



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

"SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN REACTOR SOLAR
PARA LICUEFACCIÓN HIDROTÉRMICA".

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LIANNET ACOSTA GUTIERREZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM

TEMIXCO, MORELOS. 2019
JUNIO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado.

Secretario: Dra. Heidi Isabel Villafán Vidales.

1^{er} Vocal: Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes.

2^{do} Vocal: Dr. Patricio Javier Valadés Pelayo.

3^{er} Vocal: Dr. Pedro Manuel Arcelus Arrillaga.

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Energías Renovables, UNAM
Temixco Morelos

TUTOR DE TESIS

DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM

FIRMA

Agradecimientos

Pocas son las palabras que existen cuando se trata de expresar gratitud a todas esas personas que han contribuido en este camino de mi desarrollo profesional. Son muchos los que de forma de directa o indirectamente me han apoyado tanto profesionalmente o con simplemente con palabras de aliento, a todos ellos ya sea familia, profesores, amigos cercanos, amigos no tan cercanos, a cada uno de ellos, quiero decirles que MUCHAS GRACIAS.

En particular quiero agradecer a:

- Mis padres por su apoyo incondicional incluso en los momentos más difíciles y su amor infinito. Por estar siempre ahí para mí, una y mil gracias por hacerme la mujer que soy hoy.
- A mi tutor de la tesis Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes, por toda su paciencia y por la confianza que siempre me ha tenido. Por su apoyo incluso antes de conocerme, por ser esa persona que más que un profesor, se le puede considerar un amigo. Gracias a usted Dr. Camilo estoy hoy aquí.
- A mi esposo Carlos Noel, por darme las fuerzas necesarias cuando desfallecía, por cada instante de amor que hemos vividos juntos y por su apoyo en todo momento, cuando lo he necesitado.
- A la Dra. Heidi Isabel Villafán por todo el tiempo dedicado en ayudarme a realizar las simulaciones, por brindarme siempre su apoyo ante cualquier duda y problema.
- A Nairo, por desde el primero día de ingreso a la maestría ser mi amigo, por aguantarme estos dos años, pero sobretodo por siempre que lo necesité estar ahí.
- A Carlos Arreola por siempre darme los mejores consejos, por brindarme siempre la mano y darme soluciones a problemas que creía que no lo tenían.
- Al Dr. Omar por todo el tiempo invertido en ayudarme para que salieran las simulaciones y brindarme todo su apoyo y su amistad.
- Al Dr. Patricio Valadés por su ayuda en todo lo relacionado con la transferencia de calor en la investigación.

- Al Dr. Pedro Arcelus por apoyarme en todo momento siempre que lo necesité y sus consejos y ayuda en la investigación.
- Al Dr. Oscar Jaramillo por sus consejos y apoyo.
- Al grupo de Radiación Solar Aplicada, por brindarme todos su amistad y poder contar con ustedes cuando tenía alguna duda.
- A mis compañeros de generación, a pesar de estar lejos de mi familia, hacerme sentir como en casa, gracias a todos por su apoyo y cariño, los quiero mucho.
- A toda mi familia, en especial mi hermana Yiyi, por todo su esfuerzo para poder estar aquí.
- A la familia Patricio por acogerme cuando llegué a este país sin conocer a nadie y brindarme su ayuda incondicional.
- A la Sra. Marina y Sr. Pepelú por acogerme como una hija.
- A la familia Lango por brindarme su cariño y hacerme sentir como de su familia.
- A mis amigos Yaisel y Dayana por estar siempre ahí para mí, a pesar de los kilómetros de distancia que nos separa. Yai muchas gracias por todas las horas que sufriste conmigo las simulaciones.
- Al Instituto de Energías Renovables por abrirme sus puertas y hacerme sentir en casa.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para realizar este trabajo de investigación mediante una beca de maestría.
- Agradezco al proyecto DGAPA-PAPIIT-UNAM IN110118 “Producción de bioaceites a través del uso de microalgas y energía solar concentrada” por el apoyo otorgado para realizar esta investigación.

A todos y a cada uno de ustedes muchas muchas gracias.

Resumen

Los combustibles fósiles son conocidos desde hace mucho tiempo por su insostenibilidad e impacto ambiental. Por lo tanto, la búsqueda de recursos de energía renovable ha sido un esfuerzo persistente tanto en el mundo académico como en la industria. La conversión de biomasa en biocombustibles, a volcado toda la atención de la comunidad científica, en particular el proceso de conversión termoquímica de licuefacción hidrotérmica (HTL). Este proceso consiste en la conversión de residuos biológicos, algas y otras materia primas en biocombustibles a temperaturas y presiones elevadas. Sin embargo, este proceso para que sea implementado a escala industrial, requiere de la solución de grandes retos, como el alto consumo energético.

Mejorar la eficiencia energética es una forma efectiva de aumentar la viabilidad económica y los beneficios de la tecnología. Hasta el momento en la literatura se han reportado muy pocos estudios para resolver este gran problema, sin embargo la utilización de radiación concentrado podría ser una solución a este gran inconveniente. El Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México, trabaja en la integración del proceso de licuefacción hidrotérmica con concentración solar, utilizando el Horno Solar como fuente para alcanzar los valores de temperaturas necesarios.

Debido al poco conocimiento que se tiene de la integración de la tecnología HTL con la concentración solar es crucial comprender como se comporta la distribución de flujo radiativo y como interceptan los rayos que salen del concentrador al receptor; así como el comportamiento de la distribución de velocidad, temperatura y la transferencia de calor dentro del reactor.

Esta investigación se basa en realizar una simulación óptica del sistema de concentración con ayuda del software SolTrace que tiene su base en el método de números aleatorios de Monte Carlo y desarrollar un modelo computacional de dinámica de fluidos (CFD) utilizando el código comercial ANSYS para examinar la idoneidad del diseño actual. El modelo toma la distribución de flujo promedio obtenido de la simulación óptica, así como tiene en cuenta la convección natural que ocurre en el exterior del reactor siendo capaz de generar varios parámetros de gran importancia como el perfil de velocidades y temperaturas en el reactor. Dichos resultados permitirán tomar conclusiones y decisiones para desarrollar el proceso experimentalmente y a su vez determinar la tecnología de concentración más apropiada para alcanzar los parámetros para llevarlo a cabo.

Abstract

Fossil fuels have been known for a long time for their unsustainability and environmental impact. Therefore, the search for renewable energy resources has been a persistent effort both in the academic world and in the industry. The conversion of biomass into biofuels, has focused all the attention of the scientific community, in particular the process of thermochemical conversion of hydrothermal liquefaction (HTL). This process involves the conversion of biological waste, algae and other raw materials into biofuels at high temperatures and pressures. However, this process to be implemented on an industrial scale, requires the solution of major challenges, such as high energy consumption.

Improving energy efficiency is an effective way to increase the economic viability and the benefits of technology. So far in the literature have been reported very few studies to solve this major problem, however the use of concentrated radiation could be a solution to this great problem. The Institute of Renewable Energies (IER) of the National Autonomous University of Mexico, works on the integration of the hydrothermal liquefaction process with solar concentration, using the Solar Furnace as a source to reach the necessary temperature values.

Due to little knowledge of the integration of HTL technology with solar concentration it is crucial to understand how the distribution of radiative flow behaves and how they intercept the rays that leave the concentrator to the receiver; as well as the behavior of the distribution of speed, temperature and heat transfer within the reactor.

This research is based on performing an optical simulation of the concentration system with the help of the SolTrace software, which is based on the Monte Carlo random number method and developing a computational model of fluid dynamics (CFD) using the commercial code ANSYS to examine the suitability of the current design. The model takes the distribution of average flow obtained from the optical simulation, as well as taking into account the natural convection that occurs outside the reactor, being able to generate several parameters of great importance such as the profile of speeds and temperatures in the reactor. These results will allow to take conclusions and decisions to develop the process experimentally and in turn to determine the most appropriate concentration technology to reach the parameters to carry it out.

Agradecimientos

Pocas son las palabras que existen cuando se trata de expresar gratitud a todas esas personas que han contribuido en este camino de mi desarrollo profesional. Son muchos los que de forma de directa o indirectamente me han apoyado tanto profesionalmente o con simplemente con palabras de aliento, a todos ellos ya sea familia, profesores, amigos cercanos, amigos no tan cercanos, a cada uno de ellos, quiero decirles que MUCHAS GRACIAS.

En particular quiero agradecer a:

- Mis padres por su apoyo incondicional incluso en los momentos más difíciles y su amor infinito. Por estar siempre ahí para mí, una y mil gracias por hacerme la mujer que soy hoy.
- A mi tutor de la tesis Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes, por toda su paciencia y por la confianza que siempre me ha tenido. Por su apoyo incluso antes de conocerme, por ser esa persona que más que un profesor, se le puede considerar un amigo. Gracias a usted Dr. Camilo estoy hoy aquí.
- A mi esposo Carlos Noel, por darme las fuerzas necesarias cuando desfallecía, por cada instante de amor que hemos vividos juntos y por su apoyo en todo momento, cuando lo he necesitado.
- A la Dra. Heidi Isabel Villafán por todo el tiempo dedicado en ayudarme a realizar las simulaciones, por brindarme siempre su apoyo ante cualquier duda y problema.
- A Nairo, por desde el primero día de ingreso a la maestría ser mi amigo, por aguantarme estos dos años, pero sobretodo por siempre que lo necesité estar ahí.
- A Carlos Arreola por siempre darme los mejores consejos, por brindarme siempre la mano y darme soluciones a problemas que creía que no lo tenían.
- Al Dr. Omar por todo el tiempo invertido en ayudarme para que salieran las simulaciones y brindarme todo su apoyo y su amistad.
- Al Dr. Patricio Valadés por su ayuda en todo lo relacionado con la transferencia de calor en la investigación.

- Al Dr. Pedro Arcelus por apoyarme en todo momento siempre que lo necesité y sus consejos y ayuda en la investigación.
- Al grupo de Radiación Solar Aplicada, por brindarme todos su amistad y poder contar con ustedes cuando tenía alguna duda.
- A mis compañeros de generación, a pesar de estar lejos de mi familia, hacerme sentir como en casa, gracias a todos por su apoyo y cariño, los quiero mucho.
- A toda mi familia, en especial mi hermana Yiyi, por todo su esfuerzo para poder estar aquí.
- A la familia Patricio por acogerme cuando llegué a este país sin conocer a nadie y brindarme su ayuda incondicional.
- A la familia Lango por brindarme su cariño y hacerme sentir como de su familia.
- A mis amigos Yaisel y Dayana por estar siempre ahí para mi, a pesar de los kilómetros de distancia que nos separa. Yai muchas gracias por todas las horas que sufriste conmigo las simulaciones.
- Al Instituto de Energías Renovables por abrirme sus puertas y hacerme sentir en casa.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para realizar este trabajo de investigación.

A todos y a cada uno de ustedes muchas muchas gracias.

