ortiz:

Por escucharme y guiarme a ser mejor

**A mis hermanas Kenia Guadalupe Hernández Martínez e Itzumi Yuliana Hernández
Martínez:**

Por estar en todo momento a mi lado

**A mis amigos Olimpia Alonso, José Antonio Meza Contreras, Sergio Iván Guido
Martínez y Mariana Montoya:**

**Por tantas vivencias que hemos tenido y el sin fin de cosas que he aprendido con
ustedes.**

ÍNDICE

ABSTRACT.....	II
RESUMEN	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
NOMENCLATURA.....	IX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MARCO TEÓRICO	2
1.1.1 Energía solar: Concentradores solares.....	3
1.1.2 Sistemas de almacenamiento térmico	5
1.1.3 Sistemas de cultivo de algas y productos provenientes de ellas.....	10
1.2 ANTECEDENTES.....	14
1.3 HIPÓTESIS.....	17
1.4 OBJETIVOS	17
1.4.1 Objetivo General	17
1.4.2 Objetivos específicos	17
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	18
1.6 ALCANCE	19
2 METODOLOGÍA.....	20
2.1 SUPERESTRUCTURA	20
2.2 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	21
2.2.1 Balance de energía para el concentrador solar	21
2.2.2 Restricción para denotar la existencia del concentrador solar	22
2.2.3 Balance para cada sistema de almacenamiento.....	22
2.2.4 Fronteras de capacidad y elección de la existencia para los sistemas de almacenamiento.....	23
2.2.5 Balance para el intercambiador de calor	24
2.2.6 Restricciones para el intercambiador	24
2.2.7 Balance en el boiler	24
2.2.8 Restricciones para la instalación y capacidad del boiler	25
2.2.9 Balance en la turbina.....	25
2.2.10 Límites para la capacidad y determinación de existencia de la turbina.....	26
2.2.11 Balance para el condensador	26
2.2.12 Restricciones para determinar la existencia y capacidad del condensador	27
2.2.13 Balance en la bomba.....	27
2.2.14 Restricciones para determinar las dimensiones y existencia de la bomba	28
2.2.15 Emisiones generadas por el boiler.....	28
2.2.16 Producción de algas	29
2.2.17 Producción de biodiesel	29
2.2.18 Cogeneración en la producción de biodiesel.....	29
2.2.19 Costo del sistema	30
2.2.20 Ganancias económicas del sistema	31
2.2.21 Función objetivo	31

3 RESULTADOS	33
3.1 CASO DE ESTUDIO 1: VALIDACIÓN DEL MODELO SOLO PARA SISTEMAS CON ENERGÍA SOLAR	33
3.2 CASO DE ESTUDIO 2. SISTEMA INTEGRADO	36
<i>3.2.1 Sistema con baja radiación</i>	<i>37</i>
<i>3.2.2 Sistema con alta radiación</i>	<i>41</i>
4 CONCLUSIÓN	47
5 REFERENCIAS	48

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MATERIALES SÓLIDOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE CALOR SENSIBLE.....	6
TABLA 2. MATERIALES LÍQUIDOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE CALOR SENSIBLE.....	6
TABLA 3. MATERIALES CON CAMBIO DE FASE UTILIZADOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE CALOR LATENTE.....	8
TABLA 4. MATERIALES UTILIZADOS PARA EL ALMACENAMIENTO TERMOQUÍMICO.....	9
TABLA 5. PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA DE ALGAS POR LA MITIGACIÓN DE CO₂.	11
TABLA 6. ESPECIFICACIONES DE OPERACIÓN ANDASOL 1.....	34
TABLA 7. VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO PARA DOS CASOS (INVIERNO Y VERANO).....	36
TABLA 8. RESULTADOS PARA LOS ESCENARIOS PROPUESTOS.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 EMISIONES DE GASES CON EFECTO INVERNADERO POR SECTOR	2
FIGURA 2 SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA SOLAR.....	4
FIGURA 3 ACUMULADOR DE VAPOR.....	7
FIGURA 4 CONFIGURACIONES UTILIZADAS EN EL ALMACENAMIENTO DE CALOR LATENTE (A) PLATO PLANO; (B) TUBO Y CORAZA CON FLUJO INTERNO; (C) TUBO Y CORAZA CON FLUJO PARALELO; (D) TUBO Y CORAZA CON FLUJO CRUZADO; (E) LECHO EMPACADO CON ESFERAS.....	8
FIGURA 5 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TERMOQUÍMICO.....	10
FIGURA 6 SISTEMAS DE CULTIVO DE ALGAS: A) ESTANQUE ABIERTO; B) FOTOBIOREACTOR TUBULAR... ..	12
FIGURA 7 RECURSOS, PRODUCTOS INTERMEDIOS Y COMBUSTIBLES COMO PROVENIENTES DE ALGAS.....	12
FIGURA 8 CLASIFICACIÓN DE MODELOS EN FUNCIÓN DE TIPO DE VARIABLES.....	13
FIGURA 9 SUPERESTRUCTURA PROPUESTA.....	20
FIGURA 10 RADIACIÓN SOLAR EN GRANADA, ESPAÑA.....	34
FIGURA 11 ESQUEMA PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO.....	35
FIGURA 12 CURVA PARETO Y ESCENARIOS PROPUESTOS.....	36
FIGURA 13 ESQUEMA PARA EL ESCENARIO A.....	38
FIGURA 14 ESQUEMA PARA EL ESCENARIO B.....	39
FIGURA 15 ESQUEMA PARA EL ESCENARIO C.....	40
FIGURA 16 ESQUEMA PARA EL ESCENARIO D.....	41
FIGURA 17 ESQUEMA PARA EL ESCENARIO E.....	43
FIGURA 18 ESQUEMA PARA EL ESCENARIO F.....	44
FIGURA 19 ESQUEMA PARA EL ESCENARIO G.....	45
FIGURA 20 ESQUEMA PARA EL ESCENARIO H.....	46

NOMENCLATURA

Parámetros

a	Costo fijo unitario, US\$
$Alga^{MAX}$	Máxima capacidad de producción algas, kg/m ²
ASR_t	Radiación solar por área, Wh/m ²
b	Costo variable, US\$
c	Factor de economías de escala adimensional
H_D	Tiempo de operación por año, h/año
k_F	Factor de anualización, 1/año
$Q_s^{Almacenamiento_MAX}$	Máxima capacidad de almacenamiento para cada periodo s , kWh
Q^{Cond_MAX}	Máxima capacidad del condensador, kWh
Q^{Boiler_MAX}	Máxima capacidad del boiler, kWh
Q^{Bomba_MAX}	Máxima capacidad de la bomba, kWh
Q^{HX_MAX}	Máxima capacidad del intercambiador, kWh
Q^{Solar_MAX}	Máxima capacidad de energía solar, kWh
$P^{Turbina_MAX}$	Máxima capacidad de la turbina, kW
RL	Factor de recuperación de lípidos
$TRANS$	Factor de transesterificación
$UCP^{Vendida}$	Costo unitario de la potencia vendida, US\$/kW
UOC	Costo unitario de operación, US\$/h

Letras griegas

β^{PDBP}	Factor de producción de biodiesel
----------------	-----------------------------------

$\eta_s^{Almacenamiento}$	Eficiencia en los sistemas de almacenamiento
$\eta^{Condensador}$	Eficiencia en el condensador
$\eta^{Emisiones}$	Eficiencia de emisiones
$\eta^{Turbina}$	Eficiencia en la turbina
μ	Factor de emisión
Ω	Factor de producción de alga seca

Subíndices

s	Sistemas de almacenamiento
t	Periodo de tiempo

Variables binarias

y^{Algae}	Existencia del sistema de algas, 0 ó 1
$y_s^{Almacenamiento}$	Existencia de los sistemas de almacenamiento, 0 ó 1
y^{Boiler}	Existencia del boiler, 0 ó 1
y^{Bomba}	Existencia de la bomba, 0 ó 1
$y^{Condensador}$	Existencia del condensador, 0 ó 1
y^{CS}	Existencia del concentrador solar, 0 ó 1
y^{HX}	Existencia del intercambiador, 0 ó 1
$y^{Turbina}$	Existencia de la turbina, 0 ó 1

Variables

AA	Área para las algas, Ha
------	-------------------------

$A^{Producción}$	Producción de algas, kg
A^{CS}	Área del concentrador solar, Ha
$Alga^{CAP}$	Capacidad de la producción de algas, kg/m ²
CAP	Capacidad, kWh
$CAPCost$	Costo de capital, US\$/año
$GHGE_t$	Emisiones con efecto invernadero, kg/h
E_t	Emisiones de CO ₂ , kg/h
$E_t^{Alga_Absorción}$	CO ₂ absorbido por las algas, kg/h
ET	Emisiones totales
$F^{Biodiesel}$	Producción de biodiesel, kg/año
$OpCost$	Costo de operación, US\$/año
$P_t^{Cogeneracion_PB}$	Potencia enviada hacia el sistema de algas, kW
P_t^{CR}	Potencia generada en el ciclo Rankine, kW
$P^{Demanda_PB}$	Potencia demandada por el sistema de algas, kW
$P^{Turbina_CAP}$	Capacidad de la turbina, kW
$P_t^{Vendida}$	Potencia vendida, kW
$Q_{s,t}^{Almacenado}$	Energía almacenada, kWh
$Q_{s,t-1}^{Almacenado}$	Energía almacenada en un tiempo anterior, kWh
$Q_{s,t}^{Almacenado_CR}$	Energía almacenada que será enviada al ciclo Rankine, kWh
$Q_s^{Almacenamiento_CAP}$	Capacidad de almacenamiento, kWh
Q_t^{Boiler}	Energía generada en el boiler, kWh

Q^{Boiler_CAP}	Capacidad del boiler, kWh
Q_t^{Bomba}	Flujo enviado desde la bomba hacia boiler, kWh
$Q_t^{Cond_Bomba}$	Flujo de energía enviado del condensador a la bomba, kWh
Q^{Cond_CAP}	Capacidad del condensador, kWh
$Q_t^{HX_CR}$	Flujo de energía del intercambiador de calor hacia el ciclo Rankine, kWh
Q^{HX_CAP}	Capacidad del intercambiador, kWh
Q_t^{Solar}	Energía absorbida por el concentrador solar, kWh
$Q_{s,t}^{Solar_ACL}$	Flujo enviado desde el CS hasta el ACL, kWh
$Q_{s,t}^{Solar_Almacenamiento}$	Flujo desde el CS hacia todos los sistemas de almacenamiento, kWh
$Q_{s,t}^{Solar_ASDT}$	Flujo enviado desde el CS hasta el ASDT, kWh
$Q_{s,t}^{Solar_ASUT}$	Flujo enviado desde el CS hasta el ASUT, kWh
$Q_{s,t}^{Solar_AT}$	Flujo enviado desde el CS hasta el AT, kWh
$Q_{s,t}^{Solar_AV}$	Flujo enviado desde el CS hasta el AV, kWh
Q^{Solar_CAP}	Capacidad del CS, kWh
$Q_t^{Solar_CR}$	Flujo enviado desde CS hacia el ciclo Rankine, kWh
$Q_t^{Turbina}$	Flujo que entra en la turbina, kWh
$Q_t^{Turbina_Cond}$	Flujo enviado desde la turbine hacia el condensador, kWh
TAC	Costo total anual, US\$/año
TCOST	Costo total, US\$/año
TSALES	Ventas totales, US\$/año
VB	Venta de biocombustible, US\$/año
VP	Venta de potencia, US\$/año

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abordará una breve introducción de las diferentes tecnologías para el uso de energía solar en la producción de electricidad, así como las implicaciones de cómo estas han tenido una cierta aceptación por parte del sector industrial y social debido a la reducción de CO₂ que estas representan. Además, se presenta una descripción de las tecnologías de almacenamiento térmico, las cuales representan una opción para prolongar el uso de la energía solar. Hasta el momento el uso de energía solar, incluso utilizando sistemas de almacenamiento térmico, no logran trabajar de manera continua en la producción de electricidad debido que esto nos llevaría a unidades de gran tamaño, lo cual está limitado por el área disponible para estos sistemas y el costo que esto conlleva, es por esto que aunado al uso de energía renovable se propone la integración de un ciclo de potencia convencional. Más adelante también se describen los tipos de cultivos de algas que pueden utilizar como nutriente parte del CO₂ emitido por la caldera en el ciclo de potencia, de igual manera que el proceso para convertir éstas en biodiesel. Los sistemas mencionados anteriormente conforman el modelo matemático propuesto en esta Tesis. Por esto se presenta una breve información sobre los tipos de problemas matemáticos y su modelación.

1.1 Marco teórico

En la actualidad, el consumo de electricidad utilizada para cubrir las necesidades y comodidades de la sociedad ha ido en aumento. En este sentido, los combustibles fósiles para la generación de electricidad han sido el principal recurso utilizado para este fin. El uso de este tipo de combustibles contribuye de manera importante a las emisiones de gases con efecto invernadero, los cuales afectan de manera adversa al medio ambiente, sistemas socioeconómicos y a nuestra salud física. En la **Figura 1** se puede observar la cantidad de gases con efecto invernadero que fue generada desde el año 1990 (EPA, 2014), predominando el sector energético, las emisiones debido al transporte internacional (aviación y marina) están separadas del sector energético porque no forman parte de inventarios individuales por país. El sector energético incluye todas las otras actividades de transporte.

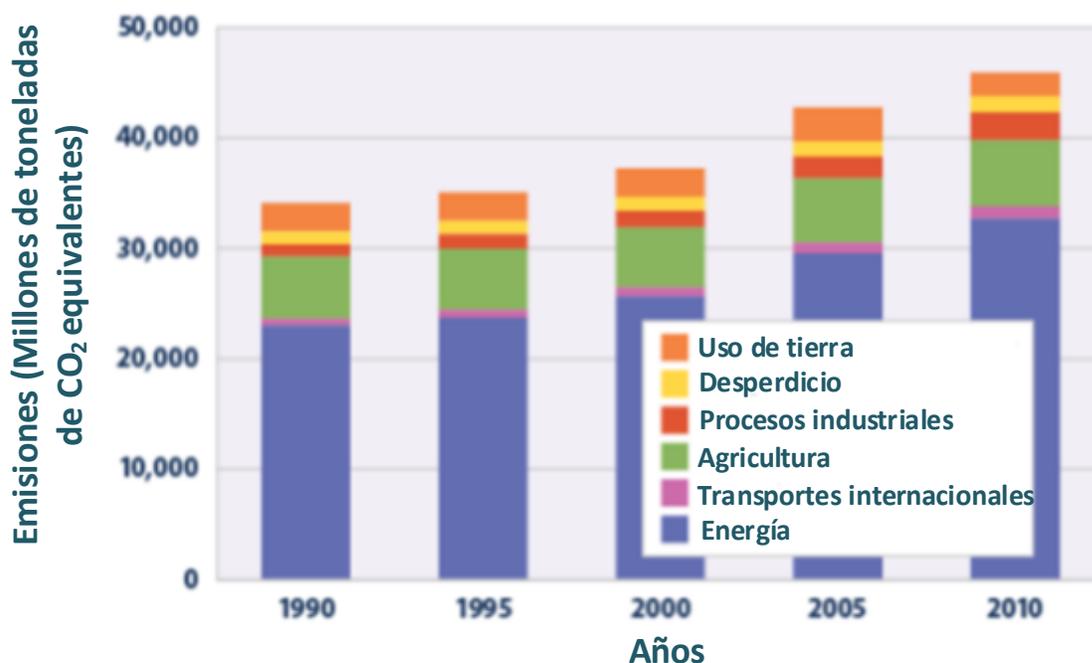


Figura 1 Emisiones de gases con efecto invernadero por sector

1.1.1 Energía solar: Concentradores solares

Con el uso de energías renovables como la energía solar, es posible disminuir el uso de combustibles fósiles y los gases de efecto invernadero que con su quema generan. Existen diferentes sistemas que utilizan la energía solar para la generación de electricidad, en este trabajo nos enfocaremos en los concentradores solares (CS) como los son las torres de concentración, discos parabólicos, reflectores lineales tipo Fresnel y concentradores cilíndricos parabólicos Pitz-Paal y col (2013) (**Figura 2**). Los sistemas solares de disco (**Figura 2a**) son capaces de seguir la trayectoria del sol, de esta manera pueden siempre dirigir los rayos del sol directamente a un punto focal, el cual se encuentra en la parte superior del disco concentrador. El equipo para la generación de potencia puede utilizar un motor Stirling montado junto al punto focal del disco, haciendo este sistema adecuado para su operación remota. Este sistema también puede ser utilizado con un cierto número de discos, cada uno recolectando energía, convirtiéndola en vapor para generar electricidad en una central de mayor capacidad.