Contenido

Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Utilizando la biomasa como fuente de energía.	1
1.3. Tecnologías de conversión de biomasa.	2
1.3.1. Conversión bioquímica.	2
1.3.2. Procesos termoquímicos.	3
1.4. Concentración Solar.	6
1.5. Descripción del Horno Solar del IER.	7
1.5.1. Helióstato.	8
1.5.2. Concentrador.	8
1.5.3. Atenuador.	8
1.5.4. Mesa de coordenadas 3D.	8
1.6. Hipótesis	9
1.7. Objetivo General:	9
1.7.1. Objetivos Específicos:	9
2. Licuefacción Hidrotérmica (HTL).	11
2.1. Antecedentes	11
2.1.1. Licuefacción hidrotérmica de diversas biombras.	12
2.2. Licuefacción Hidrotérmica.	15
2.2.1. Ventajas sobre la pirólisis.	16
2.2.2. Efecto de los parámetros de procesamiento en el rendimiento de bioaceites durante el proceso de HTL.	16
2.2.3. Reactores para HTL.	18
2.2.4. HTL Solar.	18
3. Materiales y Métodos	21
3.1. Introducción	21
3.2. Método teórico de trazado de rayos	21

3.3. SolTrace	22
3.3.1. Forma Solar	22
3.3.2. Propiedades ópticas.	23
3.3.3. Etapas del trazado de rayos.	23
3.3.4. Trazado de rayos.	23
3.4. Dinámica de fluidos computacional.	25
3.5. Modelos Físico- Matemáticos.	26
3.5.1. Flujos en Estado Estacionario y en Estado Transitorio.	26
3.5.2. Modelo de Turbulencia: Laminar.	26
3.5.3. Modelo de Transferencia de Calor: "Thermal Energy".	26
3.5.4. Flotabilidad.	27
3.6. Geometría.	29
3.7. Mallado.	29
3.8. Condiciones de frontera.	31
3.9. Materiales	33
4. Resultados y Discusión	35
4.1. Introducción.	35
4.2. Simulaciones en SolTrace.	35
4.2.1. Receptor ubicado en el foco	36
4.2.2. Receptor acercándose al concentrador en saltos de 2.5 cm.	37
4.2.3. Receptor alejándose del concentrador en saltos de 2.5 cm.	38
4.2.4. Flujo de radiación promedio.	40
4.3. Simulaciones ANSYS.	41
4.3.1. Resultados del cálculo del Estado Estacionario.	41
4.3.2. Resultados del cálculo del Estado Transitorio.	43
5. Conclusiones	47
6. Recomendaciones	49
A. Anexos.	51
Referencias	55

Lista de Figuras

1.1.	Tecnologías de conversión de biomasa. Adaptado [25].	3
1.2.	Diagrama de fase presión-temperatura del agua. Tomado [16]	5
1.3.	Esquema de componentes de un horno solar.	7
2.1.	Ventajas de la licuefacción hidrotérmica sobre la pirólisis. Adaptado de [24].	17
3.1.	Dimensiones en cm de la sección transversal del reactor.	29
3.2.	Geometría simplificada del reactor para HTL creada en ANSYS Space- Claim.	30
3.3.	Mallado de la geometría generado con ANSYS Mashing.	31
3.4.	Partes del reactor para HTL. Condiciones de frontera.	33
3.5.	Densidad del agua en función de la temperatura.	34
4.1.	Trazado de rayos. Receptor en el foco.	36
4.2.	Trazado de rayos de la nueva configuración del sistema. Receptor ubicado en el foco.	36
4.3.	Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo.Receptor en el foco.	37
4.4.	Trazado de rayos. Receptor a 3.655 m del concentrador.	38
4.5.	Gráfico de contorno y superficie de la distribución de flujo. Receptor a 3.655m del concentrador.	38
4.6.	Trazado de rayos. Receptor a 3.705 m del concentrador.	39
4.7.	Gráfico de contorno y superficie de la distribución de flujo. Receptor a 3.705 m del concentrador.	39
4.8.	Trazado de rayos. Receptor a 3.755 m del concentrador.	40
4.9.	Gráfico de contorno y superficie de la distribución de flujo. Receptor a 3.755 m.	40
4.10.	Perfil de Temperatura en el reactor en Estado estacionario.	42
4.11.	Perfil de Temperatura en el Agua en Estado estacionario.	42
4.12.	Perfil de Presión en el Agua en Estado estacionario.	43
4.13.	Perfil de Velocidad en el Agua en Estado estacionario.	43
4.14.	Perfil de Temperatura en el reactor en Estado transitorio a los 120 s.	44
4.15.	Perfil de Temperatura en el agua en Estado transitorio a) a los 0 s y b) a los 120 s.	44
4.16.	Perfil de Presión en el agua en Estado transitorio a) a los 0 s y b) a los 120 s.	45
4.17.	Perfil de velocidad del agua en Estado transitorio a los 120 s	45

A.1. Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.58 m del concentrador.	51
A.2. Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.58 m del concentrador.	51
A.3. Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.605 m del concentrador.	52
A.4. Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.605 m del concentrador.	52
A.5. Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.63 m del concentrador.	52
A.6. Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.63 m del concentrador.	53
A.7. Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.73 m del concentrador.	53
A.8. Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.73 m del concentrador.	53
A.9. Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.78 m del concentrador.	54
A.10. Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.78 m del concentrador.	54

Lista de Tablas

3.1. Coordenadas globales de la dirección del Sol.	23
3.2. Valores de los puntos de la forma del sol real.	24
3.3. Propiedades ópticas del material del concentrador y el receptor.	24
3.4. Métrica del mallado del reactor.	31
3.5. Dominio Agua.	32
3.6. Dominio Acero.	32
3.7. Condición de Frontera, Cilindro Sección 1.	32
3.8. Condición de Frontera, Cilindro Sección 2.	33
3.9. Condición de Frontera, Partes del Reactor.	33
4.1. Flujo promedio captado por el receptor.	41

1.1. Introducción

La humanidad durante muchas décadas ha utilizado los combustibles fósiles como la principal fuente para suplir la demanda energética y también se consideran como el principal motor de la economía mundial, sin embargo el uso desmedido de los mismos, ha provocado que con el paso de los años estos se estén agotando considerablemente; a pesar de los grandes esfuerzos de explotar la industria petrolera no se han descubierto nuevos yacimientos de gran importancia o impacto en la producción mundial, por lo que la comunidad científica se ha dado a la tarea de investigar nuevas tecnologías que sean capaces de sustituir el uso de combustibles fósiles, ya que uno de los retos más importantes que enfrentará la sociedad en las próximas décadas será cubrir la creciente demanda de energía de forma segura y sustentable. Entre las posibles soluciones se encuentra el uso de energías primarias renovables, por ejemplo la energía solar y los biocombustibles.

El uso de biocombustibles líquidos obtenidos a partir de biomasa permitirá cubrir gran parte de la demanda energética que se requiere para el transporte [13]. En la actualidad se han estudiado los impactos económicos y ambientales de la producción de biocombustibles como son el etanol, metano, hidrógeno, y biodiesel, donde la producción de biodiesel es importante, debido a que es la única tecnología capaz de sustituir el consumo de combustibles derivados de petróleo [8], además ofrece ventajas ambientales como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En los últimos años, se han desarrollado varias tecnologías de conversión para obtener productos líquidos de diferentes tipos de biomasa para su uso como combustibles y productos químicos.

1.2. Utilizando la biomasa como fuente de energía.

Las fuentes de energía alternativas incluyen biomasa, energía eólica, solar, geotérmica e hidroeléctrica. La biomasa siempre ha sido una fuente importante de energía para la humanidad; representa el 10-14% de la demanda mundial de energía. Sin embargo, para 2050, se proyecta que el suministro mundial de reservas de petróleo se agotará y casi la mitad de la demanda mundial de energía será suplantada por biomasa. Las biomasas se utilizan comúnmente como energía eléctrica/térmica, como combustible para el transporte y como materias

primas para la producción de productos químicos. Se han realizado una gran variedad de estudios sobre el uso de la biomasa como fuente de energía renovable y una alternativa a los combustibles fósiles; el interés en la biomasa continúa creciendo en una tendencia creciente. El contenido de humedad, el valor calorífico, el contenido de carbono fijo y materia volátil, el contenido de cenizas y residuos, el contenido de metal alcalino y la proporción de celulosa/lignina desempeñan papeles importantes en la selección de una biomasa como fuente de energía. La cantidad y el tipo de energía obtenida varían según las propiedades de la biomasa seleccionada y la tecnología de conversión aplicada. La biomasa se puede utilizar directamente en los procesos de combustión para obtener calor o generar electricidad. Los productos obtenidos de los procesos de gasificación de biomasa se utilizan generalmente para generar calor o electricidad en un motor o turbina. Los productos sólidos y líquidos resultantes de los procesos de pirólisis y licuefacción pueden usarse como combustible después de varias mejoras. El biogás obtenido como resultado del proceso de degradación bioquímica de la biomasa se puede utilizar como combustible o para generar electricidad en los motores. En los países desarrollados, hay una tendencia creciente en el uso de la bioenergía como una energía alternativa en los sectores de manejo y transporte. Ha habido un progreso significativo en la conversión de aceite vegetal y grasa animal en biodiesel como alternativa a los combustibles diesel a base de petróleo. Los aceites obtenidos de plantas, como la soja, la canola, el maíz y la colza, son las materias primas más utilizadas para la producción de biodiesel [25].

1.3. Tecnologías de conversión de biomasa.

Las tecnologías utilizadas para convertir la biomasa en biocombustibles (es decir, combustibles sólidos, líquidos y gaseosos) con alto contenido de energía o productos químicos valiosos pueden clasificarse en dos grupos. El primer grupo, las tecnologías de conversión bioquímica, degrada la biomasa con enzimas y microorganismos. El segundo grupo, tecnologías de conversión termoquímica, degrada la biomasa con calor. El procesamiento hidrotérmico es una tecnología de conversión termoquímica y se utiliza en la producción de productos líquidos, gaseosos y sólidos a partir de biomasa. Las tecnologías de conversión de biomasa se muestran en la Figura 1.1.

1.3.1. Conversión bioquímica.

La conversión bioquímica se basa en la hidrólisis enzimática de material lignocelulósico a azúcares, que posteriormente se fermentan y destilan para dar etanol celulósico. Los procesos bioquímicos tienen la ventaja de bajas temperaturas de procesamiento y alta selectividad de los productos generados. Sin embargo, normalmente requieren etapas de preprocesamiento, largos tiempos de procesamiento, rendimientos de espacio-tiempo deficientes y procesamiento posterior difícil, como la destilación que puede consumir mucha energía.

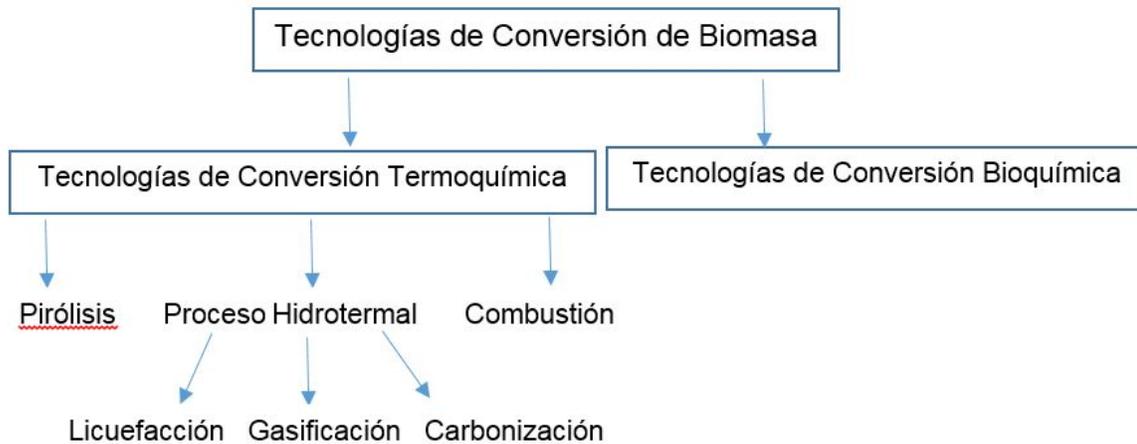


Figura 1.1: Tecnologías de conversión de biomasa. Adaptado [25].

1.3.2. Procesos termoquímicos.

Las tecnologías de conversión termoquímica se basan en la descomposición térmica de la biomasa en combustibles y productos químicos valiosos. La conversión termoquímica de la biomasa es uno de los procesos más antiguos que la humanidad ha explotado para una variedad de propósitos, incluidos el calentamiento, la cocción y la producción de coque. Las tecnologías de conversión termoquímica incluyen la combustión, la gasificación, pirólisis y la licuefacción hidrotérmica [20].

Combustión directa.

La combustión es una reacción química exotérmica, en la que la biomasa se quema en presencia de aire. En este proceso, la energía química que se almacena en la biomasa se convierte en energía mecánica y eléctrica. Este proceso es adecuado para biomasa seca que contiene humedad inferior al 50%. La biomasa se quema a la temperatura de 800-1000 °C. Este proceso se utiliza para aplicaciones domésticas, así como comercialmente en plantas de energía de biomasa para producir electricidad [22].

Gasificación.

Gasificación es un término que describe un proceso químico mediante el cual los materiales carbonosos (hidrocarburo) se convierten en un gas de síntesis (syngas) mediante oxidación parcial con aire, oxígeno y/o vapor a altas temperaturas, típicamente en el rango de 800-900 °C [4].

Pirólisis.

La pirólisis es la conversión de biomasa a biocombustible, carbón y fracción gaseosa mediante el calentamiento de la biomasa en ausencia de aire a alrededor de 500 °C, o por calentamiento en presencia de un catalizador, a alta velocidad de calentamiento y con un corto tiempo de residencia del gas para romperse en moléculas de cadena corta y luego ser enfriado a líquido rápidamente. Los procesos modernos de pirólisis se realizan a temperaturas más elevadas, hasta 700°C. La composición y cantidades relativas de los productos de la pirólisis dependen de la naturaleza de la biomasa que se emplea y las condiciones operativas. Sin embargo el alto contenido de humedad de la biomasa tiene un efecto negativo sobre la pirólisis, ya que requiere un alto calor de vaporización para eliminarla. La pirólisis y la gasificación solo pueden funcionar con alta eficiencia utilizando materia prima seca. Con el fin de aumentar el uso energético de la biomasa húmeda, que a menudo se considera biomasa residual porque es difícil de procesar con buena eficiencia, se investigan los procesos de licuefacción hidrotérmica (HTL). Estos procesos son capaces de producir combustibles de alta calidad y productos químicos de valor agregado con características diferentes a los obtenidos de biomasa seca [17], [24].

Licuefacción Hidrotérmica.

En la licuefacción hidrotérmica, la biomasa se convierte en productos líquidos con alto contenido de energía en presencia de un solvente en un rango de temperatura moderada a alta (250-550 °C) y presión (50 -250 bar). Este proceso es similar a la formación geológica de combustibles fósiles. Sin embargo, los combustibles fósiles se forman por la exposición de la biomasa a altas temperaturas y presiones bajo tierra durante muchos años, mientras que en el caso de HTL, el combustible líquido se obtiene en períodos de tiempos cortos, es decir en horas incluso hasta minutos. HTL es atractiva por varias razones: el agua es un solvente único y respetuoso con el medio ambiente; el proceso es adecuado para la biomasa húmeda (por lo tanto, no es necesario el secado de la biomasa) y se puede realizar a temperaturas más bajas que las utilizadas para la pirólisis; finalmente, el proceso ofrece una alta eficiencia energética [22].

Muchas reacciones complejas tienen lugar durante la transformación de la biomasa en productos similares al petróleo crudo. La complejidad de las reacciones químicas que ocurren durante la licuefacción hidrotérmica se debe a la compleja estructura de la biomasa. La naturaleza del proceso de conversión y los productos (sólidos, líquidos y gaseosos) depende de la temperatura de reacción empleada. Por lo tanto, a temperaturas por debajo de aproximadamente 200 °C, el producto de reacción principal es carbono sólido y el proceso se denomina carbonización hidrotérmica. Entre 200 y 350 °C, domina la formación de productos líquidos, y esto se denomina licuefacción hidrotérmica. Por encima de esta ventana de temperatura, prevalece la gasificación. Las tecnologías hidrotérmicas se definen ampliamente como transformaciones químicas y físicas que ocurren en agua líquida o sub/supercrítica a alta temperatura y alta presión (Figura 1.2).

Este proceso es sinónimo de pirólisis hidratada, pero en comparación con la pirólisis, HTL

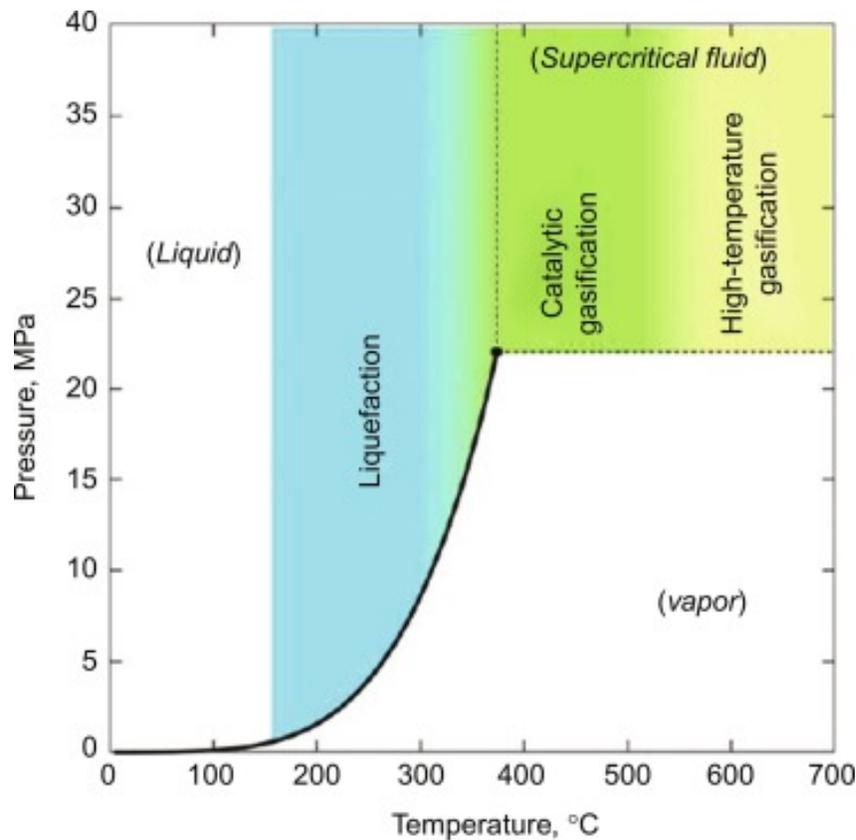


Figura 1.2: Diagrama de fase presión-temperatura del agua. Tomado [16] .

se lleva a temperaturas y velocidades de calentamiento más bajas. La baja temperatura de operación, la alta eficiencia energética y el bajo rendimiento de alquitrán en comparación con la pirólisis es el parámetro clave que llama la atención de los investigadores sobre el proceso de licuefacción. A pesar de las diversas ventajas que tiene HTL, su aplicación a escala industrial aún depende de la resolución de diferentes retos, entre los cuales se encuentran el alto consumo de energía. En este sentido, el uso de la energía solar concentrada para llevar a cabo este proceso se vuelve muy interesante, ya que se reducen los costos del combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero al no existir la necesidad de quemar combustibles fósiles para mantener la temperatura de reacción [29].

Hasta el momento, los reactores que se han desarrollado para llevar a cabo la licuefacción hidrotérmica consisten en diseños tipo batch, en donde se utiliza un fluido o una resistencia eléctrica que calienta la pared del reactor y ésta transfiere el calor a la zona de reacción. Por lo tanto, en estos sistemas no es posible tener tasas de calentamiento rápidas. Esto abre más aún la posibilidad de explorar a la energía solar concentrada no solo como una fuente de energía renovable para llevar a cabo el proceso, si no como una opción para poder obtener mejores rendimientos y mejores características del biocombustible.

1.4. Concentración Solar.

Los sistemas de concentración solar tienen como finalidad incrementar el flujo de radiación solar sobre receptores diseñados para absorberla. La idea fundamental es capturar la energía solar para transformarla en calor útil que pueda aprovecharse como fuente directa de calor; o bien, para ser transformada posteriormente en energía mecánica o energía eléctrica. La generación de potencia a partir de la energía solar, requiere necesariamente de sistemas de concentración solar. La razón de esto es que la eficiencia, de los procesos de conversión, depende de la obtención de altas temperaturas. Existen diversas configuraciones para los sistemas de concentración solar, pueden ser reflectores o refractores; pueden formar imagen solar o no formarla; pueden seguir al sol, tener ajustes periódicos o estar fijos; pueden ser cilíndricos para enfocar sobre una "línea"(concentradores bidimensionales) o circulares para enfocar sobre un "punto"(concentradores tridimensionales).

Las tecnologías que concentran la luz del Sol podemos separarlas en tres grandes grupos dependiendo de su aplicación:

- Sistemas de baja temperatura: son tecnologías que permiten obtener temperaturas de salida en un intervalo de 80°C a 100°C aproximadamente. En general no requieren de concentrar la radiación solar y tampoco requieren de seguir el movimiento diurno del Sol. La aplicación más extendida es el colector plano para producir agua caliente sanitaria en casas, piscinas y edificios en general.
- Sistemas de media temperatura: son tecnologías que permiten obtener temperaturas en fluido de salida en un intervalo aproximado entre los 80 °C y los 250 °C. Éstas ya requieren de la concentración solar y sus aplicaciones se encuentran en la producción de fluidos térmicos para procesos industriales, la desalinización de agua de mar, refrigeración mediante energía solar y cocción de alimentos. Entre los dispositivos típicos de estos sistemas, se encuentran los CPC y los de geometría "axial" como los concentradores cilindro-parabólicos. Estos últimos requieren de dispositivos para seguir al movimiento del Sol.
- Sistemas de alta temperatura: son tecnologías en las cuales el flujo de salida puede alcanzar temperaturas superiores a los 250°C y llegar hasta los 2000°C. Las aplicaciones típicas de estas tecnologías son la producción de electricidad con energía solar. Para ello suele acoplarse, en la región focal, un mecanismo basado en ciclos termodinámicos, o algunos procesos de química solar (por ejemplo el reformado de metano para producir hidrógeno). Los dispositivos de concentración típicos son de geometría "de revolución" ya sean de superficie única, como los espejos parabólicos de revolución (o discos parabólicos) o de superficies múltiples o facetadas, como los campos de helióstatos con concentración sobre receptor soportado en torre central. También se cuentan entre estos sistemas los concentradores de tipo Fresnel y los cilíndrico-parabólicos para la generación de potencia eléctrica.

Para reducir costos energéticos en el desarrollo de HTL de biomasa, la concentración solar hasta el momento es la alternativa más factible para reducir dichos costos, por lo que para

llevar a cabo esta investigación se utilizará el Horno Solar (HoSIER) del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México.

1.5. Descripción del Horno Solar del IER.

El Horno Solar del IER está compuesto por un conjunto de sistemas con características específicas que le permiten funcionar de manera adecuada para los propósitos para los que fue diseñado. El diseño óptico del HoSIER fue un trabajo conjunto entre la Coordinación de Concentración Solar del IER y el Departamento de Óptica del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE). La fabricación de los espejos se realizó en el INAOE y el diseño mecánico y construcción de la estructura, por el departamento de Diseño Mecánico del INAOE. El montaje y puesta en operación, lo realizaron personal del INAOE y del IER. Los sistemas de control fueron diseñados por el CIMAT, IER-UNAM y CCADET. EL HoSIER está constituido de un sistema óptico compuesto por un heliostato con seguimiento automático del Sol que refleja la radiación solar a un espejo concentrador. Debido a que la zona focal del espejo concentrador está fija, es sencillo instalar aparatos experimentales o de aplicación. El nivel de potencia del Horno es ajustado usando un atenuador, que trabaja como una persiana veneciana, y está localizado ente el heliostato y el concentrador. A continuación se muestra un esquema del horno y se explica la función de cada uno de sus componentes [11].

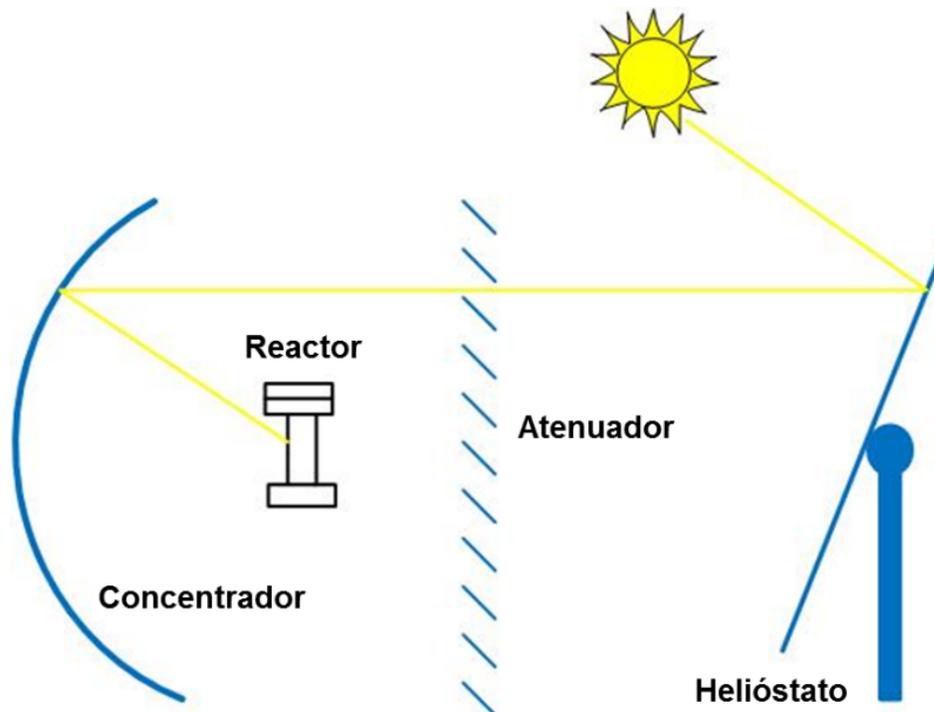


Figura 1.3: Esquema de componentes de un horno solar.

1.5.1. Helióstato.

La función del helióstato es reflejar la radiación solar directa hacia el concentrador del horno, cubriendo toda el área de captación del concentrador y de manera paralela al eje óptico, ya que este horno es del tipo “en eje focal”. El helióstato está compuesto de 30 espejos rectangulares de segunda superficie de 6 mm de espesor, 20 de ellos de 1.3 m x 1.8 m y los otros 10 de 1.8 m x 1.9 m, ordenados en 6 filas y 5 columnas.