Una sistema solar de torre central (**Figura 2b**) utiliza un conjunto de reflectores (heliostatos), los cuales concentran la energía solar en un punto específico de la torre, en la cual se encuentra un intercambiador de calor, aquí es donde se genera el vapor que entrará a la turbina y generará electricidad. En este sistema las pérdidas energéticas se ven minimizadas debido a la reflexión directa de los heliostatos, ya que en otros sistemas es posible que se encuentren pérdidas por convección, debido a su naturaleza. Este tipo de sistema puede llegar a abarcar grandes superficies, lo cual dependerá de la capacidad de reflexión de los heliostatos, su tiempo de vida y de la radiación solar del lugar donde se encuentre la planta.

El sistema más utilizado para la generación de electricidad por medio de energía solar son los concentradores cilíndricos parabólicos (**Figura 2c**). Este tipo de sistema enfoca los rayos solares en un conducto, el cual se encuentra en el centro de la parábola. El concentrador cuenta con una inclinación la cual se mueve de este a oeste siguiendo la trayectoria del sol, asegurando que la energía sea enfocada continuamente sobre el conducto. A diferencia de los sistemas anteriores, los cuales pueden generar vapor directamente desde su punto focal, este sistema generalmente utiliza un fluido de transferencia, el cual se hace pasar por el conducto

donde se concentra la energía solar, transfiriendo esta energía en un intercambiador de calor para generar el vapor que será enviado a la turbina para la generación de electricidad, el fluido exhausto es regresado al colector solar para ser calentado. Cada cilindro parabólico es acomodado formando hileras paralelas alineadas sobre un eje horizontal de norte a sur.

El reflector lineal Fresnel (**Figura 2d**) utiliza lentes Fresnel, los cuales tienen una amplia apertura y una corta distancia focal. Estos lentes son montados en la base del sistema para reflejar los rayos del sol en el absorbedor, que se encuentra por encima de los reflectores, éste suele tener un reflector cóncavo cerca del conducto absorbedor. Este sistema sigue el movimiento natural del sol, también es posible ajustar el ángulo del receptor para una mejor absorción.

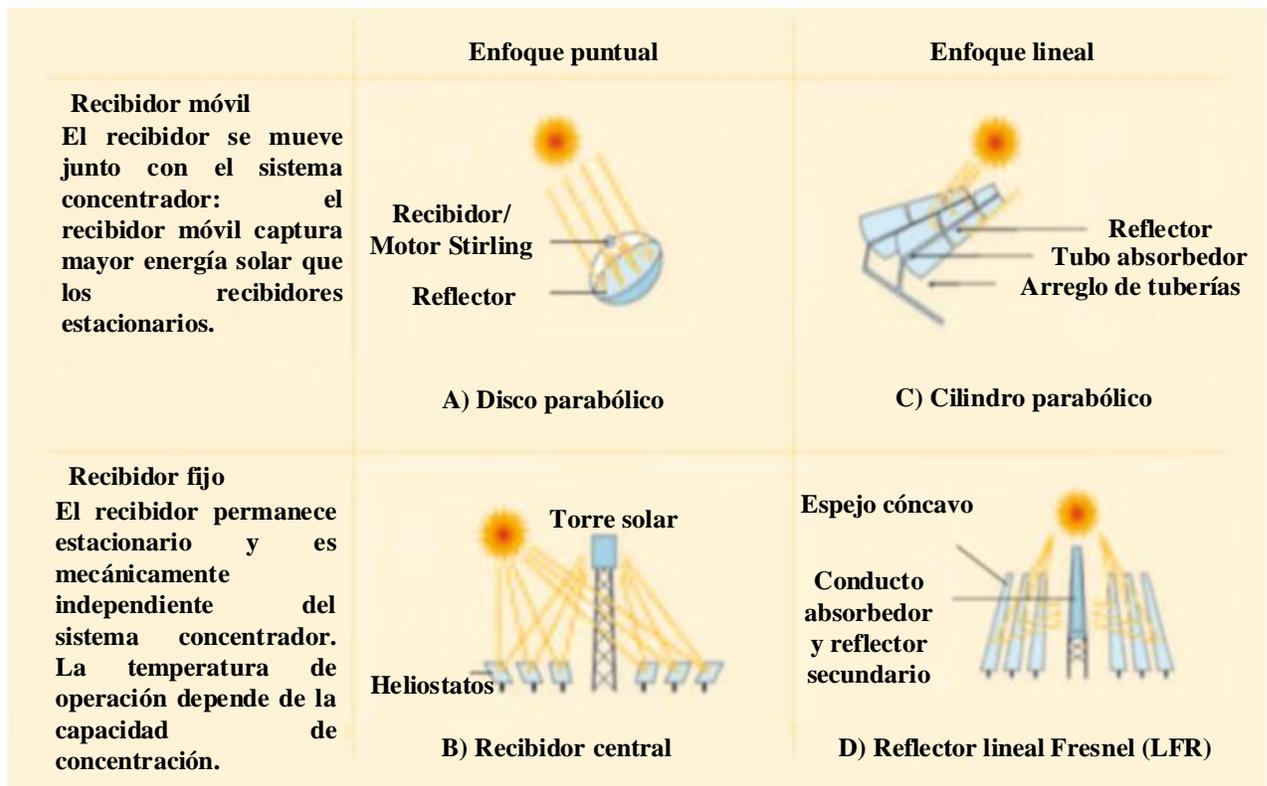


Figura 2 Sistemas concentradores de energía solar.

1.1.2 Sistemas de almacenamiento térmico

La capacidad para generar electricidad de los sistemas antes mencionados se encuentran limitados por la disponibilidad horaria de la energía solar, así como del clima y las estaciones del año. Es por eso que se han propuesto diferentes sistemas de almacenamiento térmico (SAT), los cuales ofrecen la posibilidad de almacenar parte de la energía solar recolectada por un concentrador solar, para utilizarla cuando el uso directo de ésta no sea posible. Estos sistemas de almacenamiento son clasificados dependiendo de su naturaleza, lo cual implica almacenamiento de calor sensible (ACS), calor latente (ACL) y termoquímico (AT).

Es posible utilizar dos métodos para la absorción de calor y almacenamiento, directo e indirecto. El método directo utiliza el mismo fluido que entra al concentrador solar para su almacenamiento. Cuando es necesario utilizar la energía absorbida por el fluido, éste se hace pasar por un intercambiador de calor, en el cual se genera el vapor para su uso en el ciclo de potencia, una vez que el fluido transfirió su energía, es enviado nuevamente al concentrador solar. El método indirecto utiliza un fluido de transferencia de calor (FTC) para recolectar la energía del concentrador solar y otro para el almacenamiento de energía. Esto conlleva a la necesidad de otro intercambiador de calor, uno para que el FTC proveniente del concentrador solar transfiera su calor al material de almacenamiento y otro para cuando el material de almacenamiento requiera transferir su energía para la generación de vapor.

Los sistemas más utilizados para el ACS son los sistemas de uno y dos tanques. Existe una gran cantidad de materiales para este tipo de almacenamiento, tanto en estado sólido como líquido, los cuales son presentados en las **Tablas 1 y 2** por Tian y Zhao (2013). Un considerable número de plantas solares utilizan sales fundidas en sus sistemas de almacenamiento, por su costo y capacidad de almacenamiento. En los sistemas de un sólo tanque que utilizan sales fundidas se aprovecha la capacidad de flotación de estos materiales, con lo cual al cargarse el tanque con las sales calientes, se acomodan de manera estratificada por su diferencia de temperatura.

Cuando sucede el ciclo de descarga, las sales exhaustas que salen del intercambiador de calor, son enviadas al mismo tanque lo cual genera nuevamente capas a diferentes

temperaturas, esto disminuye la capacidad del sistema para entregar calor. En los sistemas de dos tanques se trata de evitar que las sales exhaustas sean almacenadas en el mismo tanque, es por ello que se utiliza un tanque para almacenar las sales frías y otro para las sales calientes, con esto se obtienen temperaturas de descargas más constantes que en los sistemas de un solo tanque, esto se ve reflejado en una mayor capacidad de almacenamiento, pero también un aumento en el costo del sistema, debido principalmente al tanque extra y al bombeo de las sales de un tanque a otro.

Tabla 1. Materiales sólidos para el almacenamiento de calor sensible.

Materiales	Temp. de trabajo (°C)	ρ (kg/m³)	λ (W/m K)	c_p (kJ/kg °C)	Costo por kg (US\$/kg)
Arena-Roca	200-300	1700	1	1.3	0.15
Concreto	200-400	2200	1.5	0.85	0.05
Hierro	200-400	7200	37	0.56	1
NaCl	200-500	2160	7	0.85	0.15
Acero	200-700	7800	40	0.6	5
Ladrillos de Sílice	200-700	1820	1.5	1	1
Ladrillos de Magnesita	200-1200	3000	5	1.15	2

Tabla 2. Materiales líquidos para el almacenamiento de calor sensible.

Materiales	Temp. de trabajo (°C)	ρ (Kg/m³)	λ (W/m K)	c_p (kJ/kg °C)	Costo por kg (US\$/kg)
Aceite mineral	200-300	770	0.12	2.6	0.3
Aceite sintético	250-350	900	0.11	2.3	3
Aceite de silicón	300-400	900	0.1	2.1	5
Sales de nitratos	250-450	1825	0.57	1.5	1
Sodio líquido	270-530	850	71	1.3	2
Sales de nitratos	265-565	1870	0.52	1.6	0.5
Sales de carbonatos	450-850	2100	2	1.8	2.4

Uno de los sistemas de (ACL) más conocidos son los acumuladores de vapor Medrano y col. (2010) (**Figura 3**). Estos almacenan vapor en un tanque que contiene cierta cantidad de agua, al entrar el vapor en el tanque le transfiere energía al agua condensando cierta parte del vapor, la temperatura del agua aumenta hasta llegar a ser líquido saturado. Cuando existe una demanda de vapor, se disminuye la presión en el tanque, el cual actúa como un sistema flash proporcionando vapor saturado al ciclo de potencia. Este tipo de

sistema es comúnmente utilizado en plantas de potencia pequeñas debido a su capacidad de almacenamiento.

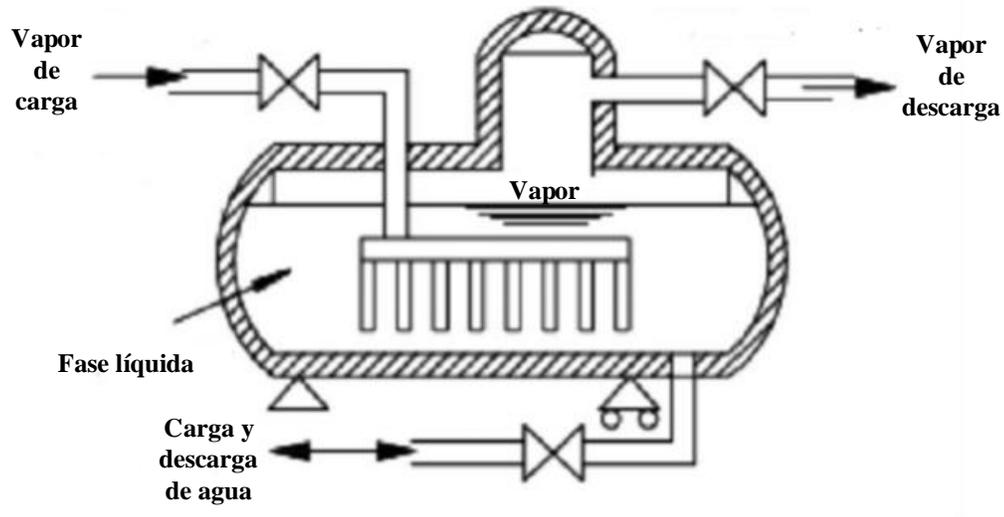


Figura 3 Acumulador de vapor.

En la **Tabla 3** se muestran diferentes materiales con cambio de fase (MCF) que se utilizan en los sistemas de (ACL) Tian y Zhao (2013). Una de las principales ventajas de los sistemas que utilizan MCF es que se aprovecha el calor latente de los materiales, esto representa una capacidad de almacenamiento mayor que los sistemas de ACS. También, a diferencia de los sistemas de ACS, los MCF pueden trabajar casi de manera isotérmica. Se han propuesto diferentes geometrías y metodologías de encapsulamiento para este tipo de sistemas debido a la baja conductividad térmica que la mayoría de los MCF presentan. En la **Figura 4** se pueden observar la forma en que interactúa el fluido de transferencia con los (MCF) en diferentes configuraciones Kuravi y col. (2013).

Tabla 3. Materiales con cambio de fase utilizados para el almacenamiento de calor latente.

Materiales	Temp. Cambio de fase (°C)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m K)	Calor latente (kJ/kg)
RT100 (parafina)	100	880	0.2	124
E117(inorgánico)	117	1450	0.7	169
A164(orgánico)	164	1500	n.d.	306
NaNO ₃	307	2260	0.5	172
KNO ₃	333	2110	0.5	226
KOH	380	2044	0.5	149.7
AlSi ₁₂	576	2700	1.6	560
MgCl ₂	714	2140	n.d.	452
NaCl	800	2160	5	492
LiF	850	n.d.	n.d.	n.d.
Na ₂ CO ₃	854	2533	2	275.7
K ₂ CO ₃	897	2290	2	235.8
48%CaCO ₃ -45%KNO ₃ -7%NaNO ₃	130	n.d.	n.d.	n.d.
MgCl ₂ -KCl-NaCl	380	2044	0.5	149.7

n.d: No disponible

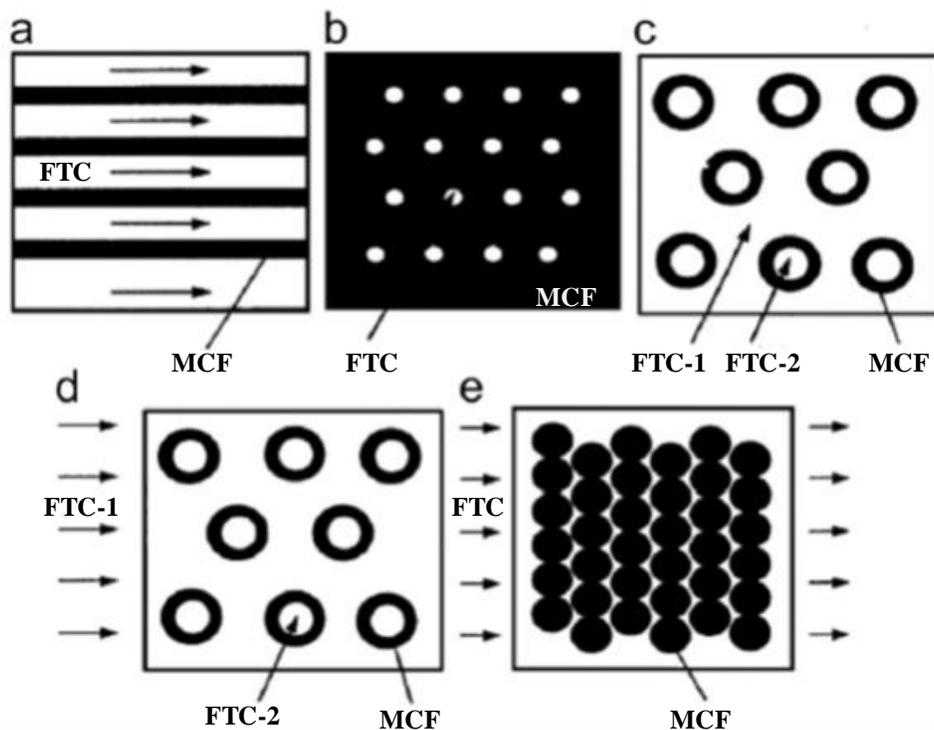


Figura 4 Configuraciones utilizadas en el almacenamiento de calor latente (a) Plato plano; (b) Tubo y coraza con flujo interno; (c) Tubo y coraza con flujo paralelo; (d) Tubo y coraza con flujo cruzado; (e) Lecho empacado con esferas.

El AT es un sistema que promete almacenar calor por mayores periodos de tiempo, debido a las características de las reacciones que se involucran, se siguen realizando propuestas para optimizar factores como corrosión, seguridad y reversibilidad en las reacciones. Estos sistemas aprovechan la energía exotérmica de algunas reacciones reversibles (**Tabla 4**) Kuravi y col. (2012). En la **Figura 5** se muestra un esquema de una reacción de amoníaco y de su manera de almacenamiento, usualmente se utiliza un intercambiador de calor para que los compuestos absorban la energía proveniente del colector solar, reaccionando y enviando los productos hacia otro sistema para ser almacenados Lovegrove y col. (2004). Es común el uso de catalizadores para que el compuesto obtenido de la reacción endotérmica sea reversible y de este modo libere la energía absorbida. Dependiendo de la reacción, se pueden incluir al sistema otros equipos para el tratamiento o separación de compuestos obtenidos en reacciones secundarias.

Tabla 4. Materiales utilizados para el almacenamiento termoquímico.

Componente	Temperatura (°C)	Reacción	ΔH (kJ/mol)
Óxido de Manganeso	530 (a 1 bar de reactante)	$MnO_2 + \Delta H \leftrightarrow 0.5Mn_2O_3 + 0.25O_2$	42
Hidróxido de Calcio	505 (a 1 bar de reactante)	$Ca(OH)_2 + \Delta H \leftrightarrow CaO + H_2O$	112
Carbonato de Calcio	896 (a 1 bar de reactante)	$CaCO_3 + \Delta H \leftrightarrow CaO + CO_2$	167
Hidruro de Magnesio	250-500	$MgH_2 + \Delta H \leftrightarrow Mg + H_2$	75
Amoníaco	400-500	$NH_3 + \Delta H \leftrightarrow 0.5 N_2 + 1.5 H_2$	67
Óxido de Magnesio	250-400	$MgO + H_2O \leftrightarrow Mg(OH)_2$	81

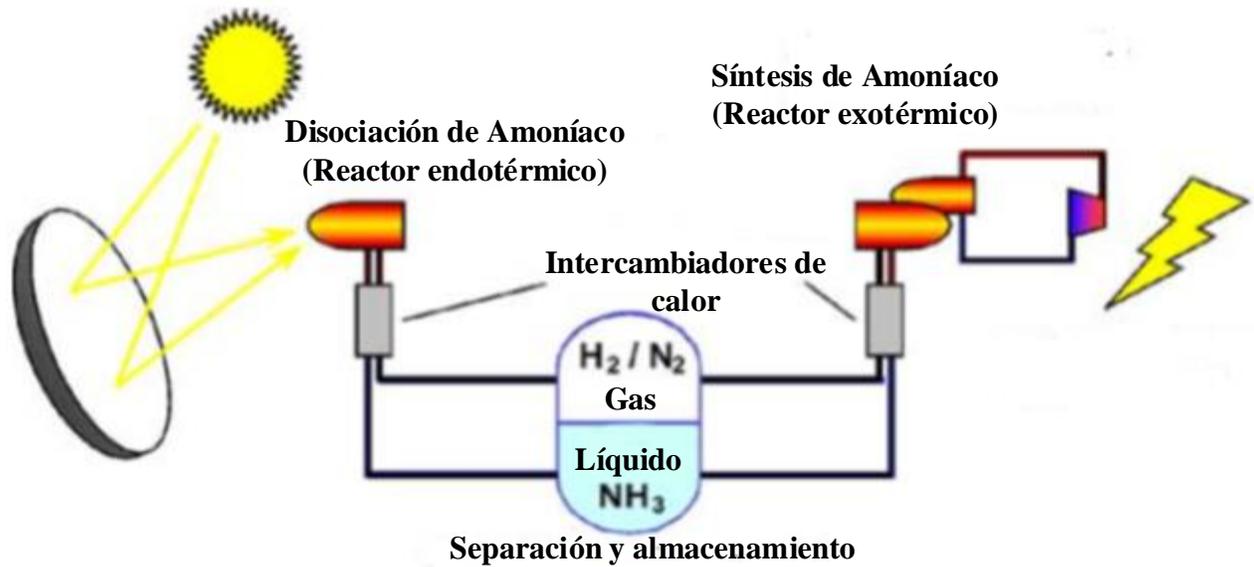


Figura 5 Esquema de un sistema de almacenamiento termoquímico.

1.1.3 Sistemas de cultivo de algas y productos provenientes de ellas.

Existen algunas plantas solares que utilizan combustibles fósiles para trabajar de manera continua como lo son *Ivanpha Solar Electric Genereting* en Estados Unidos y *Gemasolar Thermosolar Plant* en España, las cuales generan 392 y 19.9 MW respectivamente, siendo *Ivanpha* la planta que genera mayor potencia utilizando energía solar y combustible fósil en el mundo NREL (2014 y 2011). El uso de combustibles fósiles en este tipo de sistemas conlleva a la generación de gases con efecto invernadero, es por ello que se han propuesto diferentes tipos de cultivos como maíz y soya para realizar la captura de este tipo de gases, pero debido a que estas representan un recurso alimenticio, se ha optado por utilizar microorganismos como algas, teniendo la ventaja de utilizar áreas de cultivo que no son posibles para la producción de alimento, representando un sistema ambiental y socialmente atractivo. En la **Tabla 5** podemos observar diferentes especies de algas las cuales se utilizan para mitigar las emisiones de CO_2 al ambiente, Brennan y Owende (2010).

Tabla 5. Productividad de biomasa de algas por la mitigación de CO₂.

Micro-alga	T (°C)	CO ₂ (%)	P _{volumen} (gl ⁻¹ day ⁻¹)
<i>Chlorella</i> sp.	26	Aire	0.682 ^a
<i>Chlorella</i> sp.	26	2	1.445 ^a
<i>Chlorella</i> sp.	26	5	0.899 ^a
<i>Chlorella</i> sp.	26	10	.106 ^a
<i>Chlorella</i> sp.	26	15	.099 ^a
<i>Chlorella kessleri</i>	30	18	0.087
<i>Scenedesmus</i> sp.	25	10	0.218
<i>Chlorella vulgaris</i>	25	10	0.105
<i>Botryococcus braunii</i>	25	10	0.027
<i>Scenedesmus</i> sp.	25	Gas de combustión	0.203
<i>Botryococcus braunii</i>	25	Gas de combustión	0.077
<i>Chlorella vulgaris</i>	25	Aire	0.04
<i>Chlorella vulgaris</i>	25	Aire	0.024
<i>Haematococcus pluvialis</i>	20	16-34	0.076
<i>Scenedesmus obliquus</i>	30	18	0.14
<i>Spirulina</i> sp.	30	12	0.22

^a Cultivo incubado por 4-8 días

La producción de estas puede realizarse por medio de dos sistemas de cultivos, estanques abiertos y fotobiorreactores (**Figura 6**). Es común el uso de estanques abiertos para el cultivo de algas, éstos están expuestos a la radiación solar natural y normalmente se utiliza una rueda de paletas para mantener en movimiento el cultivo con el objetivo de que las algas absorban la energía solar con mayor eficiencia. *Sapphire Energy's Algae Farm* es el primer proyecto de demostración comercial en el mundo que utiliza el sistema de estanque abierto para el cultivo de algas, el cual se encuentra en operación desde el año 2013 y está ubicado en Columbus, New México, Estados Unidos. Existen diferentes diseños propuestos sobre biorreactores como lo son el tubular, horizontal y de platos, pero debido a su alto costo comparado con los estanques abiertos, hasta el momento los biorreactores se encuentran sólo en plantas pilotos.



a)

b)

Figura 6 Sistemas de cultivo de algas: a) Estanque abierto; b) Fotobiorreactor tubular.

Seguido del cultivo viene la cosecha, en esta etapa se recupera la biomasa y los productos presentes en las algas por medio de coagulación-floculación, seguido por un método de separación sólido-líquido. En la **Figura 7** se presentan diferentes recursos necesarios para la producción de biomasa de las algas, productos intermedios y finales, con lo cuales se puede obtener una ganancia económica.

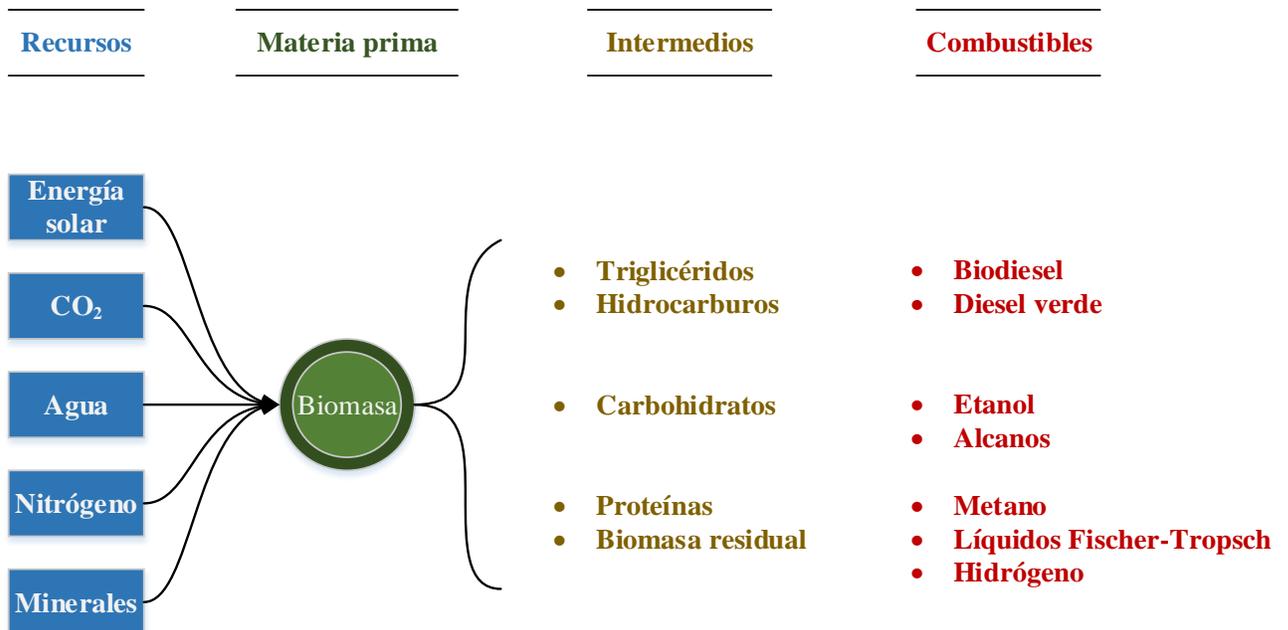


Figura 7 Recursos, productos intermedios y combustibles como provenientes de algas.

1.1.4 Programación matemática

La programación matemática es una herramienta utilizada para planear y resolver un modelo propuesto, en el cual por medio de la interacción de parámetros, variables continuas y/o enteras que lo describen, se busca una solución óptima. Dependiendo del tipo de variables utilizadas y de su relación en el modelo matemático, los problemas son clasificados como se muestra en la **Figura 8**.

Un ejemplo de un problema lineal surgiría al tratar de determinar la asignación óptima de recursos humanos, así como recursos de máquinas, redes de distribución de agua, por mencionar algunos. La formulación de problemas no lineales puede emplearse para la planeación de una refinería y el diseño de un equipo de proceso. En tanto que los problemas mixtos enteros surgen ante la necesidad de la selección adecuada de un equipo, así como de rutas de procesamiento y del lugar para instalar una empresa. Por otra parte, los problemas mixtos-enteros no lineales permiten modelar situaciones prácticas más complejas, en el cual se puede considerar el diseño óptimo de un proceso o la optimización de una parte específica de este, además de su representación fenomenológica de manera simultánea. Este tipo de problemas matemáticos pueden ser resueltos en diferentes plataformas computacionales, de las cuales dependerá el lenguaje de programación utilizado para su codificación.

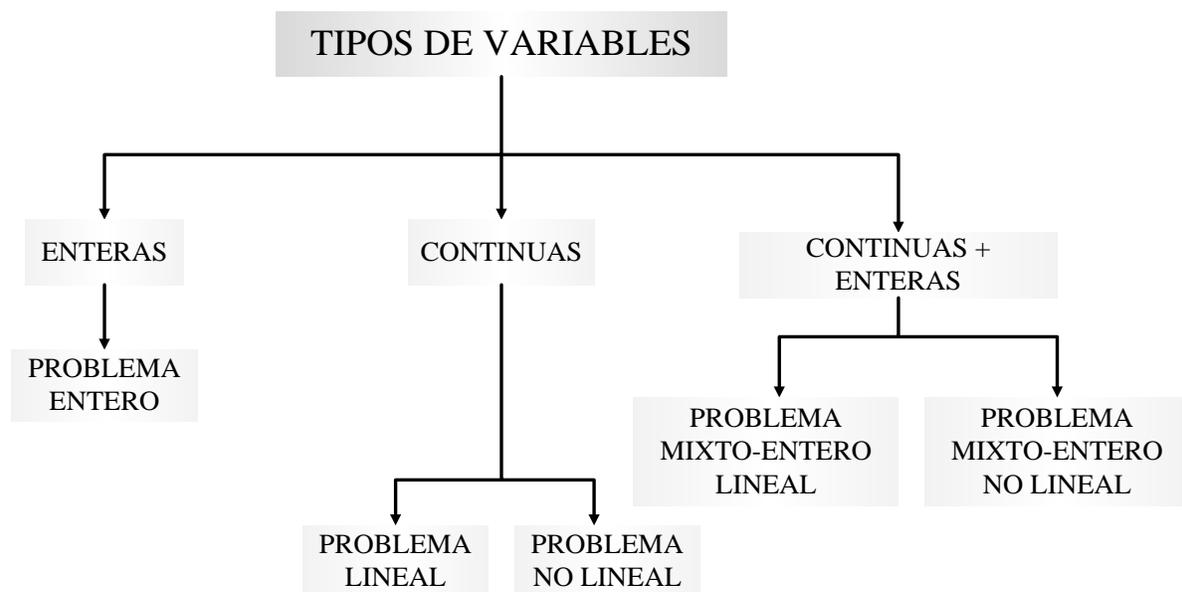


Figura 8 Clasificación de modelos en función de tipo de variables.

1.2 Antecedentes

Se han realizado una considerable cantidad de trabajos para cada uno de los sistemas considerados en esta Tesis. Como el realizado por Guo y Huai (2016), donde presentan un modelo matemático para el diseño de un concentrador cilíndrico parabólico tomando en cuenta el efecto que tienen múltiples parámetros como lo son temperatura de la pared, flujo másico, diámetro interno de la cubierta de vidrio y la temperatura media del fluido de trabajo, utilizando algoritmos genéticos para su optimización. Boukelia y col. (2015), realizaron una optimización para la selección y factibilidad en la construcción de un concentrador solar cilíndrico parabólico, donde tomaron en cuenta las condiciones ambientales en Algeria, África. También propusieron varias localizaciones, en las cuales debido a la variación del clima en las diferentes zonas se encontraron diferentes resultados.

El diseño y operación de los SAT han sido estudiados de diferentes maneras para lograr el mejor aprovechamiento de la energía solar. Zhao y col. (2016) realizaron una analogía de los sistemas de almacenamiento con los circuitos eléctricos, para una absorción óptima. Sosteniendo que la mayoría de las investigaciones sólo se enfocan en el fluido de transferencia en vez del flujo de energía. Flueckiger y col. (2013) se enfocaron en el diseño de un sólo tanque para el ACS para identificar los problemas clave de este tipo de sistemas. Kolb y Hassani (2006) desarrollaron una simulación para una planta de potencia con CS de 1 MW que se encuentra cerca de Tucson llamada Aguaro, para adicionar 30MWh utilizando ACS de un sólo tanque. El comportamiento térmico y la eficiencia de estos SAT bajo diferentes condiciones de operación fueron analizados por Yang y Garimella (2010). El desgaste de los materiales utilizados para los sistemas de almacenamiento usualmente se mide en cuantos ciclos resiste el material para mantener su capacidad de almacenamiento. Yang y Garimella (2013) presentaron un análisis para la operación cíclica para el ACS de un sólo tanque utilizando sales fundidas.