1.5.2. Concentrador.

El concentrador del HoSIER es el que se encarga de aumentar la densidad de flujo radiativo solar por medio de espejos de superficie cóncava esférica que reflejan la radiación solar hacia el foco del concentrador. El sistema óptico de concentración solar del HoSIER está compuesto por un arreglo de 409 espejos de primera superficie con 40 cm de diámetro de forma hexagonal y superficie esférica, divididos en 5 grupos con distancias focales distintas, siendo la distancia focal de todo el conjunto de espejos de 3.68 m a partir del vértice. Cada espejo es de primera superficie, esto es, después de pulido el espejo, por técnica de evaporación se deposita una película de aluminio evaporado y después se aplica óxido de magnesio como protector, quedando con un índice de reflectancia de 0.91.

1.5.3. Atenuador.

El atenuador está ubicado en la abertura de la edificación que contiene al concentrador y es el sistema de control que regula la entrada de la radiación solar proveniente del helióstato hacia el concentrador, por lo que es de suma importancia tener un control confiable y seguro. La cantidad de energía solar que permite pasar va de 0 a 100 % con divisiones de 1 %.

1.5.4. Mesa de coordenadas 3D.

En la zona focal del HoSIER se tiene una mesa de trabajo para montar dispositivos que recibirán la radiación solar concentrada, esta mesa cuenta con desplazamientos en tres direcciones, (ejes, X, Y, Z). La mesa tiene la capacidad de proporcionar un movimiento con precisión milimétrica en cualquiera de las tres direcciones, carreras de desplazamientos totales de 24 cm y tiene una capacidad de carga de 250 Kg. Con estas características, se logra tener el control en el posicionamiento de los receptores/reactores en la zona focal del HoSIER.

1.6. Hipótesis

- Es posible utilizar la energía solar concentrada para llevar a cabo de manera eficiente la licuefacción hidrotérmica de biomasa.
- Con la caracterización de un reactor solar para el proceso de licuefacción hidrotérmica se podrán definir los parámetros necesarios para desarrollar dicho proceso.
- La simulación óptica del reactor solar permitirá la configuración óptima para realizar la licuefacción hidrotérmica utilizando concentración solar.
- La simulación de la transferencia de calor, podrá proporcionar una idea de los valores a obtener al desarrollar HTL integrado con concentración solar de forma experimental.

1.7. Objetivo General:

Caracterizar un reactor solar para licuefacción hidrotérmica de biomasa usando como fuente del proceso la energía solar concentrada.

1.7.1. Objetivos Específicos:

- Analizar y optimizar las diferentes condiciones de operación con energía solar concentrada (irradiancia solar, temperatura, presión) para obtención de bioaceite con las características deseadas.
 - Simular ópticamente el sistema de concentración solar integrado con un reactor para HTL con ayuda del Software SolTrace.
 - Simular la transferencia de calor que ocurre del cuerpo del reactor al interior del mismo.
 - Obtener el perfil de velocidades y temperaturas dentro del reactor para HTL con ayuda de la dinámica de fluidos utilizando el Software comercial ANSYS.
-

Licuefacción Hidrotérmica (HTL).

2.1. Antecedentes

Los crecientes problemas ambientales, la disminución de los combustibles fósiles y la alta demanda energética han conllevado a la humanidad a explorar nuevas fuentes de energías capaces de suplir las necesidades de la sociedad. La biomasa como ya se había mencionado en el capítulo anterior es una de las opciones destacadas como fuente de energía renovable y sostenible, pero la metodología de conversión de esta sigue siendo un gran desafío.

Hasta la fecha, toda la investigación sobre la producción de biocombustible descansa sobre la madera seca sólida, pero los residuos líquidos tienen una ventaja mejor sobre el abono sólido, que es el parámetro de procesamiento crítico para el proceso de licuefacción hidrotérmica (HTL). Entre las diversas posibilidades de la biomasa húmeda, las microalgas se consideran una excelente fuente de producción de biocombustibles debido a sus ventajas, como la alta eficiencia fotosintética, la producción máxima de biomasa, la velocidad de crecimiento rápida y la falta de requisitos de suelo cultivable. Actualmente se cuenta con muy poca atención sobre el HTL del proceso de biomasa húmeda y muy pocos intentos de plantas piloto en todo el mundo.

Durante muchos años de investigación, se han ido conociendo las tecnologías de conversión termoquímicas, las que cada una de ellas tienen sus propias ventajas y desventajas. En este sentido la licuefacción hidrotérmica es considerado como el proceso adecuado para la conversión de la biomasa húmeda a energía. Entre los procesos de conversión termoquímica, la licuefacción fue una de las más estudiadas, M. Balat en 2008 realizó un estudio sobre dicho proceso y menciona una gran variedad de investigaciones que se ha reportado en la literatura, por ejemplo Kaufman y Weiss, 1975; Appell y otros, 1980; Kranich, 1984; Chornet y Overend, 1985; Meier y Rupp, 1991; Datta y McAuliffe, 1993; Gharieb et al., 1993; Minowa et al., 1995; Elliot et al., 1987; Sahin et al., 2000; Küçük, 2001; Demirbas et al., 2000a, 2000b, 2005; Demirbas, 2005; Zhang et al., 2006 [6].

M. Balat en su investigación también menciona el estudio fundamental de los procesos de licuefacción que se realizó en la década de 1970, financiado por la Oficina de Minas de los Estados Unidos y a Appell et al. (1980) que investigó el proceso de conversión termoquímica para convertir los desechos celulósicos, incluido el estiércol, en petróleo. El hidrógeno y el CO se usaron como gases de proceso. Las reacciones se llevaron a cabo en presencia de

carbonato de sodio como catalizador. Los resultados mostraron que la eficiencia de conversión de los sólidos volátiles era 90 % o mejor, y los rendimientos de aceite variaban de 40-50 %. Descubrieron que la presencia de CO afectó fuertemente la tasa de conversión de la materia orgánica y el rendimiento de aceite [6] .

En 1985, se realizó un proyecto de investigación internacional sobre la licuefacción directa con el nombre “Instalación de prueba de licuefacción de biomasa”, este fue desarrollado por seis laboratorios que utilizaban la misma biomasa pero con diferentes condiciones de preparación y reacción en la experimentación. En este estudio se analizaron los rendimientos y las propiedades del aceite obtenido [24].

En una revisión de la licuefacción hidrotérmica de la biomasa Gollakota[15] menciona que Peterson et al. proporcionó una descripción completa sobre la licuefacción hidrotermal de biomasa utilizando agua sub o súper crítica o la técnica de extracción de solvente. Además, los productos del proceso de HTL comprenden una amplia gama de compuestos químicos de valor añadido que incluyen compuestos alifáticos ramificados, aromáticos y derivados fenólicos, ácidos carboxílicos, ésteres y estructuras de anillos nitrogenados. A su vez también mencionó que los investigadores Jena et al. , Alba et al. publicaron recientemente una biorrefinería de algas renovables basada en HTL de algas.

La literatura con la que se cuenta actualmente sobre los mecanismos de reacción de HTL es crítica para comprender como ocurre dicho proceso, con el fin de diseñar mejor los reactores y controlar el proceso. En la actualidad, la comprensión de los mecanismos de HTL es en gran medida cualitativa e indicativa, aunque muchos investigadores han realizado un gran esfuerzo a lo largo de los años. HTL se encuentra en estado transitorio desde la escala piloto de laboratorio hasta la escala piloto-industrial, lo que hace que su estudio y comprensión sean más importantes y urgentes.

Recientemente se han realizado una variedad de trabajos relacionados con HTL de biomasa húmeda y seca a través de diferentes técnicas. Por ejemplo, Alhassan et al.[3] explicó algunos detalles del proceso de HTL en la biomasa seca y obtuvo bio-aceite con propiedades equivalentes al aceite de pirólisis. Costanzo y otros investigadores[9] obtuvieron bio-aceite derivado de biomasa húmeda y concluyeron que el bio-aceite obtenido es equivalente a la gasolina convencional. En los últimos años la creciente necesidad de buscar fuentes renovables han conllevado a la comunidad científica al estudio sobre varios aspectos de HTL. Por ejemplo, en un estudio realizado por los investigadores Akhtar y Amin[1] revisaron la literatura relacionada con HTL de biomasa e informaron condiciones de proceso tales como temperatura final de licuefacción, tiempos de residencia, velocidad de calentamiento de biomasa, tamaño de partículas de biomasa, tipos de solventes, etc. para obtener un rendimiento óptimo de biopetróleo. También incluyeron una breve discusión sobre los mecanismos de descomposición durante la licuefacción hidrotermal.

2.1.1. Licuefacción hidrotérmica de diversas biomásas.

Las investigaciones sobre el procesamiento hidrotérmico se ha concentrado en la utilización de biomasa y desechos húmedos. El proceso presenta una gran ventaja para las materias primas húmedas, pero también se ha investigado la biomasa con bajo contenido de humedad,

como la biomasa leñosa. La mayoría de la biomasa se puede procesar por conversión hidrotérmica, pero una de las principales consideraciones es a menudo la facilidad de bombeo y la transferencia de material.

La licuefacción hidrotérmica tiene un gran potencial debido a su flexibilidad; esto permite el uso de materias primas que generalmente son difíciles de tratar, como aquellas que presentan un alto contenido de humedad, un alto contenido de cenizas, etc. Debido a la naturaleza versátil del proceso, la materia prima puede variar en composición y calidad a lo largo de la operación sin mayores implicaciones en el diseño del proceso, aunque se debe tener en cuenta la facilidad de bombeo de la materia prima y la calidad de los productos. Muchos tipos de biomasa húmeda, como lodos, estiércol animal, desperdicio de alimentos y granos de destilería están disponibles en grandes cantidades. Los residuos biológicos son probablemente las materias primas más prometedoras para los procesos hidrotermales, aunque actualmente la atención está concentrada en materias primas futuras como las algas y las microalgas [7].

HTL de biomasa lignocelulosa

La materia prima lignocelulósica requiere pretratamiento, especialmente la biomasa leñosa debido a que es necesario reducir el tamaño de la partícula, eliminar los contaminantes y el tratamiento alcalino para poder obtener una suspensión estable. La materia prima se procesa a través de HTL a una temperatura de alrededor de 350 °C y una presión de 150 bar durante 15 min aproximadamente. La separación de fases ocurre de forma espontánea en estas condiciones de funcionamiento, dando como resultado la corriente gaseosa de CO_2 , residuos sólidos, biocombustibles y una pequeña porción de fase acuosa [23].

Durante la licuefacción hidrotérmica de la biomasa, en general, una fase oleosa (bio-aceite o bio-crudo), los orgánicos acuosos y una fase gaseosa rica en CO_2 se forman. Muchos estudios a escala de laboratorio se realizan con una baja carga de sustrato del 10 % o menos, lo que a menudo da como resultado que una gran fracción del carbono termina en la fase acuosa en lugar de en la fase de aceite. El aceite, además de carbono, hidrógeno y oxígeno, normalmente contiene nitrógeno y azufre. Sus niveles dependen de la composición del sustrato de biomasa. También los rendimientos, las propiedades físicas, la formación de carbón y la composición del gas varían ampliamente entre diferentes biomásas y procesos.

Ha habido varios artículos que investigan el uso de materias primas de biomasa lignocelulósica para HTL, por ejemplo Nazari et al. investigaron la licuefacción hidrotérmica de la biomasa leñosa (aserrín de madera de abedul) con y sin catalizador a 300 °C durante 30 min, donde obtuvieron que los catalizadores alcalinos tienen un mejor desempeño teniendo en cuenta el rendimiento de aceite y el rendimiento de residuos sólidos, los productos de petróleo crudo biológico se caracterizaron exhaustivamente utilizando un analizador elemental, GC-MS, FT-IR, GPC y TGA y los resultados de GPC indicaron que los aceites producidos en presencia de catalizadores tienen pesos moleculares y distribuciones muy similares, que son ligeramente mayores que el aceite producido en ausencia de cualquier catalizador [19].

Otro estudio realizado fue el de la licuefacción de biomasa de Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) para producir biocombustibles, donde los residuos hidrolizados secos y los no hidrolizados se licuaron a varias temperaturas, arrojando como resultado que el rendimiento de petróleo

y gas de los materiales de biomasa aumentó a medida que la temperatura aumentó de 250 a 300 °C. El aumento de la temperatura a 350 °C dio como resultado una disminución en el contenido de petróleo + gas. Los aceites producidos a partir de la licuefacción de kenaf, hidrolizado de kenaf seco y residuo de kenaf no hidrolizado consistieron en componentes relacionados con el combustible, tales como hidrocarburos aromáticos, benceno y compuestos derivados del benceno, etc [18].