Torras y col. (2015) utilizaron simulaciones numéricas basadas en una metodología modular orientación-objeto, con el fin de mejorar el desempeño de la planta, tomando en cuenta parámetros como datos meteorológicos, grosor del aislamiento del sistema de almacenamiento y la configuración de estos. Algunas estrategias de integración óptima de estos almacenamientos térmicos en una planta solar fueron presentadas por Guédez y col.

(2014), quienes presentan configuraciones para ciertas localizaciones considerando diferentes precios de electricidad. También, compararon la rentabilidad de utilizar la energía solar directamente contra utilizarla en horarios donde hay mayor demanda.

La influencia de parámetros como el flujo, entalpía, temperatura y presión del vapor sobrecalentado sobre el desempeño en la carga de un acumulador de vapor, fue investigado por Sun y col. (2015). Ellos realizaron una simulación de este sistema utilizando un mecanismo de análisis termodinámico fuera del equilibrio. Stevanovic y col. (2012) desarrollaron un modelo numérico también en estado dinámico, basados en las ecuaciones de balance de masa y energía para cada fase y leyes de cierre para las fases de transición. Se han desarrollado nuevas propuestas para el uso combinado de diferentes SAT, con el fin de utilizar de manera óptima la energía solar. Tal es el caso del modelo desarrollado por Bai y Xu (2011) para el análisis de un SAT de dos fases, en la cual se propone el uso de concreto como ACS y de un acumulador de vapor en diferentes configuraciones para observar su comportamiento.

Varias investigaciones se han dado a la tarea de optimizar los sistemas de ACL. Como lo es el trabajo presentado por Hübner y col. (2016), en este se analiza un desarrollo sistemático para la optimización en la estructura de estos sistemas para la transferencia de calor desde un punto de vista tecnológico y económico, donde evalúan dos parámetros en orden de minimizar el costo específico de inversión. Este tipo de sistema utiliza MCF para su almacenamiento como los que se muestran en el trabajo publicado por Jegadheeswaran y Pohekar (2009). Tse y col. (2015) exponen una metodología para el modelado y optimización de un sistema MCF, donde evalúan diferentes parámetros para observar el comportamiento del MCF y las variaciones temporales en el fluido durante todo el ciclo de almacenamiento. Una comparación de diferentes MCF fue realizado por Xu y col. (2016) utilizando un modelo matemático que toma en cuenta el efecto de la temperatura de entrada y el número de unidades para la transferencia de calor del concentrador solar.

Un análisis tecno-económico para generar 10 MWe en una planta solar, utilizando almacenamiento termoquímico con amoniaco, fue propuesto por Luzzi y col. (1999). Sus resultados confirman la solvencia técnica utilizando tecnología convencional, equipos y materiales, indicando la viabilidad económica del sistema. Wang y col. (2015) presentaron

una simulación a larga escala utilizando un esquema paralelo de análisis de elemento finito (FEM), proponiendo geometrías complejas y resolviéndolas con rutinas PETSc. Una optimización para este tipo de sistemas de almacenamiento para minimizar la pérdida de energía almacenada fue propuesta por Zheng y col. (2015). Basándose en la teoría EDM (*Entropy Dissipation Minimization*) que se enfoca en la disminución de la irreversibilidad para la transferencia de calor.

Murillo-Alvarado y col. (2013) realizaron una optimización para definir los caminos óptimos que involucran la selección de materias primas, productos y etapas de proceso para una biorrefinería. Existen biorrefinerías que utilizan algas como materia prima, el trabajo presentado por Hernández-Calderón y col. (2016) aborda una optimización en el diseño de este tipo de biorrefinerías, al mismo tiempo que se toma en cuenta el uso de emisiones de CO₂ provenientes de diferentes plantas industriales, utilizándolas como nutrientes para el crecimiento de las algas. Una integración sustentable para la producción de algas en una planta de generación de electricidad fue propuesta por Gutiérrez-Arriaga y col. (2014) para minimizar las emisiones de gases con efecto invernadero que se generan con la quema de gas natural.

1.3 Hipótesis

El modelado y la programación matemática de un sistema de generación de electricidad por medio de vapor utilizando energías renovables (solar) y no renovables (gas natural), acoplado a un sistema de almacenamiento térmico y a la producción de algas por medio de la fijación de CO₂ para la generación de biodiesel, nos permitirá visualizar y comparar los escenarios óptimos que permitan reducir las emisiones de CO₂, al menor costo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Generar un modelo de optimización para un sistema de producción de electricidad que por medio de energía solar, almacenamiento térmico y un sistema de cultivo de algas para la producción de biodiesel que nos permitan reducir el uso de combustibles fósiles, siendo nuestras funciones objetivo minimizar las emisiones de CO₂ y el costo total anual del sistema.

1.4.2 Objetivos específicos

- ❖ Proponer una superestructura que nos represente la integración energética y másica en una planta de generación de electricidad que utilice energía solar por medio de un sistema concentrador cilíndrico parabólico, sistemas de almacenamiento térmico, cultivos de algas y el uso de estas para la producción de biodiesel.
- ❖ Generar un modelo matemático tomando en cuenta todas las configuraciones posibles en la superestructura propuesta.
- ❖ Programar el modelo obtenido.
- ❖ Validar el modelo con sistemas ya existentes.

1.5 Justificación

El uso de energías renovables como la solar, están en constante crecimiento. En la actualidad existen diversas propuestas para mejorar el uso de estas para que sean aprovechadas al máximo. La disminución del uso de combustibles fósiles, los cuales generan gases con efecto invernadero y contribuyen al calentamiento global, es una meta trazada por muchos países y que pretende lograrse con la integración de diferentes tipos de sistemas. Es por esto que en el presente trabajo de tesis se propone un modelo matemático, el cual es generado con la inclusión de sistemas de almacenamiento en un ciclo de potencia combinado (concentrador cilíndrico parabólico- ciclo Rankine) aunado al secuestro de CO₂ proveniente de la caldera para el crecimiento de algas y el uso de estas para la producción de biodiesel. Con lo anterior, se logrará la selección de los sistemas de almacenamiento óptimos, al mismo tiempo que la capacidad de estos y de los equipos involucrados en la producción de electricidad en el ciclo combinado. De igual forma se logrará calcular la producción de algas y de biodiesel. Buscando con lo anterior minimizar las emisiones de CO₂ al ambiente al menor costo, lo cual representa un beneficio ambiental y económico.

1.6 Alcance

Con este trabajo de Tesis es posible generar diferentes escenarios para una producción de electricidad específica. Esto nos permitirá comprender el comportamiento de todo el sistema integrado, de igual manera que el comportamiento individual de los sistemas de almacenamiento, concentrador solar cilíndrico parabólico, ciclo de potencia, producción de algas y biodiesel. También nos permitirá evaluar el efecto que tiene la radiación solar y el área disponible del lugar donde se proponga el sistema completo. El modelo propuesto representa una herramienta importante para la toma de decisiones ya que la solución óptima para la disminución de CO₂ con el sistema propuesto usualmente no representa el mayor beneficio económico, lo cual nos lleva a restringir el problema, siendo posible generar diferentes escenarios dependiendo de las limitaciones económicas de inversión. De esta manera nuestra función multi-objetivo representa una metodología atractiva con un alcance económica-ambiental.

2 METODOLOGÍA

2.1 Superestructura

Como parte de la metodología se propuso una superestructura (**Figura 9**), en la cual se representa la integración de un concentrador solar cilíndrico parabólico, un ciclo Rankine, sistemas de almacenamiento térmico, el cultivo de algas y la producción de biodiesel. En la superestructura también se muestra la interacción que existe entre cada sistema, como lo es el intercambio de calor proveniente del concentrador solar cilíndrico parabólico para la generación de vapor, el cual es enviado posteriormente hacia el ciclo Rankine.

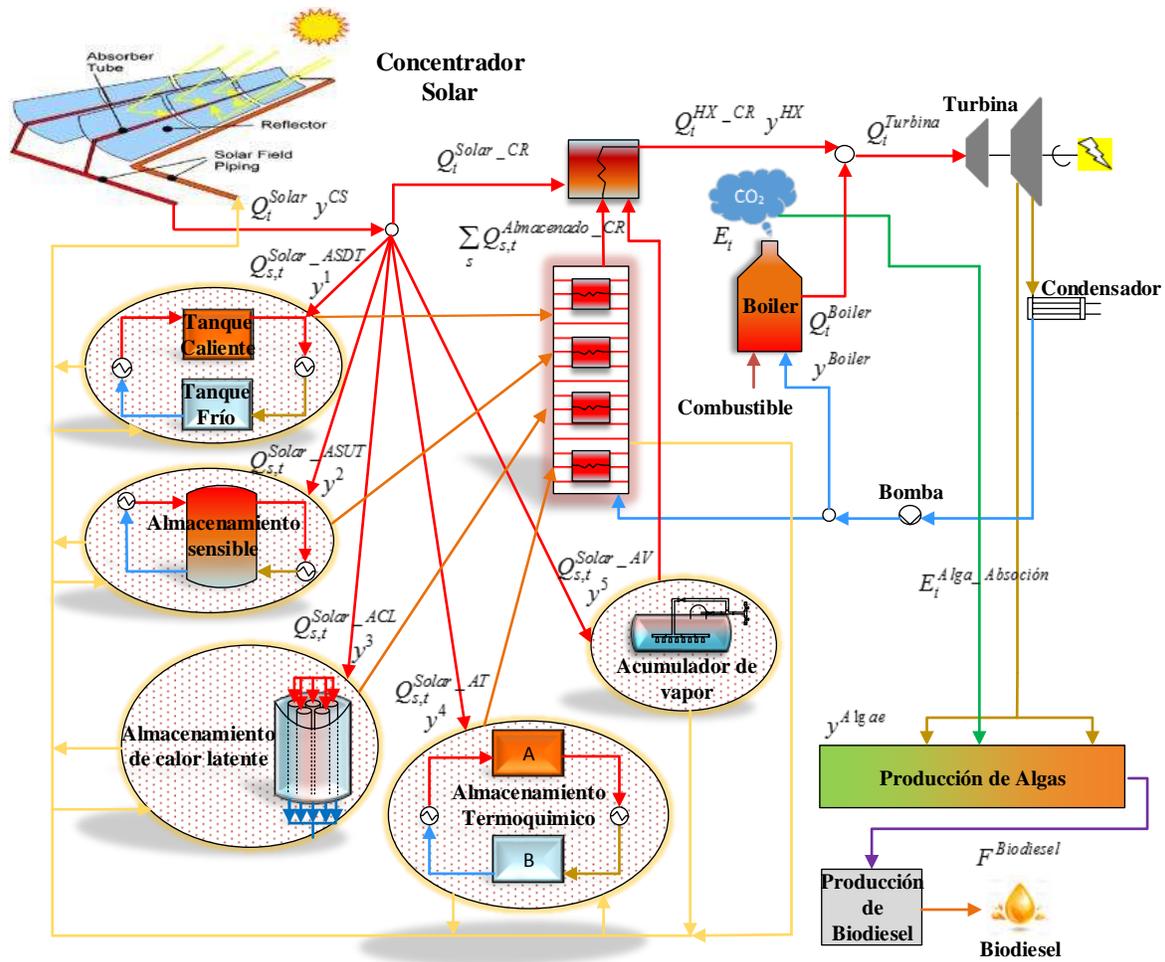


Figura 9 Superestructura propuesta.

También se plantea la posibilidad de enviar parte de la energía solar absorbida por el concentrador cilíndrico parabólico hacia uno o más de los diferentes sistemas de almacenamiento propuestos, esto representa la posibilidad de utilizar la energía almacenada en los diferentes sistemas para la generación de vapor cuando el uso directo de la energía proveniente del concentrador solar no sea suficiente o no esté disponible (horario nocturno, cambio en las condiciones del clima, cambio en las estaciones, etc.). Para mantener una producción de electricidad continua en el ciclo Rankine, se introduce combustible de reposición (gas natural) en la caldera. El flujo de los gases emitidos por la quema del combustible en la caldera es enviada hacia el sistema de producción de algas, las cuales las utilizan como nutriente. Por último, las algas producidas son enviadas para su tratamiento y conversión en biodiesel.

2.2 Formulación del modelo matemático

En base a las interacciones que se muestran en la superestructura propuesta, se formuló el siguiente modelo matemático, tomando en cuenta los balances de energía y materia, restricciones lógicas para la selección de capacidad y existencia de los sistemas, las ganancias obtenidas por la venta de electricidad y biodiesel, al igual que el costo de capital y operación asociado a los sistemas propuestos, con el fin de conocer el comportamiento de las funciones objetivo, las cuales son la minimización del costo total anual (TAC) y las emisiones de CO₂ al ambiente.

2.2.1 Balance de energía para el concentrador solar

La cantidad de energía absorbida en el concentrador solar Q_t^{Solar} en cualquier periodo de tiempo t dependerá de la cantidad de radiación solar con el que se cuenta en el lugar propuesto ASR_t así como el área disponible A^{CS} para la instalación del concentrador:

$$Q_t^{Solar} = ASR_t A^{CS}, \forall t, t > 1 \quad (1)$$

Como se representa en la superestructura, el flujo de calor que proviene del concentrador solar Q_t^{Solar} puede ser distribuida directamente hacia el ciclo Rankine $Q_t^{Solar-CR}$ o enviar una parte de esta energía a alguno de los sistemas de almacenamiento

térmico como el acumulador de vapor $Q_{s,t}^{Solar- AV}$, almacenamiento sensible de dos tanques $Q_{s,t}^{Solar- ASDT}$, almacenamiento sensible de un sólo tanque $Q_{s,t}^{Solar- ASUT}$, almacenamiento de calor latente $Q_{s,t}^{Solar- ACL}$ y almacenamiento termoquímico $Q_{s,t}^{Solar- AT}$, siendo $\sum_s Q_{s,t}^{Solar- Almacenamiento}$ la energía total enviada hacia los sistemas de almacenamiento,

dicha distribución es presentada en el siguiente balance, para todo periodo de tiempo t :

$$Q_t^{Solar} = \sum_s Q_{s,t}^{Solar- Almacenamiento} + Q_t^{Solar- CR}, \forall t, t > 1 \quad (2)$$

2.2.2 Restricción para denotar la existencia del concentrador solar

El calor es absorbido por el colector solar no debe sobrepasar su capacidad, la cual es calculada por el modelo. La existencia del colector dependerá de si la capacidad calculada por el modelo $Q^{Solar- CAP}$ que tiene que ser menor o igual a su capacidad máxima $Q^{Solar- MAX}$, siendo denotada por la variable binaria y^{CS} (un valor de 1 presenta la existencia del sistema y un valor de 0 la no existencia):

$$Q_t^{Solar} \leq Q^{Solar- CAP} \forall t, t > 1 \quad (3)$$

$$Q^{Solar- CAP} \leq Q^{Solar- MAX} y^{CS} \quad (4)$$

2.2.3 Balance para cada sistema de almacenamiento

El flujo almacenado en cada sistema propuesto $Q_{s,t}^{Almacenado}$ (para cada periodo de tiempo t y tipo de almacenamiento s) depende de la eficiencia de almacenamiento de cada tecnología $\eta_s^{Almacenamiento}$, el flujo almacenado de un tiempo anterior $Q_{s,t-1}^{Almacenado}$, el flujo proveniente del colector solar $Q_{s,t}^{Solar- Almacenamiento}$ enviado a cada sistema y del flujo enviado hacia el ciclo Rankine desde los sistemas $Q_{s,t}^{Almacenado- CR}$, la siguiente ecuación representa el balance en cada uno de los sistemas de almacenamiento:

$$Q_{s,t}^{Almacenado} = \eta_s^{Almacenamiento} Q_{s,t-1}^{Almacenado} + Q_{s,t}^{Solar_Almacenamiento} - Q_{s,t}^{Almacenado_CR}, \forall t, t > 1, \forall s \quad (5)$$

Donde:

$$Q_{s,t=1}^{Almacenado} = Q_{s,t=T}^{Almacenado}, \forall s \quad (6)$$

Ya que se tomara un horario de 24 horas, el barrido del tiempo t se realizará desde 1 al 25 para no tener problema al programar la hora 0 siendo la restricción que el barrido se realizará sólo para los valores de $t > 1$, siendo $T = 25$ para poder cerrar el ciclo en la ecuación anterior.

2.2.4 Fronteras de capacidad y elección de la existencia para los sistemas de almacenamiento

La siguiente ecuación limita la cantidad de flujo almacenado en cierto tiempo $Q_{s,t}^{Almacenado}$, la cual debe ser menor o igual a la capacidad de almacenamiento $Q_s^{Almacenamiento_CAP}$ de cada sistema a diferentes tiempos.

$$Q_s^{Almacenamiento_CAP} \geq Q_{s,t}^{Almacenado}, \forall t, t > 1, \forall s \quad (7)$$

Para denotar la existencia de los sistemas de almacenamiento se presenta la siguiente restricción:

$$Q_s^{Almacenamiento_CAP} \leq Q_s^{Almacenamiento_MAX} y_s^{Almacenamiento}, \forall s \quad (8)$$

En la cual, la capacidad máxima de almacenamiento de cada sistema $Q_s^{Almacenamiento_MAX}$ que es multiplicada por su correspondiente variable binaria $y_s^{Almacenamiento}$, la cual se utiliza para denotar la existencia de cada sistema, esta debe de ser mayor o igual a la cantidad almacenada por cada sistema $Q_s^{Almacenamiento_CAP}$.

2.2.5 Balance para el intercambiador de calor

El flujo que fue almacenado por las tecnologías antes mencionadas y el flujo que se envía directamente del colector solar son recibidos en un intercambiador, que por medio de este se genera vapor que será utilizado directamente en la turbina. La siguiente ecuación representa el balance para el intercambiador, donde Q_t^{HX-CR} es el flujo de salida del intercambiador de calor el cual viene dado por la suma del flujo enviado desde el colector solar $Q_t^{Solar-CR}$ y la suma del flujo almacenado en todos los sistemas de almacenamiento $\sum_s Q_{s,t}^{Almacenado-CR}$ para todo periodo de tiempo t :

$$Q_t^{HX-CR} = Q_t^{Solar-CR} + \sum_s Q_{s,t}^{Almacenado-CR}, \forall t, t > 1 \quad (9)$$

2.2.6 Restricciones para el intercambiador

En este sistema, la cantidad de flujo que sale del calentador Q_t^{HX-CR} no puede ser mayor a su capacidad Q^{HX-CAP} , en cualquier periodo de tiempo t , como se muestra a continuación:

$$Q^{HX-CAP} \geq Q_t^{HX-CR}, \forall t, t > 1 \quad (10)$$

Para representar la existencia o no del intercambiador se define la siguiente ecuación, la cual relaciona la capacidad del sistema Q^{HX-CAP} con su capacidad máxima Q^{HX-MAX} por medio de una variable binaria y^{HX} :

$$Q^{HX-CAP} \leq Q^{HX-MAX} y^{HX} \quad (11)$$

2.2.7 Balance en el boiler

Debido a que no siempre se alcanzará la temperatura necesaria del vapor con el calor que se almacena o se envía directamente desde el colector solar Q_t^{HX-CR} , es necesario un

boiler para que reponga el calor faltante Q_t^{Boiler} y así completar el flujo requerido en la turbina $Q_t^{Turbina}$, en cualquier periodo de tiempo t . Las variables antes mencionadas conforman el balance para el boiler de la siguiente manera:

$$Q_t^{Turbina} = Q_t^{HX-CR} + Q_t^{Boiler}, \forall t, t > 1 \quad (12)$$

2.2.8 Restricciones para la instalación y capacidad del boiler

El flujo que proviene del boiler Q_t^{Boiler} no deberá superar la capacidad del boiler $Q^{Boiler-CAP}$, la energía generada es utilizada como reposición de energía para complementar la proveniente del colector solar y del almacenamiento, esta restricción es expresada matemáticamente de la siguiente manera:

$$Q^{Boiler-CAP} \geq Q_t^{Boiler}, \forall t, t > 1 \quad (13)$$

La existencia del boiler estará determinada dependiendo de la energía requerida de la turbina, si la energía proveniente del colector solar logra satisfacer las necesidades de la turbina, la variable binaria y^{Boiler} nos indicará la existencia del boiler tomando en cuenta su generación máxima $Q^{Boiler-MAX}$ para generar el calor de reposición. Esto es representado de la siguiente forma:

$$Q^{Boiler-CAP} \leq Q^{Boiler-MAX} y^{Boiler} \quad (14)$$

2.2.9 Balance en la turbina

La potencia generada en la turbina P_t^{CR} dependerá de la cantidad del flujo que entra a la turbina $Q_t^{Turbina}$ en cualquier periodo de tiempo t , además de la eficiencia de la turbina $\eta^{Turbina}$:

$$P_t^{CR} = \eta^{Turbina} Q_t^{Turbina}, \forall t, t > 1 \quad (15)$$

Normalmente la potencia generada en la turbina P_t^{CR} es vendida $P_t^{Vendida}$. Como puede verse en la superestructura, se propone utilizar una parte de esta potencia generada en el ciclo Rankine para que sea utilizada en el proceso de producción de biodiesel $P_t^{Cogeneracion-PB}$, esto para disminuir el costo en la compra de potencia externa, por lo tanto, el uso de la potencia generada se representa en la siguiente ecuación:

$$P_t^{CR} = P_t^{Vendida} + P_t^{Cogeneracion-PB}, \forall t, t > 1 \quad (16)$$

El flujo de vapor exhausto que sale de la turbina es enviada al condensador $Q_t^{Turbina-Cond}$, en el cual para su cálculo se toma en cuenta el flujo que entra en la turbina $Q_t^{Turbina}$ y la eficiencia de ésta $\eta^{Turbina}$ como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_t^{Turbina-Cond} = (1 - \eta^{Turbina}) Q_t^{Turbina}, \forall t, t > 1 \quad (17)$$

2.2.10 Límites para la capacidad y determinación de existencia de la turbina

La generación de potencia en la turbina P_t^{CR} no puede ser mayor a la capacidad establecida $P^{Turbina-CAP}$ para la eficiencia de la turbina, en cualquier periodo de tiempo t :

$$P^{Turbina-CAP} \geq P_t^{CR}, \forall t, t > 1 \quad (18)$$

Para la determinación de la existencia de la turbina, se utiliza una variable binaria $y^{Turbina}$ cumpliendo que la capacidad de generación de potencia por parte de la turbina no sobrepase su capacidad máxima $P^{Turbina-MAX}$:

$$P^{Turbina-CAP} \leq P^{Turbina-MAX} y^{Turbina} \quad (19)$$

2.2.11 Balance para el condensador

El flujo de vapor exhausto que proviene de la turbina es alimentado a un condensador para que, por medio de transferencia de calor, el vapor condense, siendo el agua condensada

reutilizada en el proceso. La energía con la que saldrá el flujo del condensador $Q_t^{Cond_Bomba}$ dependerá de la cantidad de energía que tenga el flujo de vapor exhausto $Q_t^{Turbina_Cond}$ y de la eficiencia de dicho condensador $\eta^{Condensador}$, para todo periodo de tiempo t , siendo calculado de la siguiente manera:

$$Q_t^{Cond_Bomba} = \eta^{Condensador} Q_t^{Turbina_Cond}, \forall t, t > 1 \quad (20)$$

2.2.12 Restricciones para determinar la existencia y capacidad del condensador

La existencia del condensador se cumple cuando el valor de la capacidad de flujo tratado en el condensador Q^{Cond_CAP} no supera a la capacidad máxima de éste Q^{Cond_MAX} , lo cual es denotado por la variable binaria $y^{Condensador}$:

$$Q^{Cond_CAP} \leq Q^{Cond_MAX} y^{Condensador} \quad (21)$$

Tomando en cuenta que la cantidad de flujo que se encuentra en la corriente de salida de la turbina y que va al condensador $Q_t^{Turbina_Cond}$ en cualquier tiempo t , no puede ser mayor a la capacidad del condensador Q^{Cond_CAP} , se presenta la siguiente restricción matemática para el cumplimiento de lo dicho anteriormente:

$$Q^{Condenser_CAP} \geq Q_t^{Turbina_Cond}, \forall t, t > 1 \quad (22)$$

2.2.13 Balance en la bomba

El flujo de salida de la bomba Q_t^{Bomba} dependerá de la cantidad de flujo que proviene del condensador $Q_t^{Cond_Bomba}$ en cualquier periodo de tiempo t y de la eficiencia de la bomba η^{Bomba} :

$$Q_t^{Bomba} = \eta^{Bomba} Q_t^{Cond_Bomba}, \forall t, t > 1 \quad (23)$$

2.2.14 Restricciones para determinar las dimensiones y existencia de la bomba

La capacidad para el bombeo Q^{Bomba_CAP} dependerá del flujo que salga de la bomba Q_t^{Bomba} en cualquier periodo de tiempo t :

$$Q^{Bomba_CAP} \geq Q_t^{Bomba}, \forall t, t > 1 \quad (24)$$

Con la ayuda de una variable binaria y^{Bomba} multiplicada por la máxima capacidad de la bomba Q^{Bomba_MAX} obtenemos una restricción que nos denota la capacidad de la bomba Q^{Bomba_CAP} , la cual no puede ser mayor que su capacidad máxima Q^{Bomba_MAX} :

$$Q^{Bomba_CAP} \leq Q^{Bomba_MAX} y^{Bomba} \quad (25)$$

2.2.15 Emisiones generadas por el boiler

La cantidad de emisiones de CO₂ que son generadas en el boiler E_t dependen directamente del tipo de combustible fósil utilizado y la cantidad de energía que necesita ser generada por el boiler Q_t^{Boiler} en cualquier periodo de tiempo t . En este trabajo se propone el uso de gas natural, tomando en cuenta los valores reportados por Gutiérrez-Arriaga y Col. (2014) son calculadas las emisiones como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E_t = \eta^{Emisiones} Q_t^{Boiler} \mu, \quad \forall t \quad (26)$$

Estas emisiones pueden ser enviadas hacia la producción de algas $E_t^{Alga_Absorción}$ o ser enviadas al ambiente $GHGE_t$:

$$E_t = GHGE_t + E_t^{Alga_Absorción}, \quad \forall t \quad (27)$$

2.2.16 Producción de algas

Al utilizar el CO₂ como nutriente, la producción de algas $A^{Producción}$ se ve favorecida en cuanto a su crecimiento. De igual manera, la producción depende del área disponible AA para su cultivo y el factor de producción de alga seca Ω presentado por Slade y Bauen (2013):

$$A^{Producción} = \sum_t E_t^{Alga_Absorción} \Omega AA \quad (28)$$

La capacidad de producción de las algas $Alga^{CAP}$, la cual es calculada por el modelo, debe ser mayor o igual que la cantidad de producción de éstas $A^{Producción}$. Debiéndose cumplir que $Alga^{CAP}$ sea menor a la producción máxima $Alga^{MAX}$, la cual depende del área disponible, esta multiplicada por una variable binaria y^{Algae} que determinará la existencia del sistema.

$$A^{Producción} \leq Alga^{CAP} \quad (29)$$

$$Alga^{CAP} \leq Alga^{MAX} y^{Algae} \quad (30)$$

2.2.17 Producción de biodiesel

El biodiesel producido $F^{Biodiesel}$ depende de la recuperación RL y transesterificación $TRANS$ de lípidos y de la cantidad de alga producida, el valor de estos factores es presentado por Gutiérrez-Arriaga y Col. (2014):

$$F^{Biodiesel} = RL TRANS A^{Producción} \quad (31)$$

2.2.18 Cogeneración en la producción de biodiesel

En el sistema de producción de biodiesel existen ciertas demandas de potencia $P^{Demanda_PB}$, las cuales dependen de la cantidad de biodiesel que se produzca

$F^{Biodiesel}$ y de los factores de demanda de potencia β^{PDBP} , respectivamente. Utilizando este factor y la producción de biodiesel se pueden calcular la demanda potencia de la siguiente forma:

$$P_t^{Demanda_PB} = \beta^{PDBP} F^{Biodiesel}, \forall t \quad (32)$$

En la siguiente ecuación se representa la demanda de potencia $P^{Demanda_PB}$ para el sistema de producción de biodiesel tomando en cuenta la compra de potencia $P_t^{Compra_PB}$ al igual que la cogeneración:

$$P_t^{Demanda_PB} = P_t^{Compra_PB} + P_t^{Cogeneración_PB}, \forall t, t > 1 \quad (33)$$

2.2.19 Costo del sistema

El cálculo del costo de capital $CAPCost$ para cada unidad (concentrador solar, sistemas de almacenamiento, ciclo Rankine, cultivo y producción de biodiesel) se realiza a partir de la ecuación (34), la cual depende del factor de anualización k_F , el costo fijo del equipo a , el costo variable b que esta relacionando la capacidad de cada equipo CAP y al factor de economía de escala c . La existencia de cada equipo, la cual es denotada por su propia variable binaria y también determinara la inclusión del costo de capital asociado a dicho equipo en la solución.

$$CAPCost = k_F \left[a y + b(CAP)^c \right] \quad (34)$$

El costo de operación $OpCost$ de cada unidad dependerá de las horas de operación al año H_D , el costo unitario de operación para cada uno de ellos UOC y la cantidad de flujo procesado diariamente $\sum_{t>1}^t Q_t$:

$$OpCost = H_D UOC \sum_{\substack{t \\ t>1}} Q_t \quad (35)$$

2.2.20 Ganancias económicas del sistema

La venta de potencia VP representa la principal ganancia del sistema, está dependerá de la potencia generada en la turbina $P_t^{Vendida}$ y del valor en la venta de electricidad $UCP^{Vendida}$. En esta Tesis también se toma en cuenta la ganancia generada por la venta de biodiesel VB , la cual depende de la cantidad de biodiesel generado diariamente $F^{Biodiesel}$ y del costo de venta de este $UCBP^{Vendida}$.

$$VP = H_Y^{Turbina} \sum_{\substack{t \\ t>1}} UCP_t^{Vendida} P_t^{Vendida} \quad (36)$$

$$VB = H_Y^{PB} UCBP^{Vendida} F^{Biodiesel} \quad (37)$$

2.2.21 Función objetivo

Una de las funciones objetivo del modelo propuesto en este trabajo de tesis es la de minimizar el costo total anual TAC , el cual se define por los costos asociados a los equipos y a las etapas del sistema $TCOST$ menos los ingresos generados por las ventas de los productos previamente mencionados $TSALES$.

$$\min TAC = TCOST - TSALES \quad (38)$$

Las ventas totales son calculadas con la suma de la venta de electricidad y de biodiesel. Siendo el costo total la suma del costo de capital y operación de cada uno de los sistemas:

$$TSALES = VP + VB \quad (39)$$

$$TCOST = \sum CapCost + \sum OpCost \quad (40)$$

La segunda función objetivo es la de minimizar las emisiones totales generadas en el boiler ET , las emisiones totales vienen dada por la suma de las emisiones E_t en cada periodo de tiempo t :

$$\min ET = \sum_t E_t \quad (41)$$

El modelo matemático multi-objetivo formulado anteriormente es un problema mixto entero no lineal (MINLP por sus siglas en ingles), cuyas soluciones representan la mejor compensación entre los objetivos económico y ambiental. Para resolver este problema se utilizó el método de restricciones épsilon para obtener una curva Pareto, la cual representa una serie de soluciones que compensan ambas funciones objetivo Fuentes-Cortez (2016a y 2016b).

3 RESULTADOS

3.1 Caso de estudio 1: Validación del modelo solo para sistemas con energía solar

El modelo propuesto fue validado comparándolo con un sistema existente en España, esto es el proceso Andasol 1, el cual cuenta con las especificaciones mostradas en la **Tabla 6**. Al respecto se tomó en cuenta la parte del concentrador solar, los sistemas de almacenamiento y el ciclo Rankine, ya que hasta el momento no se cuenta con ningún sistema de generación de electricidad que considere un sistema de producción de algas y biodiesel, integrados a los sistemas antes mencionados. Se consideró la radiación solar que se tiene en Granda, España, lugar donde se encuentra instalada la planta (**Figura 10**). En esta figura se muestra el comportamiento de la radiación solar para el día más caluroso (verano) y frío (invierno) de este lugar.