La licuefacción hidrotérmica de biomasa lignocelulósica (paja de trigo) en biocombustible también se ha investigado en condiciones subcríticas en agua y mezclas de agua-alcohol usando etanol e isopropanol en un reactor tubular de funcionamiento continuo. Se encontró que la mezcla de agua y etanol era un medio muy reactivo que mostraba una conversión completa de biomasa demostrando la utilidad de las mezclas de agua y etanol para una despolimerización efectiva de la biomasa lignocelulósica a bio-aceites en condiciones de reacción subcrítica con HHV más del doble en comparación con la materia prima, en particular utilizando un catalizador y la presencia de hidrógeno para una mayor desoxigenación [28].

HTL de biomasa húmeda

La biomasa de algas ha recibido una atención cada vez mayor y la licuefacción hidroterma podría ser un proceso prometedor para la conversión a un portador de energía líquida. Especialmente las microalgas son una de las especies de biomasa más prometedoras debido a la alta tasa de crecimiento y la alta capacidad de fijación de CO_2 en comparación con las plantas.

La producción de metano a partir de microalgas se convirtió en la base y la motivación del programa U.S. DOE's. para desarrollar combustibles renovables para el transporte a partir de microalgas, el cual comenzó en 1978 y finalizó en 1998. Este programa se centró principalmente en la producción de biodiesel a partir de microalgas de alto contenido de lípidos cultivadas en estanques, utilizando residuos de CO_2 de las centrales eléctricas de carbón. Otro beneficio único del uso de microalgas para producir biodiesel es que no perjudica la producción de alimentos, fibra y otros productos derivados de los cultivos [31].

En los últimos años, el número de artículos relacionados con HTL de microalgas ha aumentado significativamente, lo que indica un interés creciente por esta tecnología de conversión. Se han investigado diferentes tipos de cepas (*Botryococcus braunii*, *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis* sp. O *Desmodesmus* sp., entre otras). Se han informado rendimientos máximos de biocrude en la vecindad del 50 % al 60 %. Por ejemplo Xu et al. (2006) utilizaron n-hexano para extraer grandes cantidades de aceite microalgal de *Chlorella*, cuyo contenido de lípidos en bruto es aproximadamente 55.2 %. Luego, el aceite de microalga se transformó en biodiesel por transesterificación ácida. El biodiesel se caracterizó por un alto valor calorífico de 41 MJ/kg [30]. Otro estudio realizado reporta la licuefacción rápida de *Nannochloropsis*.sp en un tiempo de reacción de 1 min y se obtuvo un rendimiento de biocrudo de 66 ± 11 % en peso [12].

2.2. Licuefacción Hidrotérmica.

El agua que contiene la biomasa tiene un efecto negativo en la pirólisis, ya que se requiere un alto calor de vaporización. Esto limita las opciones para la biomasa como materia prima y la economía general del proceso. En general, la licuefacción pirolítica licua la biomasa adecuadamente con un contenido de humedad $<40\%$. El contenido de agua en pastos tropicales puede ser tan alto como 80 a 85 % o similar a 90 % para especies acuáticas, por lo que requiere preprocesamiento para poder ser utilizadas en el proceso de pirólisis.

Para resolver el problema del contenido de humedad, pocos estudios han sugerido un secado atmosférico seguido de deshidratación mecánica. El secado solar puede ser rentable, pero requiere más tiempo para que la biomasa reduzca el contenido de humedad. Otros métodos de deshidratación son costosos y hacen que los procesos de pirólisis no sean económicos. Una solución para manejar altos contenidos de humedad en la biomasa puede ser la licuefacción hidrotérmica de la biomasa. Este método puede licuar la biomasa con cualquier nivel de contenido de humedad, produce una alta conversión de biomasa y productos relativamente puros [15]. La licuefacción hidrotérmica (HTL) implica la reacción de biomasa o material orgánico en presencia de agua generalmente en el rango de temperaturas de 250 °C a 374 °C, y presiones de aproximadamente 4- 22 MPa [25].

Durante el proceso de transformación de la biomasa en productos similares al petróleo tienen lugar muchas reacciones de gran complejidad. La estructura tan compleja que presenta la biomasa provoca que las reacciones químicas que ocurren durante la licuefacción hidrotérmica sean complicadas. Los componentes de la biomasa consisten principalmente en hidratos de carbono, lignina, proteínas y grasa. La descomposición de estos componentes en condiciones de agua subcrítica produce diferentes productos, pero los mecanismos de degradación comprenden los siguientes pasos [26]:

- Despolimerización de la biomasa.
- Degradación de los monómeros (reacciones de escisión, deshidratación y descarboxilación).
- Recombinación de componentes fragmentados.

HTL se puede realizar a partir de dos condiciones de reacción: condiciones subcríticas y de agua supercrítica. Estas condiciones están determinadas por el punto crítico del agua (es decir, 374 °C y 22.1 MPa) (Figura 1.2). Para cada una de las condiciones, el agua presenta propiedades diferentes. Estas condiciones tienen sus ventajas distintivas. Por ejemplo, la mayoría de los componentes de la biomasa, como la celulosa y la lignina, son insolubles en el agua ambiente, pero son solubles en agua a alta temperatura o agua supercrítica. Bajo condiciones supercríticas, las macromoléculas en la biomasa se descomponen en sus componentes básicos para producir productos gaseosos. En condiciones con una temperatura y presión más bajas, las macromoléculas se descomponen para formar un producto de bioaceite viscoso.

En general, hay un aumento en el rendimiento de bio-aceite hasta aproximadamente 300–350 °C; el rendimiento del producto gaseoso aumenta a temperaturas más altas (es decir, ≥ 350 °C). Aunque los productos de la licuefacción hidrotérmica tienen un contenido de oxígeno más bajo y, por lo tanto, valores de calentamiento más altos en comparación con los de la pirólisis, los bio-aceites no se pueden usar directamente como combustible para el transporte. Para que un combustible se utilice en el transporte, debe tener características físicas adicionales. Estos incluyen un alto contenido de energía, una buena capacidad de combustión y la capacidad de almacenar convenientemente de manera efectiva. El contenido de oxígeno de la biomasa es del 40 al 60 %, mientras que los combustibles de alta calidad tienen un contenido de oxígeno inferior al 1 %. Una cantidad significativa de oxígeno de la biomasa se elimina mediante reacciones de deshidratación o descarboxilación. Aunque hay un exceso de agua en el medio de reacción, las reacciones de deshidratación generalmente ocurren en medios hidrotermales a altas temperaturas y presiones [25].

Los bio-aceites obtenidos como resultado de un proceso hidrotermal se pueden mejorar y usar en lugar de gasolina o diesel. Los procedimientos de mejora para obtener combustibles líquidos de alta calidad a partir de bio-aceites se pueden realizar por medios físicos (es decir, separación, extracción o adición de solventes), químicos o catalítico.

2.2.1. Ventajas sobre la pirólisis.

La licuefacción hidrotérmica está recibiendo una mayor atención debido a las propiedades inherentes únicas del agua a alta temperatura, las cuales son alto producto iónico y una baja constante dieléctrica, que son favorables para la realización de reacciones químicas sin catalizadores. Algunas de las ventajas que presenta HTL son:

- No se requieren grandes cantidades de catalizadores, lo que reduce la contaminación por las sales.
- Las reacciones oxidadas y catalizadas por ácido/ base ocurren fácilmente y pueden controlarse.
- Se pueden utilizar una gran variedad de biomasa como materia prima.
- El agua en sí misma es un medio de reacción respetuoso con el medio ambiente.

En la Figura 2.1 se muestran las ventajas de HTL sobre la pirólisis.

2.2.2. Efecto de los parámetros de procesamiento en el rendimiento de bio- aceites durante el proceso de HTL.

Los principales parámetros que influyen en el rendimiento y la composición del bio- aceite son la temperatura, las propiedades del disolvente, la densidad del disolvente y el tipo de biomasa. Otros como el tamaño de partícula, tasa de calentamiento, tiempos de residencia, presión ejercen una menor influencia.

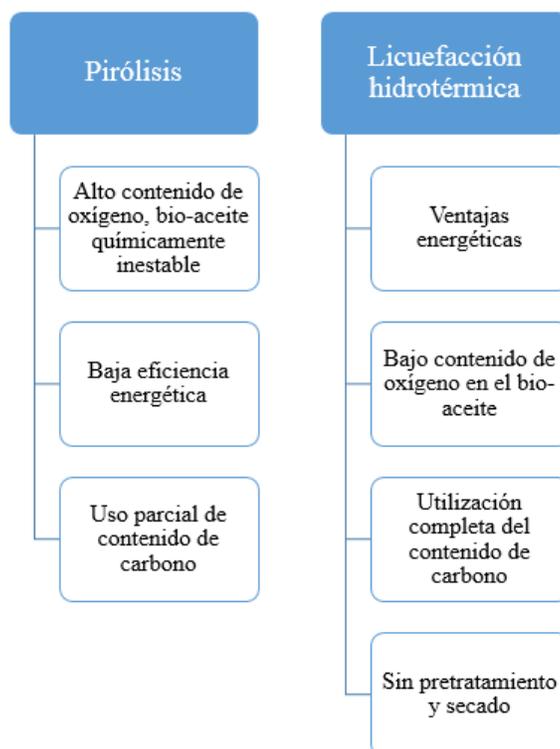


Figura 2.1: Ventajas de la licuefacción hidrotérmica sobre la pirólisis. Adaptado de [24].

Efectos de la Temperatura

La temperatura es el parámetro que más incidencia tiene para el rendimiento del bio-aceite o para la conversión de la biomasa. El rango recomendado para la temperatura final puede variar de 300 a 374 °C dependiendo del tipo de biomasa y las especificaciones para la composición del bio-aceite. Una temperatura mayor a 350 °C conduce a la formación de gas, lo que inhibe la producción de aceite líquido. Para temperaturas inferiores a 280 °C, la conversión de biomasa no es suficiente. El rango de temperatura más aconsejable para la descomposición de celulosa, hemicelulosa, pasto, algas y madera blanda es de 300- 330 °C. La madera dura y la lignina pueden necesitar temperaturas más altas para hidrolizarse.

Efectos del tipo de disolvente

Los solventes son los responsables de soportar las reacciones que ocurren durante el proceso de HTL, lo que conlleva a una mejor fragmentación de la biomasa y la disolución de radicales libres. El agua es un solvente adecuado por su bajo precio y su suministro abundante. También existen disolventes orgánicos, los que alternativamente son opciones adecuadas, algunos de estos son el metanol, el etanol, la acetona, el benceno, etc. Generalmente el poder de extracción del disolvente aumenta con el aumento de la densidad de dicho disolvente;

esto se debe a la disponibilidad de moléculas extra de solventes por unidad de moléculas de biomasa. Por lo tanto la relación alta contenido de disolvente/ biomasa son usualmente desfavorables porque la utilización de grandes cantidades de solventes significa mayores insumos energéticos y problemas de tratamiento de agua.

Efectos del tipo de biomasa

La heterogeneidad de biomasa conduce a la modificación de los principales productos líquidos y al rendimiento en general. Los principales componentes de la biomasa como la lignina, la hemicelulosa y la celulosa se comportan de forma diferente a la variación de la temperatura en condiciones hidrotérmicas. En presencia de un alto contenido de celulosa y hemicelulosa en la biomasa se produce más bioaceite. La lignina es difícil de degradar y aparece principalmente en la fracción de residuos, por lo tanto la presencia de lignina en la biomasa conduce a bajas fracciones de aceite y a la formación de residuos de carbón .

Efectos de la presión

La presión ejerce un efecto bajo sobre el rendimiento de bio- aceite. El objetivo principal de la presión es mantener una sola fase durante la licuefacción. Sin embargo, una vez que se alcanzan las condiciones para HTL, la presión tiene un papel insignificante en la modificación del rendimiento de aceite líquido [2].

2.2.3. Reactores para HTL.

El proceso de licuefacción hidrotérmica se realiza en tres configuraciones de reactor, que son de tipo discontinuo, semicontinuo y en reactor continuo [27], [10]. Muchos de los materiales con los que se construyen los reactores tienen una inercia y resistividad limitadas frente al agua subcrítica. La corrosión del material del reactor se vuelve más pronunciada con el aumento de la temperatura. Se han utilizado varios materiales de reactor que consisten en aleaciones metálicas, como el acero inoxidable. Los iones metálicos que se liberan de la corrosión de los materiales del reactor se disuelven en agua subcrítica, que actúan como catalizadores homogéneos para las reacciones que se producen. Además, debe tenerse en cuenta un posible efecto catalítico heterogéneo de la pared del reactor. Todos estos efectos, hasta la fecha, han sido escasamente investigados y requieren el desarrollo de materiales de reactor altamente resistentes [24].