Tabla 6. Especificaciones de operación Andasol 1.

Planta Andasol 1	
Campo Solar	
Área de apertura (Ha)	51
# de ensambles solares	624
Temperatura de entrada (°C)	293
Temperatura de salida (°C)	393
Diferencia de temperatura	100
Ciclo Rankine	
Capacidad de turbina (MW)	50
Tipo de ciclo	Ciclo Rankine de vapor
Presión (bar)	100
Eficiencia de la turbina	38.1
Almacenamiento térmico	
Tipo de almacenamiento	2-Tanques (Sales Fundidas)
Capacidad de almacenamiento (h)	7.5

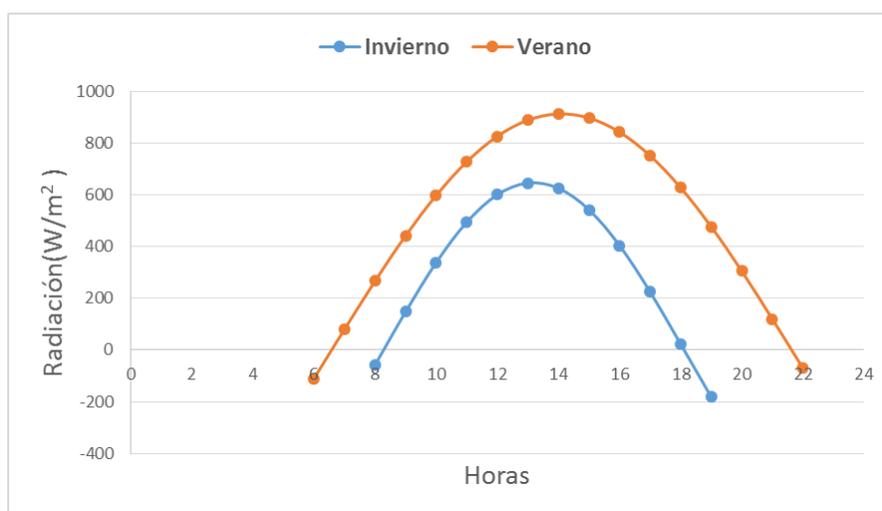


Figura 10 Radiación solar en Granada, España.

En la **Figura 11** se puede observar una representación esquemática de la solución del modelo, la cual es parecida a la del proceso Andasol 1.

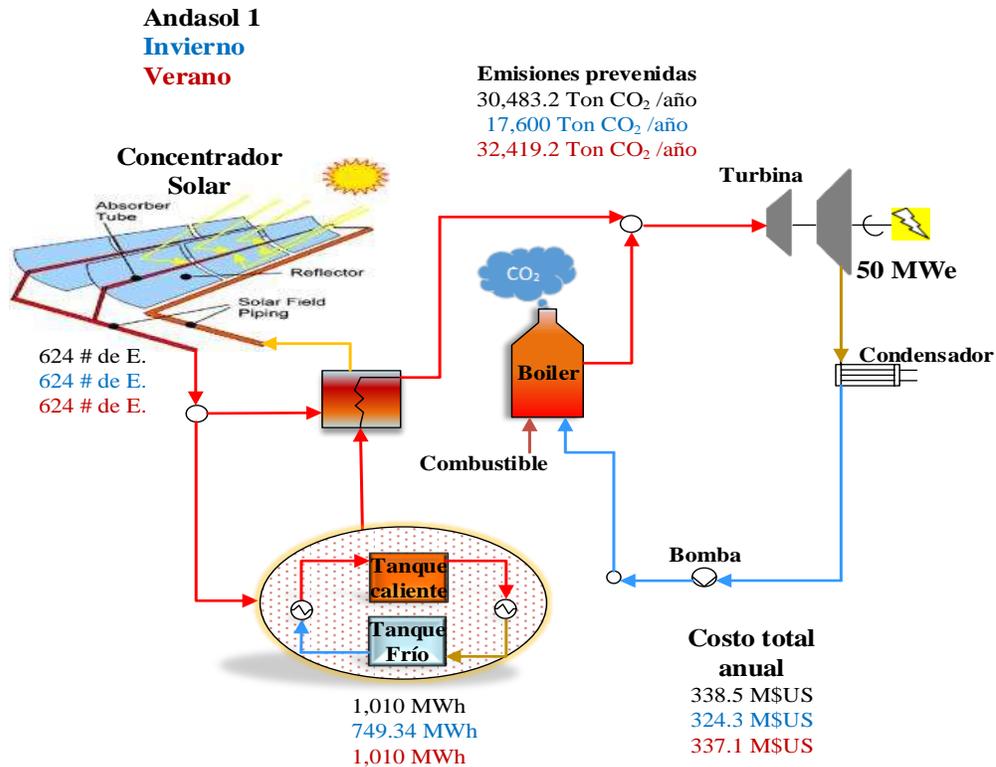


Figura 11 Esquema para la validación del modelo.

En la **Tabla 7** se muestran los resultados obtenidos del modelo, en el cual se puede comparar el sistema Andasol 1 con los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto, tanto en invierno como en verano. Particularmente se puede apreciar que en los tres casos, se obtiene un área de apertura del colector solar similar. También se puede observar que el modelo elige el mismo sistema de almacenamiento de dos tanques con sales fundidas, pero en invierno el sistema es de menor capacidad, lo cual es lógico debido a la baja radiación en comparación con el sistema en verano. De la misma manera en invierno es donde se encuentra el menor costo total anual del sistema, lo cual se debe a la disminución del tamaño del almacenamiento térmico.

Tabla 7. Validación del modelo propuesto para dos casos (invierno y verano).

Modelo Propuesto Vs Andasol 1			
Campo solar	Andasol 1	Modelo en invierno	Modelo en verano
Área de apertura (Ha)	510	510	510
# de ensambles solares	624	624	624
Almacenamiento térmico			
Tipo de almacenamiento	2-Tanques (Sales Fundidas)	2-Tanques (Sales Fundidas)	2-Tanques (Sales Fundidas)
Capacidad de almacenamiento (kWh)	1,010,000	749,340	1,010,000
Costo			
Costo total anual (M\$US)	338.5	324.3	337.1
Emisiones			
Emisiones prevenidas (Ton CO ₂ /año)	30483.2	17600	32419.2

3.2 Caso de estudio 2. Sistema integrado

En este caso de estudio también fue considerada la configuración que utiliza el proceso Andasol 1, pero ahora se considera el modelo completo, el cual incluye la posibilidad del uso de múltiples sistemas de almacenamiento así como del uso de las emisiones generadas por el boiler para el crecimiento de algas y la producción de biodiesel. La **Figura 12** presenta una curva Pareto que fue obtenida aplicando el método de restricción épsilon con la cual se obtuvieron diferentes escenarios. Los resultados obtenidos para cada escenario se muestran en la **Tabla 8**. Cabe destacar que los escenarios A, B, C y D representan el comportamiento del modelo para el caso de baja radiación, siendo E, F, G y H el caso con alta radiación.

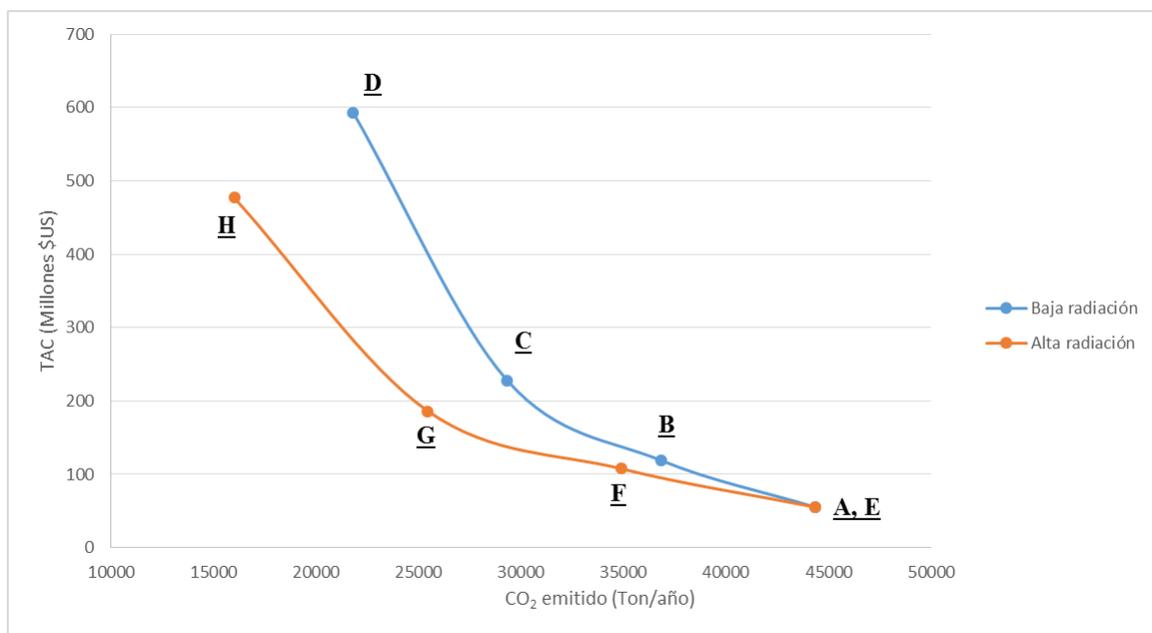


Figura 12 Curva Pareto y escenarios propuestos.

3.2.1 Sistema con baja radiación

El escenario A (**Figura 13**) representa el mínimo costo total anual, el concentrador solar y los sistemas de almacenamiento no son seleccionados en este escenario debido al costo que representan. El sistema de algas y la producción de biodiesel si es seleccionado ya que representa una ganancia para el sistema. Este escenario genera 6420.48 ton/año de biodiesel y emite la mayor cantidad de CO₂. Las soluciones para los escenarios B (**Figura 14**) y C (**Figura 15**) se encuentra entre el mínimo costo del sistema y las emisiones mínimas. Mientras que el escenario con menor emisiones es representado por el escenario D (**Figura 16**). Para reducir 7509 ton/año las emisiones de CO₂, el modelo selecciona para el escenario B la cantidad de 73 ensambles para el concentrador solar y ningún sistema de almacenamiento, lo cual lo eleva al doble el costo total anual comparado con el escenario A, produciendo ambos la misma cantidad de biodiesel.

El modelo selecciona un sistema de almacenamiento de dos tanques para el escenario C, además de 243 ensambles para el colector solar con el cual se logra alcanzar una disminución de 7509 ton/año CO₂ comparada con el escenario B. El uso de sistemas de almacenamiento térmico reemplaza parte del calor que normalmente es entregado por el boiler para la generación de vapor, disminuyendo el uso de combustible fósil, que a su vez también afecta a la producción de biodiesel, siendo el CO₂ un factor importante para el cultivo de algas.

La mínima emisión de CO₂ es encontrada en el escenario D, para lograr esto, es necesario utilizar más de un sistema de almacenamiento, con lo cual se incrementó considerablemente el costo total anual del sistema. Debido a que se obtiene la mayor disminución de CO₂, también se tiene la menor producción de biodiesel para el caso con baja radiación.

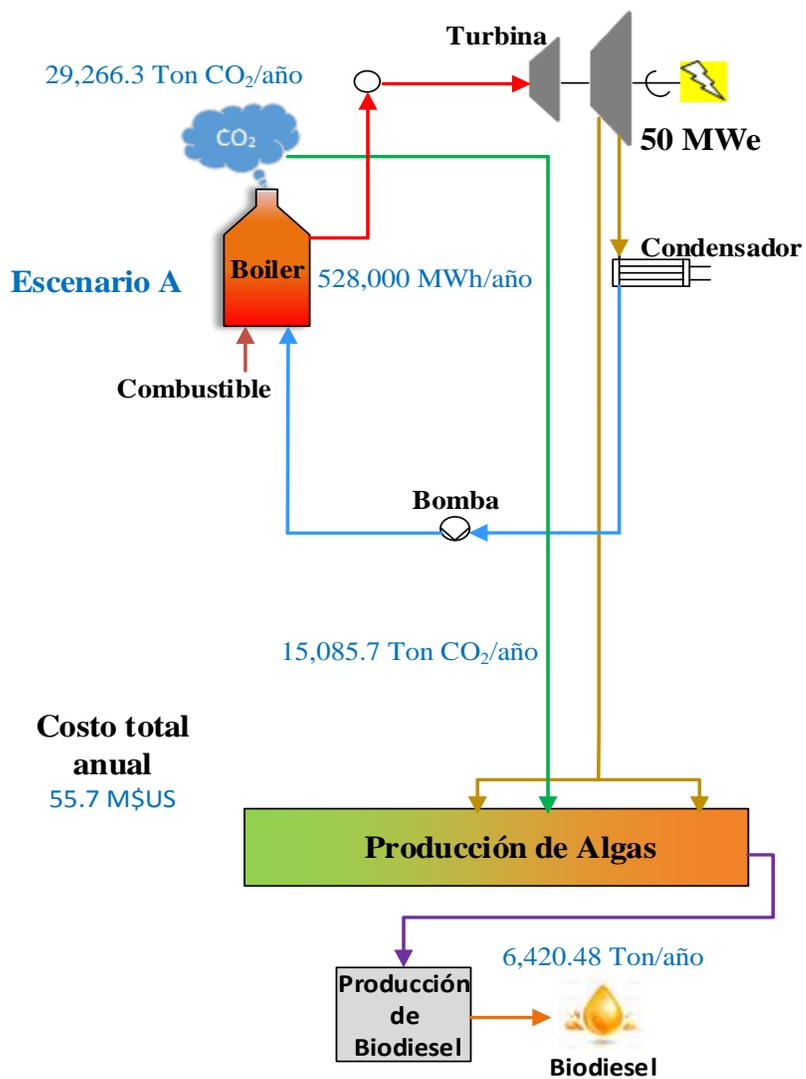


Figura 13 Esquema para el escenario A.

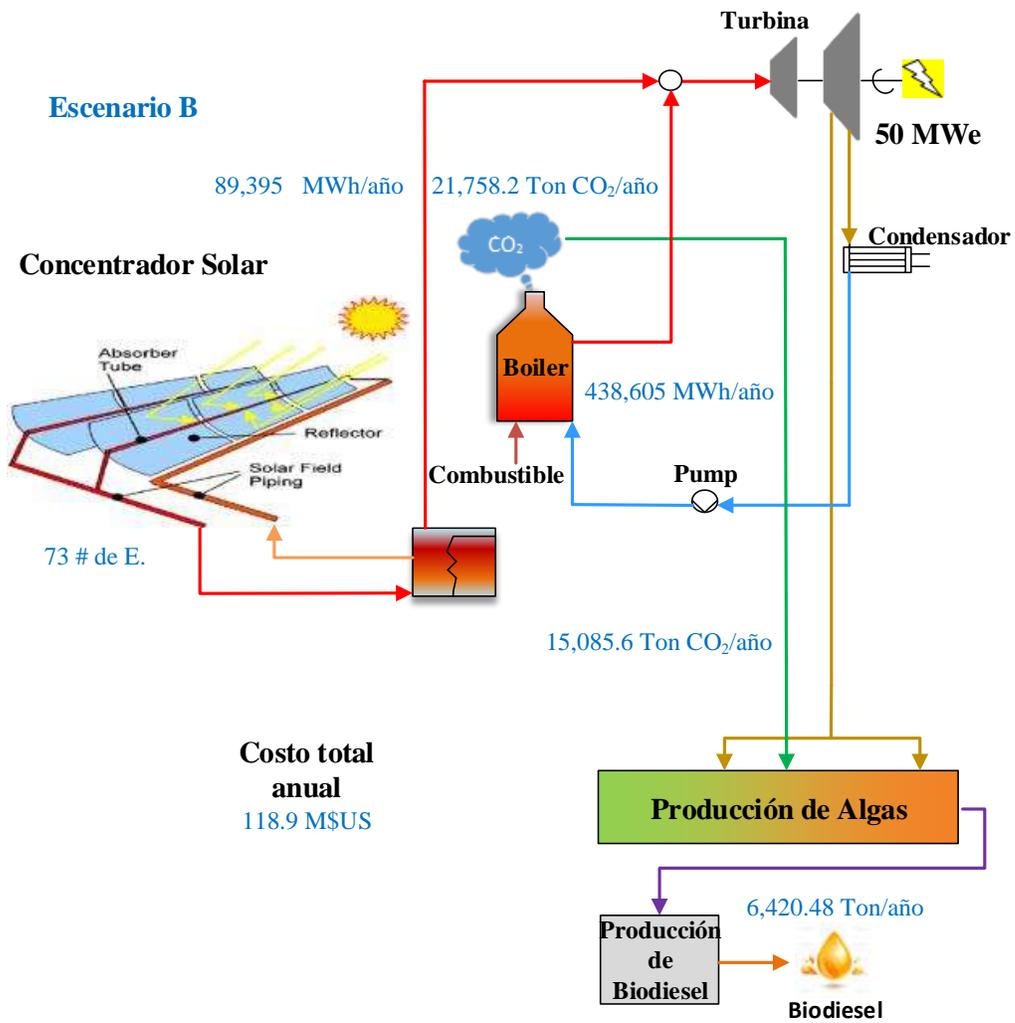


Figura 14 Esquema para el escenario B.

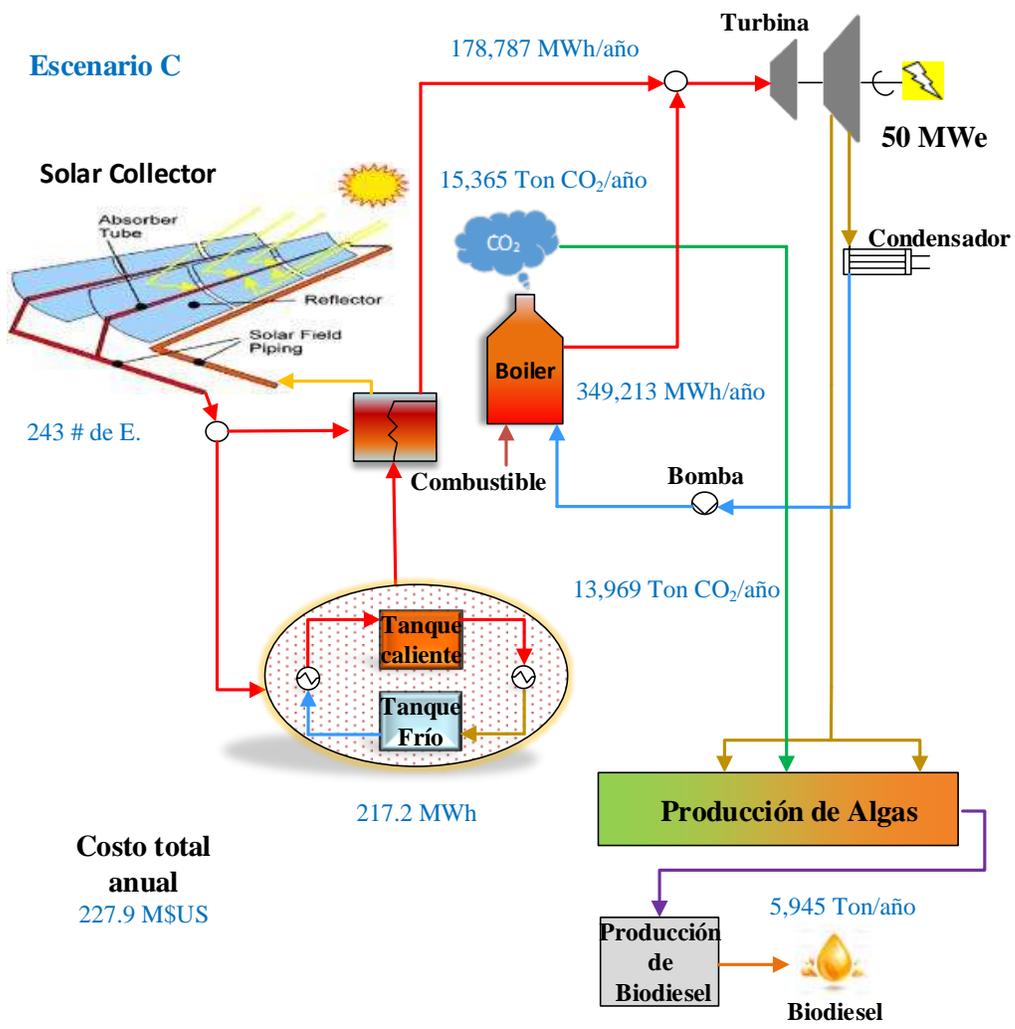


Figura 15 Esquema para el escenario C.

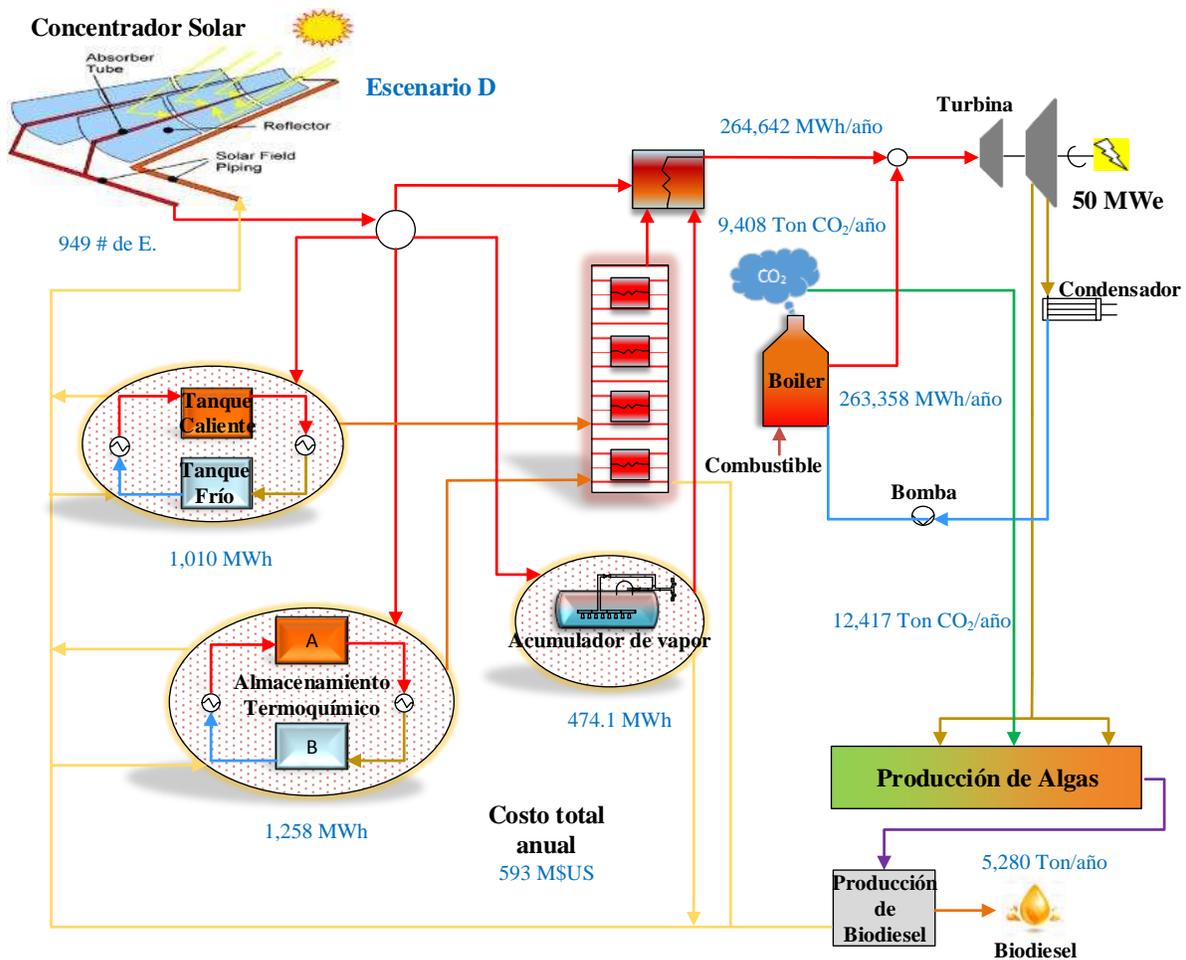


Figura 16 Esquema para el escenario D.

3.2.2 Sistema con alta radiación

De la misma manera que en el escenario A, el escenario E (**Figura 17**) representa el mínimo costo total anual. El incremento en la radiación solar no afecta la solución, debido que para generar 50 MW de electricidad, el ciclo Rankine por si solo puede lograrlo, lo cual representa un menor costo debido a la no inclusión de otros sistemas. Este escenario también produce la misma cantidad de biodiesel que el escenario A.

Comparando los escenarios B y F (**Figura 18**), el costo total anual y el área del concentrador solar para el escenario F son ambos menores que los del escenario B. La alta radiación permite reducir considerablemente el número de ensamblajes y la cantidad de emisiones de CO₂ respecto al escenario B.

Para la reducción del CO₂ en el escenario G (**Figura 19**), se selecciona un esquema similar al del escenario C, utilizando ambos un sistema de almacenamiento de dos tanques. La capacidad del sistema de almacenamiento en el escenario G disminuye con respecto al escenario C debido a la alta radiación. Este escenario cuenta con 133 ensambles siendo casi la mitad que los empleados en el escenario C.

En el escenario H (**Figura 20**) se obtienen las emisiones más bajas en comparación con todos los escenarios mostrados anteriormente. Pero aún con la alta radiación, el uso de tres sistemas de almacenamiento (acumulador de vapor, sistema de dos tanques y almacenamiento termoquímico) y 626 ensambles en el concentrador solar, no se logra satisfacer solo con energía solar el sistema para la producción de 50 MW de electricidad. Este sistema obtiene un número parecido de ensambles al sistema Andasol 1 ya existente, sin embargo en el sistema propuesto se cuenta con la inclusión de otros sistemas de almacenamiento, lo cual incrementa el costo total anual, pero disminuye las emisiones de CO₂.

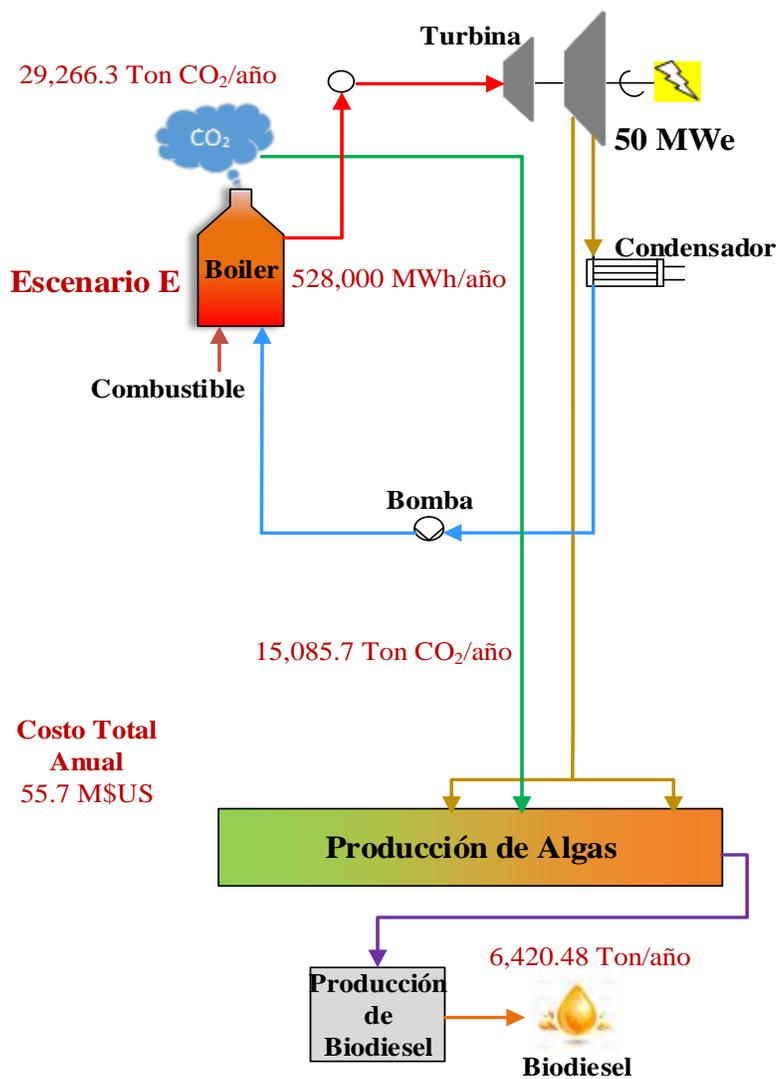


Figura 17 Esquema para el escenario E.

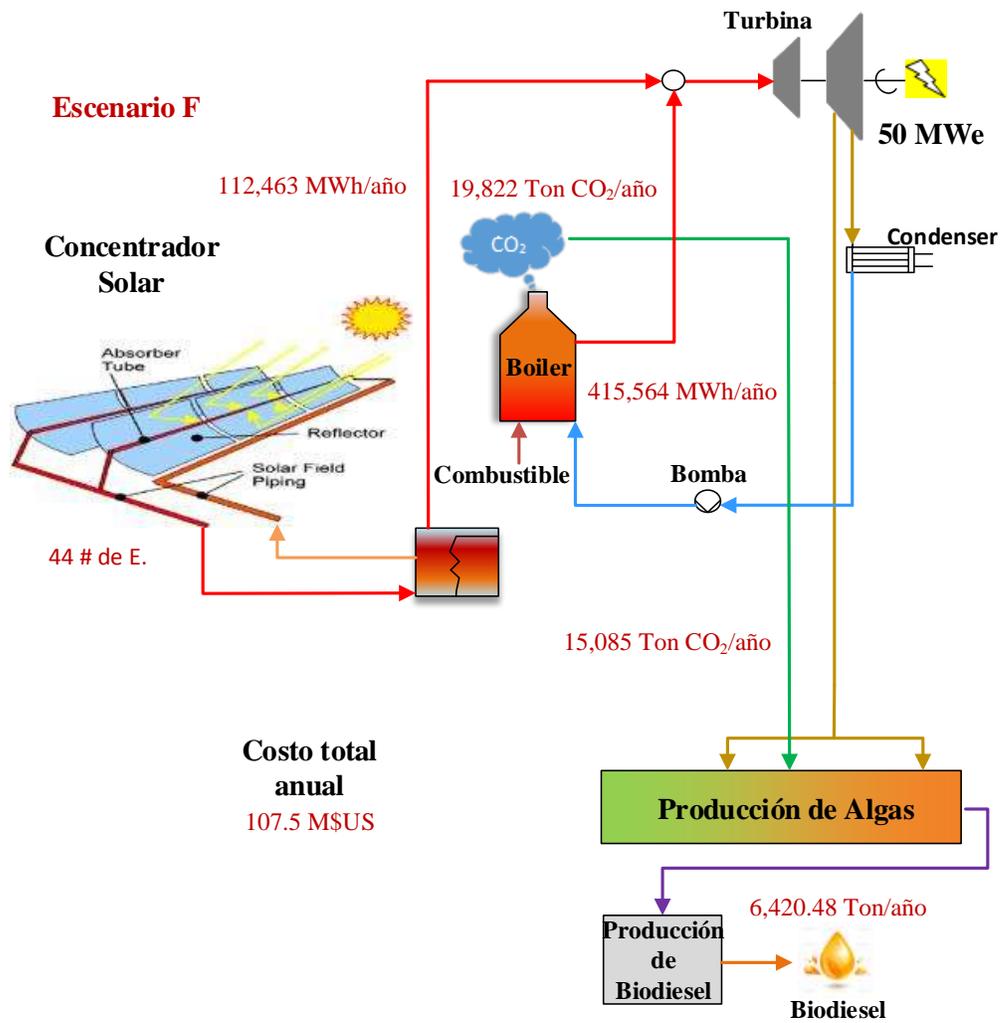


Figura 18 Esquema para el escenario F.