2.2.4. HTL Solar.

A pesar de las diversas ventajas de los procesos de HTL, su desventaja principal es la gran cantidad de energía que se requiere para elevar la temperatura del reactor y a su vez de la biomasa. A pesar de los avances en el estudio de HTL la integración de la energía solar para la producción de bioaceites a partir del proceso de HTL no ha sido reportada ampliamente por otros autores, por lo que aún queda mucho que investigar respecto al tema.

Azadi estudió la gasificación hidrotermal de glicerol, en un reactor catalítico tubular de doble tubo utilizando una mezcla binaria de "sal solar" (60 % $NaNO_3$ y 40 % KNO_3) calentada por calor solar. Como resultado obtuvo que las sales fundidas son fluidos de transferencia de calor eficaces para las reacciones de gasificación hidrotérmicas debido a sus altas velocidades de calentamiento. Además, que la integración del calor solar en el proceso disminuye el uso de combustibles fósiles y la emisión global de gases de efecto invernadero de la planta y permite una mejor utilización de la energía solar almacenada en el fluido de transferencia de calor con respecto a la generación de energía mediante turbinas de vapor [5].

En el estudio de integrar la energía solar en la HTL de microalgas [21], la idea básica era usar la suspensión acuosa de microalgas como fluido de transferencia de calor en concentradores parabólicos a través de la mezcla para llevarla a la temperatura de reacción. La reacción de licuefacción se completa luego en un reactor adiabático discontinuo. Debido a la configuración simple de la planta, se estimó un precio de venta de combustible mínimo bastante bajo de 1.23 US/kg. Sin embargo, no se evaluó la operabilidad a largo plazo de los concentradores solares, además, la planta no tiene sistema de almacenamiento y puede procesar por lotes una cantidad limitada de microalgas por día, lo que conduce a una productividad bastante limitada de biocombustible. Por lo tanto, se necesitan más estudios para evaluar un proceso de HTL de microalgas junto con un concentrador solar parabólico.

Otro estudio fue realizado por Giaconia et al. donde los objetivos fueron investigar un análisis tecnoeconómico (TEA) de los factores que influyen en la unificación de los colectores parabólicos (CSP) y HTL para el procesamiento de biomasa de microalgas en bioaceite. De acuerdo con los resultados obtenidos, parece posible usar una mezcla de sal fundida calentada en una planta de concentración solar para mantener energéticamente el HTL continuo de microalgas para biocruzar en un contexto biorrefrigerante usando reactores químicos convencionales sin penalidades económicas significativas y complejidad técnica en comparación con una planta donde solo el autoconsumo del biocrudo se utiliza para proporcionar la energía al proceso [14].

3.1. Introducción

Para el desarrollo de la investigación la principal herramienta utilizada en este trabajo es la modelación computacional, para lo cual fueron utilizados el método de Monte Carlos y las técnicas de CFD mediante el software SolTrace y ANSYS Fluent 19 respectivamente, con el objetivo de obtener el trazado de rayos, la distribución de flujo y el comportamiento de la transferencia de calor de un reactor solar para licuefacción hidrotérmica.

3.2. Método teórico de trazado de rayos

El método de trazado de rayos, consiste básicamente en considerar que la luz se desplaza desde una fuente luminosa describiendo una trayectoria en forma de línea recta (rayo de luz) hasta impactar sobre una superficie en la que dependiendo de las propiedades físicas que se le asignen, pueden modificar su dirección por efecto de reflexión o de refracción. En el caso de que la fuente de luz cubra una superficie, se asignan varios rayos de luz distribuidos de tal forma que permitan cubrir dicha superficie de manera uniforme. Se debe definir la densidad de flujo luminoso (que puede ser expresada en W/m^2) que irradia la fuente para que al interactuar con una superficie de área conocida, se pueda calcular la potencia que recibe esa superficie. A cada rayo de luz que incide sobre la superficie se le asigna una cantidad de energía que puede ir disminuyendo en cada interacción con las diversas superficies en las que impacta, debido a los índices de reflexión o de transmitancia asignados a las superficies o materiales con los que interactúa.

Una forma de calcular la irradiancia solar concentrada es la simulación de trazado de rayos, el cual se puede llevar a cabo mediante dos métodos:

- El método de Monte Carlo, basado en rayos al azar (método estadístico).
- El método de Convulación, basado en la convolución de distribuciones.

El método de Monte Carlo usa rayos al azar que vienen de una superficie, y luego determina cuáles de ellos llegan a una segunda superficie. La irradiancia sobre una superficie elemental es proporcional al número de impactos de rayos. En el caso de un concentrador con

una reflexión, este algoritmo es usado dos veces, primero entre el Sol y la superficie reflectiva con una distribución energética correspondiente de la forma del sol, después entre la faceta del heliostato y el receptor con las leyes estadísticas del error de distribución relacionado con los defectos de las facetas. La precisión y el tiempo de cálculo aumentan con el número de rayos y la complejidad de la geometría. En el método de convolución (o cono óptico), los rayos reflejados de los espejos elementales son considerados con un cono de error calculado por la convolución de la distribución normal Gaussiana correspondiente a cada error (forma del Sol y los errores del heliostato). Una comparación sistemática muestra que se obtienen resultados muy similares con ambos métodos de trazo de rayos, aunque el Método de Monte Carlo es más versátil.

3.3. SolTrace

SolTrace es un software que utiliza el trazado de rayos por el método de Monte Carlo, desarrollado por el NREL, que puede usarse para analizar y diseñar sistemas ópticos de potencia de energía solar. El cual puede ser adaptado a las principales tecnologías de conversión de energía térmica solar a electricidad y también a hornos solares. El sistema óptico está organizado en etapas en un sistema de coordenadas globales: las etapas son secciones de la geometría óptica que exitosamente es golpeada por los rayos en su trayectoria del sol al receptor final. Las etapas pueden ser ópticas (interacción física con los rayos) o virtuales (usadas para determinar la posición de los rayos o el mapa de flujo en cualquier parte del sistema sin interacción con él). Estas etapas están compuestas de elementos con su propia apertura, forma, y propiedades ópticas (errores ópticos, error de specularidad, reflectividad, transmitividad, y refracción). Cada elemento está descrito en un sistema coordinado asociado con su etapa. A diferencia de las otras herramientas, atenuación atmosférica y errores de seguimiento no se incluyen directamente pero pueden ser tomadas en cuenta, respectivamente, en la reflectividad del espejo o en su error de pendiente. Los resultados pueden ser mostrados y guardados como gráficas, mapas de flujo y gráficas de desempeño, además de tener una interface amigable con el usuario.

3.3.1. Forma Solar

En el apartado de la forma solar (sun shape) podemos indicar la dirección del vector solar mediante coordenadas globales, que identificaremos como \hat{s} , o al ingresar los parámetros de latitud, día y hora.

En este caso se definieron las coordenadas globales para la dirección del sol, en la Tabla 3.1. Una vez que se ha indicado la dirección del vector solar, se indica la forma solar. La forma solar es la distribución de intensidad de los rayos solares que llegan a la superficie de la Tierra como función de su ángulo con respecto al centro del disco solar. Esta forma no es constante en el tiempo y tampoco es independiente de la localización geográfica, ya que se ve afectada por las condiciones climáticas. Existen diferentes formas solares: el sol uniforme

Tabla 3.1: Coordenadas globales de la dirección del Sol.

X	Y	Z
100.00	0.00	0.00

(pillbox), el sol Gaussiano, y el sol real. Fue definido el sol real en 22 puntos y en la Tabla 3.2 se observa.

3.3.2. Propiedades ópticas.

En un concentrador solar, varios factores estadísticos independientes contribuyen al error óptico: errores de pendiente, ausencia de la especularidad ideal, errores de seguimiento, deformaciones y desplazamientos del receptor. Se considera generalmente que los errores pueden ser representados adecuadamente por distribuciones de probabilidad Gaussiana.

Las propiedades ópticas dependen del material del concentrador y del receptor que se utilizan en la simulación (Tabla 3.3).

3.3.3. Etapas del trazado de rayos.

En esta sección se definen las características de nuestro concentrador y del receptor. En la sección de etapas podemos distinguir tres apartados. El primero de ellos es Stage Properties donde se le asigna el nombre a la etapa y en donde se seleccionan las propiedades de la etapa por ejemplo: la etapa Multiple hits per ray que nos indica que en esa etapa el rayo puede incidir varias veces; la opción Virtual stage es utilizada cuando se desea saber que está ocurriendo en un intervalo ente el concentrador y el receptor pero sin afectar la trayectoria de los rayos. En las simulaciones realizadas no seleccionaron estas propiedades para ninguna de las dos etapas de la simulación (el concentrador y el receptor). En la sección de Element Editing se definieron los elementos que están interactuando en el trazado de rayos, concentrador o receptor. En el caso del concentrador se insertaron 410 elementos y el receptor solo uno.

Una vez agregados los elementos deseados se modifican las propiedades de cada uno de ellos. Indicando su posición (x, y, z), su Aimpoint, la apertura, el tipo de superficie, la interacción del elemento y sus propiedades ópticas (Ver Anexo 1).

3.3.4. Trazado de rayos.

Una vez que definidos las diferentes secciones de los elementos se procede a realizar la simulación de trazado de rayos, para lo cual se indica el número de rayos para la interacción, hay que recordar que SolTrace utiliza el método de Monte Carlo, y dado que se trata de un método estadístico, entre más rayos se utilicen el resultado obtenido será más preciso. Primeramente se selecciona un número de rayos pequeño: un millón de rayos y para corregir los posibles errores, se toman tres millones de rayos para obtener resultados más precisos.

Tabla 3.2: Valores de los puntos de lo forma del sol real.

No. de Puntos	Ángulo (mrad)	Intensidad
1	0	1
2	0.352	1
3	0.704	0.998707
4	1.056	0.990351
5	1.408	0.978166
6	1.76	0.962598
7	2.112	0.945638
8	2.464	0.927385
9	2.816	0.902268
10	3.168	0.864568
11	3.52	0.805829
12	3.872	0.679001
13	4.224	0.439774
14	4.57	0.0415234
15	4.928	0.00885109
16	5.28	0.00107829
17	5.632	0.000757187
18	5.984	0.000563016
19	6.336	0.000433801
20	6.688	0.0000377201
21	7.04	0.000340446
22	7.216	0

Tabla 3.3: Propiedades ópticas del material del concentrador y el receptor.

Propiedades ópticas	Concentrador	Receptor
Reflectancia	0.6300	0.7500
Transmitancia	1.0000	0.9000
Error de pendiente	0.0001	0.0001
Error especular	2.2000	0.0001
Tipo de error	Gaussian	Gaussian

3.4. Dinámica de fluidos computacional.

La Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) es el conjunto de conocimientos y herramientas mediante los cuales se resuelven los modelos matemáticos que gobiernan los fenómenos de la fluidodinámica utilizando software informático. De esta manera, se puede predecir y manipular la fluidodinámica de cualquier equipo de proceso industrial. Sin embargo, incluso utilizando ecuaciones simplificadas y ordenadores de altas prestaciones sólo se consiguen soluciones aproximadas.

La Dinámica de Fluidos Computacional es ahora una herramienta de diseño industrial establecida, que presenta una serie de ventajas como, por ejemplo: ayuda a reducir las escalas de tiempo de diseño y gastos con nuevos proyectos, además, mejora los procesos en todo el mundo de la ingeniería, permitiendo estudiar sistemas donde es difícil o imposible medir el valor de algunos parámetros.

Hay una serie de métodos de solución diferentes que se utilizan en los códigos CFD. El más común, y en el que se basa ANSYS CFX, se conoce como Método de Volumen Finito (MVF). En este método, la región de interés se divide en pequeñas subregiones, llamadas volúmenes de control. Las ecuaciones se discretizan y se resuelven de forma iterativa para cada volumen de control. Como resultado, se puede obtener una aproximación del valor de cada variable en puntos específicos a lo largo del dominio. De esta manera, uno obtiene una imagen completa del comportamiento del flujo.

Modelo Computacional basado en códigos CFD.

En este trabajo se utiliza el software ANSYS CFX 19, el cual es un programa comercial de CFD. Este software integrado en la plataforma Workbench de ANSYS 19 permite el uso de sistemas CAD, ya sea el que viene por defecto en el programa o importando otras geometrías de programas más avanzados que utilicen el sistema CAD.