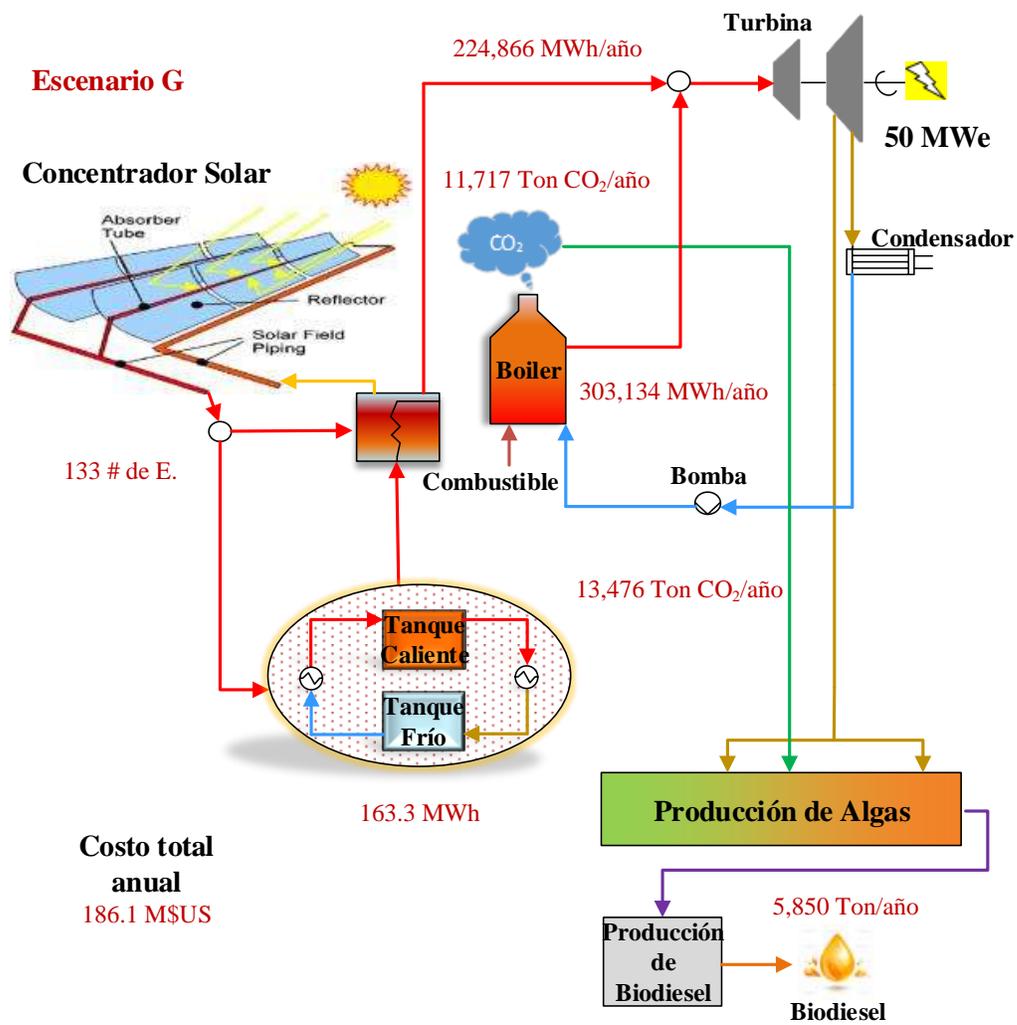


Figura 19 Esquema para el escenario G.

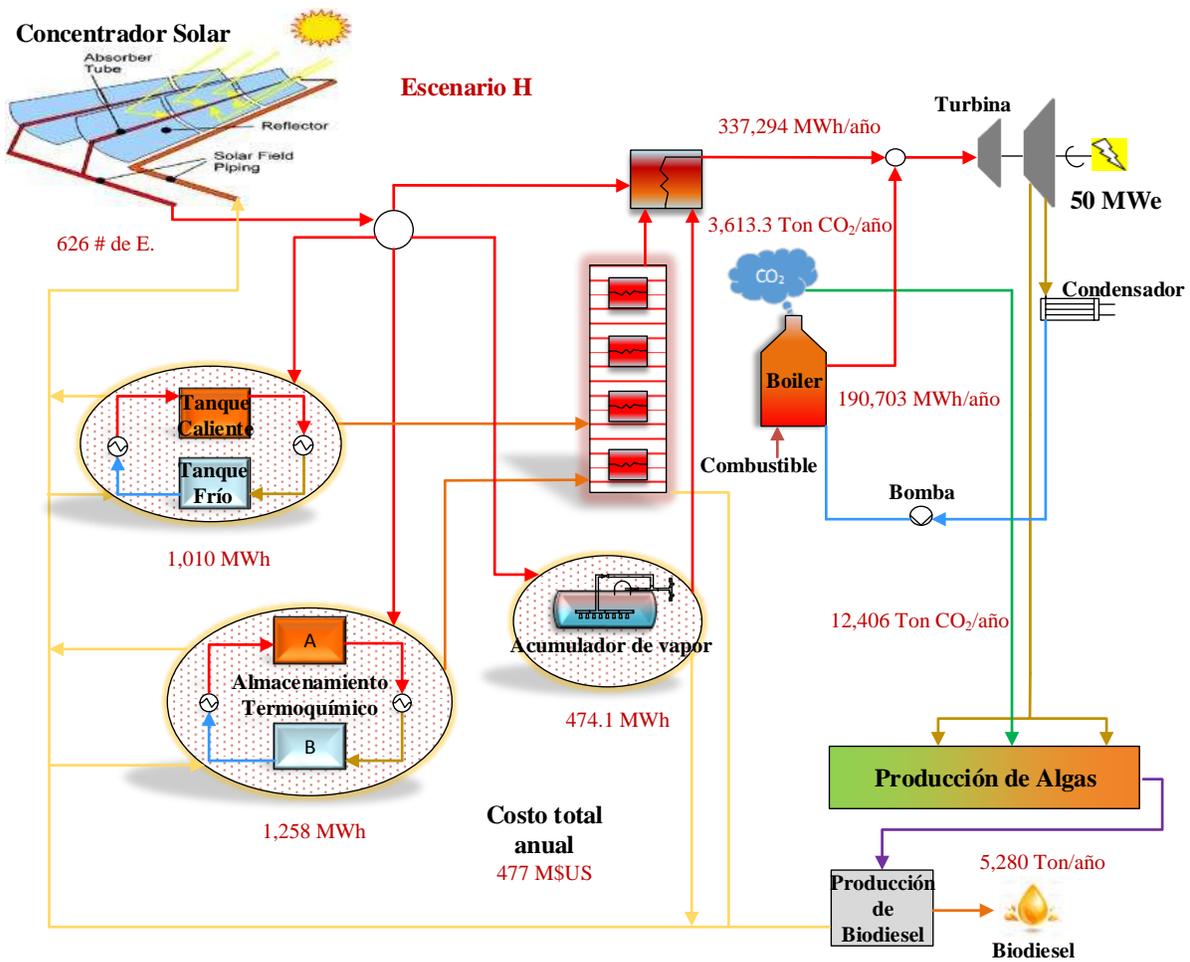


Figura 20 Esquema para el escenario H.

Tabla 8. Resultados para los escenarios propuestos.

Resultados de escenarios propuestos								
Escenarios	Baja Radiación				Alta Radiación			
	A	B	C	D	E	F	G	H
Área total del concentrador solar (Ha)	0	60.09	197.81	773.22	0	35.94	103.08	475.15
# de ensambles	0	73	243	949	0	44	126	583
Costo de capital (M\$US)	137.5	202.43	305.31	695.27	137.5	191.25	261.34	501.67
Costo operacional (M\$US)	34.087	32.408	33.296	56.97	34.087	32	31.69	60.13
Ventas (M\$US)	115.89	115.89	110.69	103.99	115.89	115.89	109.65	104
Costo total anual (M\$US)	55.697	118.95	227.91	593	55.697	107.36	183.37	457.81
Emisiones (Ton CO ₂ /year)	126	104.66	83.33	62	126	99.55	71.101	46.65
Biodiesel producido (Ton/year)	6420.48	6420.48	5992.8	5280	6420.48	6420.48	5897.76	5280
Energía utilizada en el boiler (KWh)	1500	1246	992.09	738.13	1500	1185.1	870.25	555.37
Energía solar directa y almacenada. (KWh)	0	254	507.91	761.87	0	314.9	629.75	944.63

4 CONCLUSIÓN

En esta tesis se presenta la formulación de un modelo matemático para el diseño integrado de energía solar a través de un concentrador solar y el uso de diferentes sistemas de almacenamiento, un ciclo de potencia y la incorporación de un sistema de algas para la producción de biodiesel con el fin de disminuir las emisiones de CO₂ al ambiente. El modelo propuesto incorpora la selección óptima de los sistemas de almacenamiento a través de una formulación mixta-entera del problema. Dos funciones objetivos fueron propuestas e implementadas para minimizar el costo asociado al sistema y las emisiones involucradas simultáneamente, y el método de restricción épsilon fue implementada para mostrar el comportamiento del modelo utilizando una curvas Pareto.

Un caso de estudio fue presentado, donde dos condiciones de radiación solar fueron analizadas. Los resultados muestran soluciones atractivas para ambos escenarios. Además, en ambos casos fueron identificadas soluciones compensadas en los objetivos económicos y ambientales. Con esto se puede observar que el modelo propuesto puede ser útil al momento de tomar decisiones, como las de minimizar cierta cantidad de CO₂ y/o producir biodiesel, lo cual dependerá del capital disponible para su instalación.

5 REFERENCIAS

EPA. 2014, “Climate change indicators in the United States: Global greenhouse gas emissions”. www.epa.gov/climatechange/indicators

Pitz-Paal R., Hennecke P., Heller P. Buck R., 2013, “Solar thermal power plants: Utilising concentrated sunlight for generating energy”, *BINE information service, Themeinfo ll.*

Tian Y. y Zhao C.Y., 2013, “A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications”, *Appl. Energy.*, Vol. 104, págs. 538-553.

Medrano M., Gil A., Martorell I., Potau X. Cabeza L.F., 2010, “ State of the art on high-temperature termal energy storage for power generation Parte 2- Case studies”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 14, págs. 56-72.

Kuravi S., Trahan J., Goswami Y., Rahman M.M., Stefanakos E.K., 2013, “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants”, *Prog. Energ. Combust.*, Vol. 39, págs. 285-319.

K. Lovegrove., A. Luzzi., I. Soldiani., H. Kreetz., 2004, “ Developing ammonia based thermochemical energy storage for dish power plants”, *Sol. Energy.*, Vol. 76, págs. 311-337.

http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=62

http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=40

Brennan L. y Owende P., 2010, “Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 14, págs. 557-577.

<http://www.sapphireenergy.com/locations/green-crude-farm.html>

Guo J. y Huai X., 2016, “Multi-parameter optimization design of parabolic solar receiver”, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 98, págs. 73-79.

Boukelia T.E., Mecibah M.S., Kumar B.N., Reddy K.S., 2015, "Optimization, selection and feasibility study of solar trough power plant for Algerian conditions", *Energy Convers. Manage.*, Vol. 101, págs. 450-459.

Zhao T., Min Y., Chen Q., Hao J., 2016, "Electrical circuit analogy for analysis and optimization of absorption energy storage systems", *Energy*, Vol. 104, págs. 171-183.

Flueckiger S.M., Yang Z., Garimella S.V., 2013, "Review of molten-salt thermocline tank modeling for solar thermal energy storage", *Heat. Transfer. Eng.*, Vol. 34(10), págs. 787-800.

Kolb G.J. y Hassani V., 2006, "Performance analysis of thermocline energy storage proposed for the 1 MW Saguaro solar trough plant", *ASME International Solar Energy Conference*. DOI: 10.1115/ISEC2006-99005.

Yang Z. y Garimella S.V., 2010, "Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline", *Sol. Energy*, Vol. 84(6), págs. 974-985.

Yang Z. y Garimella S.V., 2013, "Cyclic operation of molten-salt thermal energy storage in thermoclines for solar power plant", *Appl. Energy*, Vol. 103, págs. 256-265.

Torras S., Pérez-Segarra C.D., Rodríguez I., Rigola J., Oliva A., 2015, "Parametric study of two-tanks TES systems for CSP plants", *Energy Procedia*, Vol. 69, págs. 1049-1058.

Guédez R., Spelling J., Laumert B., Fransson T., 2014, "Optimization of thermal energy storage integration strategies for peak power production by concentrating solar power plants", *Energy Procedia*, Vol. 49, págs. 1642-1651.

Sun B., Guo J., Lei Y., Yang L., Li Y. Zhang G., 2015, "Simulation and verification of a non-equilibrium thermodynamic model for a steam catapult's steam accumulator", *Int. J. Heat. Mass. Tran.*, Vol. 85, págs. 88-97.

Stevanovic V.D., Maslovaric B., Prica S., 2012, "Dynamics of steam accumulator", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 37, págs. 73-79.

Bai F. y Xu C., 2011, "Performance analysis of two-stage energy storage system using concrete and steam accumulator", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 31, págs. 2764-2771.

Hübner S., Eck M., Stiller C., Seitz M., 2016, "Techno-economic heat transfer optimization of large scale latent heat energy storage systems in solar thermal power plants", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 98, págs. 483-491.

Jagadheeswaran S. y Pohekar S.D., 2009, "Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 13, págs. 2225-2244.

Tse L.A., Lavine A.S., Lakeh R.B., Wirz R.E., 2015, "Exergetic optimization and performance evaluation of multi-phase thermal energy storage systems", *Sol. Energ.*, Vol. 122, págs. 396-408.

Xu Y., He Y., Li, Y., Song H., 2016, "Exergy analysis and optimization of charging-discharging processes of latent heat thermal energy storage system with three phase change materials", *Sol. Energ.*, Vol. 123, págs. 206-216.

Luzzi A., Lovegrove K., Filippi E., Fricker H., Schmitz-Goeb M., Chandapillai M., Kaneff S., 1999, "Techno-economic analysis of 10 MWe solar thermal power plant using ammonia-based thermochemical energy storage", *Sol. Energ.*, Vol. 66(2), págs. 91-101.

Wang W., Kolditz O., Nagel T., 2015, "A parallel FEM scheme for the simulation of large scale thermochemical energy storage with complex geometries using PETSc routines", *Energy Procedia.*, Vol. 75, págs. 2080-2086.

Zheng Z.J., He Y., He Y., 2015, "Optimization for a thermochemical energy storage-reactor based on entransy dissipation minimization", *Energy Procedia.*, Vol. 75, págs. 1791-1796.

Murillo-Alvarado P.M., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., Castro-Montoya A.J., El-Halwagi M., 2013, "Optimization of pathways for biorefineries involving the selection of feedstock's, products, and processing steps", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 52, págs. 5177-5190.

Hernández-Calderón O.M., Ponce-Ortega J.M., Ortiz-del-Castillo J.R., Cervantes-Gaxiola M.E., Milán-Carrillo J., Serna-González M., Rubio-Castro E., 2016, "Optimal

design of distributed algae-based biorefineries using CO₂ emissions from multiples industrial plants”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 55, págs. 2345-2358.

Gutiérrez-Arriaga C.G., Serna-González M., Ponce-Ortega J.M., El-Halwagi M.M., 2014, “Sustainable integration of algal biodiesel production with steam electric power plants for greenhouse gas mitigation”, *ACS Sust. Chem. Eng.*, Vol 2, págs. 1388-1403.

Slade R., Bauen A., 2013, “Micro-algae cultivation for biofuels: cost, energy balance, environmental impacts and future prospects”, *Biomass. Bioenerg.*, Vol 53, págs. 29-38.

Fuentes-Cortes LF, Dowling AW, Rubio-Maya C, Zavala VM, Ponce-Ortega JM. (2016a). Integrated design and control of multigeneration systems for building complexes. *Energy*. doi:10.1016/j.energy.2016.05.093

Fuentes-Cortes LF, Santibañez-Aguilar LF, Ponce-Ortega JM. (2016b). Optimal design of residential cogeneration systems under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*. doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.02.008.