- Creación de la Geometría (ANSYS Space-Claim): Desarrollo del modelo geométrico del problema a estudiar y se definen las regiones de fluido y las regiones sólidas.
 - Mallado (ANSYS Meshing): Discretización espacial del dominio mediante el método de volúmenes finitos. La malla constituye una aproximación discreta del problema analítico sobre la base de puntos o nodos, los cuales se conectan para formar elementos finitos.
 - Pre-procesamiento (CFX-Pre): Se definen los modelos físicos que se van a implementar como parte del modelo computacional, tales como: modelos físicos incluidos en la modelación, tipo de flujo, propiedades del fluido, materiales a emplear, condiciones iniciales, condiciones de contorno y parámetros de solución.
 - Procesamiento (CFX-Solver): Son definidos los métodos para solucionar las ecuaciones del modelo, criterios de convergencia, variables de salida, etc.
-

- Post-procesamiento (CFX-Post): Es el componente que se utiliza para analizar, visualizar y presentar los resultados de manera interactiva. Se puede observar toda la geometría que fue previamente creada, así como analizar variables como: presión, velocidad, temperatura, etc., ya sea mediante gráficos, planos o volúmenes.

3.5. Modelos Físico- Matemáticos.

3.5.1. Flujos en Estado Estacionario y en Estado Transitorio.

La dependencia del tiempo de las características del flujo puede ser especificada como estado estacionario o transitorio. Las simulaciones de estado estacionario son aquellas en las cuales las características no cambian con el tiempo y cuyas condiciones estacionarias son asumidas a ser alcanzadas después de un intervalo de tiempo relativamente largo. No requieren información de tiempo real para describir el comportamiento.

Sin embargo, las simulaciones transitorias requieren información de tiempo real para determinar los intervalos de tiempo, en los cuales CFX-Solver calcula el campo de flujo. El comportamiento transitorio puede ser causado por condiciones iniciales de frontera cargadas del flujo, o este puede estar relacionado inherentemente a las características del flujo, entonces una condición de estado estacionario nunca es alcanzada, incluso cuando todos los otros aspectos de las condiciones del flujo son estáticas.

3.5.2. Modelo de Turbulencia: Laminar.

El flujo laminar se rige por las inestables ecuaciones de Navier-Stokes. La opción laminar no aplica un modelo de turbulencia a la simulación y solo es apropiada si el flujo es laminar. Esto normalmente se aplica a flujos de números de Reynolds bajos (por ejemplo, para el flujo de tubería, el régimen de flujo laminar es $Re < 1000$). La transferencia de energía en el fluido se realiza por interacción molecular (difusión). En el caso de flujos de alta velocidad, el trabajo de las tensiones viscosas también puede contribuir a la transferencia de energía.

3.5.3. Modelo de Transferencia de Calor: "Thermal Energy".

Un modelo de transferencia de calor se utiliza para predecir la temperatura a lo largo del flujo. Se incluye la transferencia de calor por conducción, convección y (en su caso) la mezcla turbulenta y el trabajo viscoso. Las opciones para la transferencia de calor disponible en CFX son: Ninguna, Isotérmica, Energía Térmica, Energía Total o Flujo Turbulento Encerrado.

El modelo de Energía Térmica modela el transporte de entalpía a través del dominio fluido. Se diferencia del modelo de Energía Total en que los efectos de la energía cinética de flujo medio no están incluidos. En consecuencia, reproduce los mismos resultados que el modelo de la Energía Total cuando los efectos de la energía cinética desaparecen, y por lo tanto es adecuado para flujos de baja velocidad donde los efectos cinéticos son insignificantes.

La ecuación de Energía Térmica es:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla U + S_E \quad (3.1)$$

La ecuación de energía térmica, a pesar de ser una simplificación, puede ser útil tanto para líquidos como para gases para evitar posibles problemas de estabilidad con la formulación de energía total. Por ejemplo, la ecuación de energía térmica a menudo se prefiere para simulaciones de líquidos transitorios.

3.5.4. Flotabilidad.

Los flujos de convección natural y mixta y los flujos en los que la gravedad es importante pueden ser modelados por CFX mediante la inclusión de términos de fuente de flotabilidad. La convección natural se refiere al caso en el que la convección del fluido es impulsada solo por variaciones de densidad local, por ejemplo, en una caja cerrada con una fuente de calor. La convección mixta se refiere al caso donde la convección del fluido es impulsada por un gradiente de presión y fuerzas de flotabilidad.

La flotabilidad es impulsada por variaciones en la densidad que pueden surgir de varias fuentes:

- Las variaciones locales de temperatura causan cambios en la densidad; Esto es convección natural.
- En los flujos multicomponentes, las variaciones en la fracción de masa causan variaciones de densidad porque cada componente generalmente tiene una densidad diferente.
- En los flujos multifásicos, incluyendo el modelado de transporte de partículas, la diferencia en densidad entre las fases da como resultado una fuerza de flotación.
- Si la densidad es variable para un fluido general (es decir, definido por una expresión), surgirá una fuerza de flotación.
- Para gases ideales y fluidos reales, las variaciones de presión locales también causan cambios en la densidad. Estos cambios son a menudo pequeños y el efecto de flotabilidad generalmente no es importante en el flujo. La flotabilidad no necesariamente tiene que ser modelada si no hay otras fuentes de flotabilidad.

La importancia relativa de las fuerzas de flotabilidad debidas a las variaciones de temperatura en un flujo de convección mixta se puede estimar utilizando la relación de Grashof y el número de Reynolds.

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta L\Delta T}{U^2} \quad (3.2)$$

Donde β es el coeficiente de expansión térmica. Un valor que se aproxima o excede la unidad indica que los efectos de flotabilidad son significativos en el flujo, mientras que los valores pequeños indican que los efectos de flotabilidad pueden ignorarse.

En problemas de convección puramente naturales, el número de Raleigh (Ra) indica la fuerza relativa del flujo inducido por la flotabilidad y viene dado por:

$$Ra = GrPr \quad (3.3)$$

Donde Pr es el número de Prandtl. El régimen de flujo laminar se caracteriza generalmente por $Ra < 10^8$, mientras que el flujo turbulento se caracteriza por $Ra > 10^{10}$. Para los cálculos que involucran flotabilidad, se deben establecer los componentes del vector de gravedad en x, y, z.

Los efectos de flotabilidad se pueden simular utilizando uno de los dos modelos disponibles en CFX:

- Modelo de flotabilidad completa (diferencia de densidad).
- Modelo Boussinesq.

Modelo de flotabilidad completa (diferencia de densidad).

Para flujos monofásicos, este modelo se usa cuando la densidad del fluido es una función de la temperatura o la presión (que incluye todos los gases ideales y los fluidos reales) y cuando se usa un fluido multicomponente. Para el seguimiento multifase o de partículas de Eulerian, también se establece incluso si todas las fases tienen una densidad constante. Variaciones de densidad significativas con la temperatura ocurren para la mayoría de los gases. Se debe especificar una densidad de referencia de flotabilidad como un valor promedio aproximado de la densidad de dominio esperada.

Modelo Boussinesq

Para muchas aplicaciones que involucran flotabilidad, es suficiente asumir una densidad constante del fluido cuando el cambio en la densidad en el rango esperado de condiciones es relativamente pequeño. Esto es a menudo cierto para muchos líquidos. Cuando la densidad del fluido no es una función de la presión o la temperatura, se emplea el modelo Boussinesq.

El modelo de Boussinesq utiliza un modelo de fluido de densidad constante, pero aplica una fuerza de cuerpo gravitacional local en todo el fluido que es una función lineal de la expansividad térmica del fluido, y la diferencia de temperatura local con referencia a un dato llamado "Temperatura de referencia de la flotabilidad". Se debe especificar la temperatura de referencia como un valor promedio aproximado de la temperatura de dominio esperada.

El modelo Boussinesq se puede utilizar para los siguientes casos:

- Simulaciones monofásicas, de un solo componente con transferencia de calor, utilizando un fluido general de densidad constante. Este es el uso predeterminado del modelo Boussinesq.

- Fluidos de densidad constante en un flujo multifase de Eulerian o de seguimiento de partículas con transferencia de calor junto con el modelo completo de flotabilidad .

3.6. Geometría.

El reactor está formado por un cilindro, dos bridas en la parte superior e inferior del cilindro y una tapa. Las dimensiones de la sección transversal se muestran en la Figura 3.1. Dado que el espesor del cilindro es muy grande, se tienen pérdidas considerables por transferencia de calor, por lo que es importante una simulación en 3-D del problema.

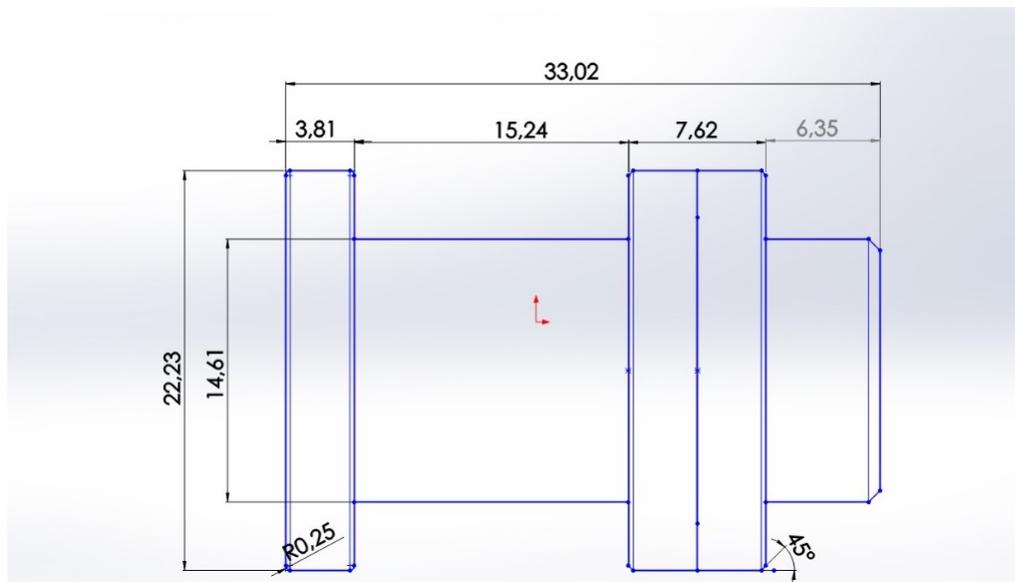


Figura 3.1: Dimensiones en cm de la sección transversal del reactor.

El reactor se calienta mediante un flujo promedio que es obtenido a partir de la simulación del sistema de concentración con SolTrace. El espacio dentro del reactor está lleno con un volumen de 0.603 L de agua a condiciones ambientales.

La geometría del modelo desarrollado se realizó mediante el diseño de ANSYS SpaceClaim y luego dicha geometría fue importada al Design Modeler dentro de la plataforma de ANSYS 19.0 para definir las partes sólidas y la fluida. La geometría obtenida se muestran en la Figura 3.2.

3.7. Mallado.

Después de la generación de la geometría, debido a que no es posible obtener la solución numérica sobre un dominio continuo, el dominio es discretizado, es decir dividido en pequeños elementos o en volúmenes de control. Al conjunto de puntos discretos se le da el nombre de

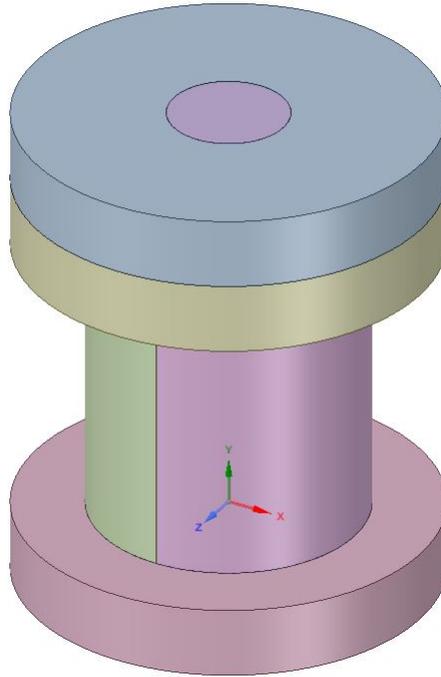


Figura 3.2: Geometría simplificada del reactor para HTL creada en ANSYS Space- Claim.

mallado. Entre otros factores, la precisión de una solución de CFD está fuertemente influenciada por la cantidad y la forma de las células usadas en la discretización del dominio. Cuanto mayor sea el número de puntos discretos, como regla general, más fiel al modelo será el resultado numérico obtenido. En contrapartida, el costo computacional para hallar la solución del problema planteado será mayor.

Dependiendo de la geometría del dominio computacional, la malla puede estar constituida por elementos hexaédricos, tetraédricos o poliédricos y prismáticos. En cuanto a la estructura de la malla, puede ser tratada como estructurada o no estructurada, esto se refiere a la distribución regular o no de los elementos a lo largo del volumen discretizado. Aunque no hay diferencias de precisión entre mallas no estructuradas y estructuradas, estas últimas demandan un costo computacional menor.

La geometría desarrollada se importa en ANSYS Meshing donde se genera la malla. En esta parte de la simulación se especifican todas las características de la malla, ya sea mediante métodos o controles de malla globales y locales (tipo, dimensión mínima de las aristas y otros parámetros existentes a definir en el programa). En este trabajo se utilizan mecanismos de refinamiento globales y locales de malla, la Figura 3.3 muestra algunos detalles de la malla generada para el modelo desarrollado.

La Tabla 3.4 recoge las características fundamentales de la malla de la parte sólida y la fluida, así como una evaluación de la calidad de las mismas.

La Calidad Ortogonal es una de las principales métricas de la calidad de la malla, se

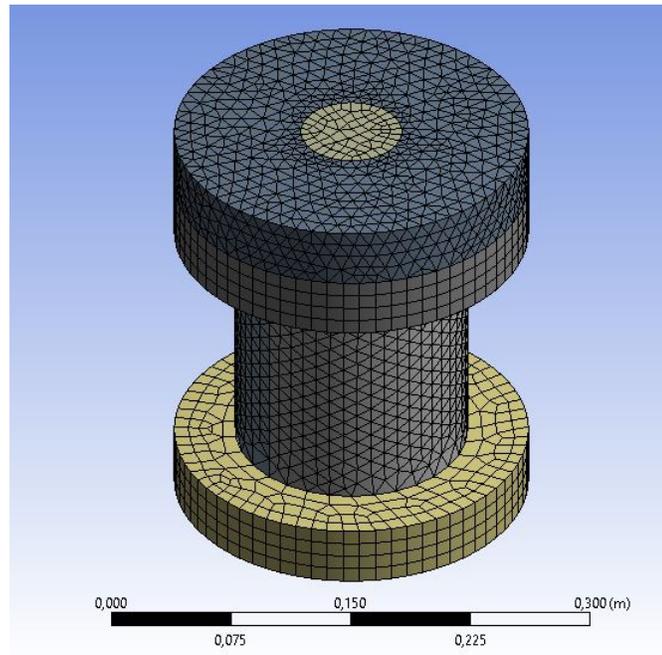


Figura 3.3: Mallado de la geometría generado con ANSYS Mashing.

Tabla 3.4: Métrica del mallado del reactor.

Dominio	Nodos	Elementos
Acero	12067	48317
Agua	1722	7868
Todos los dominios	13789	56185

encuentra en un rango entre 0 y 1, donde los valores próximos a cero son de baja calidad y los próximos a uno de máxima calidad. La Calidad Ortogonal para celdas es calculada usando el vector normal a la cara, el vector desde el centroide de la celda al centroide de cada celda adyacente, y el vector desde el centroide de la celda a cada una de las caras. Los valores de calidad ortogonal obtenidos del mallado son los siguientes: El valor máximo es 0.99943, el valor mínimo es 0.13548; y el valor promedio es 0.74851. El valor promedio obtenido, permite concluir que el mallado es bueno.

3.8. Condiciones de frontera.

Para simular el modelo del proceso de HTL integrado con la concentración solar, se tiene en cuenta que la transferencia de calor en el calor, ocurrirá producto a la conducción y a la convección natural ocurrida en el exterior del reactor debido al fluido que lo rodea, aire.

Para comenzar, se deben proporcionar al modelo condiciones de contorno específicas, el flujo de calor a través de la pared, coeficiente de transferencia de calor por convección y la

temperatura y presión de referencia del agua.

Para las simulaciones se crearon dos Dominios, el del agua y del acero, donde se definen las partes del reactor que lo conforman y las características de cada uno.

Tabla 3.5: Dominio Agua.

Tipo	Fluido
Material	Water
Modelo de flotabilidad	Flotabilidad Completa
Densidad de referencia de flotabilidad	998 kg/m^3
Componente X de la gravedad	0.0 m/s^2
Componente Y de la gravedad	-9.8 m/s^2
Componente Z de la gravedad	0.0 m/s^2
Movimiento del Dominio	Estacionario
Presión de referencia	100 bar
Modelo de Transferencia de Calor	Energía Térmica
Modelo de Turbulencia	Laminar

Tabla 3.6: Dominio Acero.

Tipo	Sólido
Localización	brida arriba, brida abajo, sec1, sec2, tapa
Movimiento del Dominio	Estacionario

Luego definidos los dominios, son definidas las condiciones de frontera. Fueron creadas tres condiciones de frontera: Cilindro Sección 1, Cilindro Sección 2 y Partes del Reactor, este último compuesto la brida de arriba, la brida de abajo y la tapa. Las condiciones de fronteras y las partes del reactor se muestran en la Figura 3.4.

Tabla 3.7: Condición de Frontera, Cilindro Sección 1.

Tipo	Pared
Transferencia de Calor	Flujo de Calor
Flujo de Calor	32 000 W/m^2

El valor de flujo de calor es el 20% del flujo promedio obtenido en las simulaciones en SolTrace, el receptor ubicado a 3.755 m del concentrador. El porcentaje es simulando la apertura del atenuador, ya que este se utiliza para poder controlar la cantidad de radiación que pasa a través del mismo y consecuentemente la temperatura que se alcanza en el receptor.

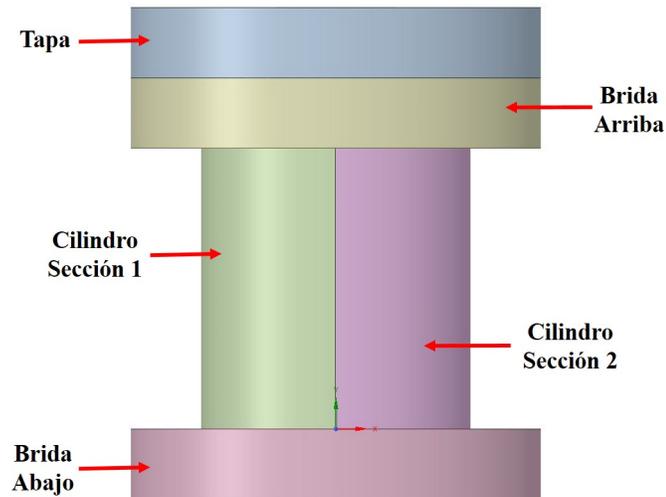


Figura 3.4: Partes del reactor para HTL. Condiciones de frontera.

Tabla 3.8: Condición de Frontera, Cilindro Sección 2.

Tipo	Pared
Transferencia de Calor	Coefficiente de Transferencia de Calor
Coefficiente de Transferencia de Calor	$12 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Temperatura exterior	300 K

Tabla 3.9: Condición de Frontera, Partes del Reactor.

Tipo	Pared
Partes	Brida arriba, Brida abajo, Tapa
Transferencia de Calor	Adiabática

Luego de definidos los Dominios y las Condiciones de Frontera, se realiza una simulación previa en estado estacionario. Los resultados obtenidos se utilizan como entrada para las simulaciones en estado transitorio.

3.9. Materiales

Debido al flujo de calor sustancialmente alto, se espera que el gradiente de temperatura dentro de la zona calentada exceda los $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Por lo tanto, el modelo Boussinesq se considera no aplicable. La densidad del agua se aproxima mediante un polinomio de segundo orden.

Todas las demás propiedades se evalúan a temperatura media. Se supone que el agua permanece en fase líquida bajo la condición de licuefacción. Por lo tanto, el fluido se trata como una sola fase, dominio homogéneo y no se considera ningún cambio de fase o formación de burbujas.

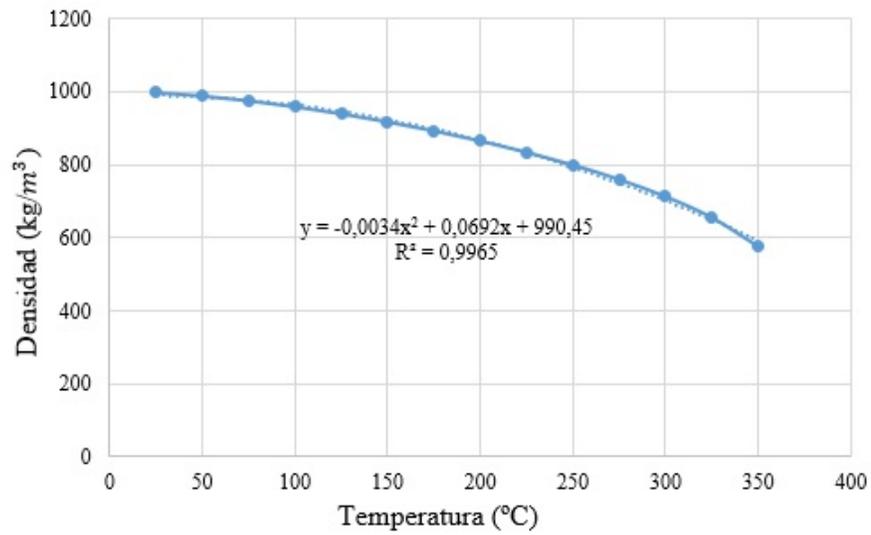


Figura 3.5: Densidad del agua en función de la temperatura.

La propiedad del acero inoxidable está determinada por el valor predeterminado en la base de datos de ANSYS CFX.

Resultados y Discusión

4.1. Introducción.

En el capítulo se muestran los resultados de la simulación óptica del sistema del horno solar y el reactor para HTL y el estudio de transferencia de calor, utilizando Ansys Fluent, del reactor para HTL en estado estacionario y en transitorio. Se realizaron las simulaciones ópticas del receptor con una irradiancia de 1000 W/m^2 y un total de rayos de 3000000. Dichas simulaciones se realizaron a diferentes distancias del receptor para observar el comportamiento de la distribución de flujo. Para conocer el comportamiento de la transferencia de calor, se realiza una simulación en Ansys Fluent 19.0 del reactor para HTL, donde en el interior del mismo se encuentran 0.6 L de agua y en el exterior del mismo incide un flujo de calor obtenido de la simulación de SolTrace, producto a la radiación solar y ocurre la transferencia de calor por convección.

4.2. Simulaciones en SolTrace.

Luego de definido el sistema y realizar la simulación, se obtienen, donde se pueden visualizar los distintos elementos simulados, en donde solo observaremos la interacción de los rayos con la superficie y se imprimen la trayectoria de 100 rayos, ya que dicha cantidad es suficiente para observar la dirección de los rayos. En la Figura 4.1 se observa el trazado de rayos cuando el receptor se encuentra ubicado en el foco del concentrador, la cual es de 3.68 m.

En la figura los rayos que salen del extremo del concentrador atraviesan la superficie lo cual conlleva a que el resultado obtenido en la simulación y la distribución de flujo deseada no son realmente ciertos. Para solucionar dicho problema se construyó el receptor lo suficientemente grande para que dichos rayos no atravesaran la superficie y obtener los resultados deseados.

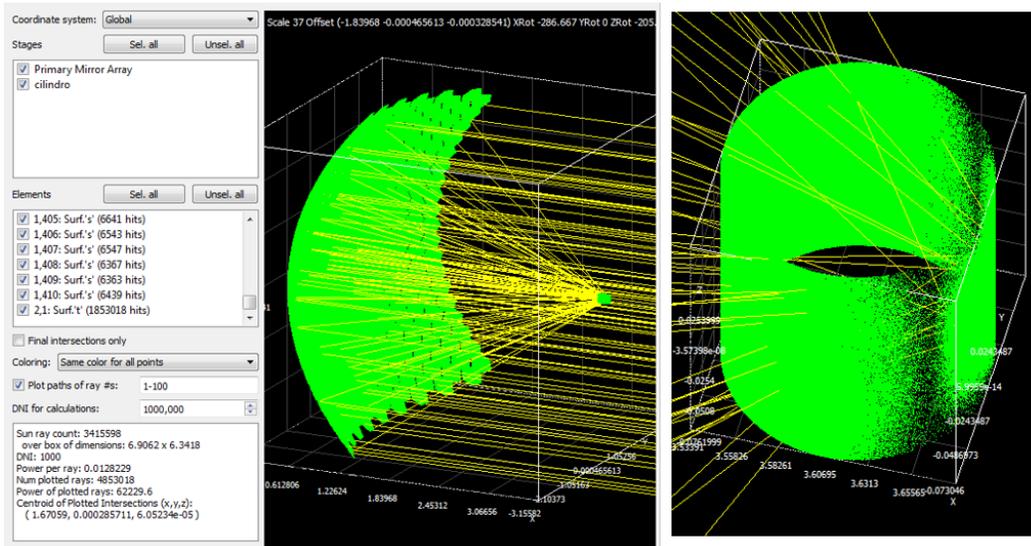


Figura 4.1: Trazado de rayos. Receptor en el foco.

4.2.1. Receptor ubicado en el foco

En las siguientes figuras se observa el trazado de rayos y la distribución de flujo en el receptor a diferentes distancias del concentrador con las nuevas dimensiones del receptor.

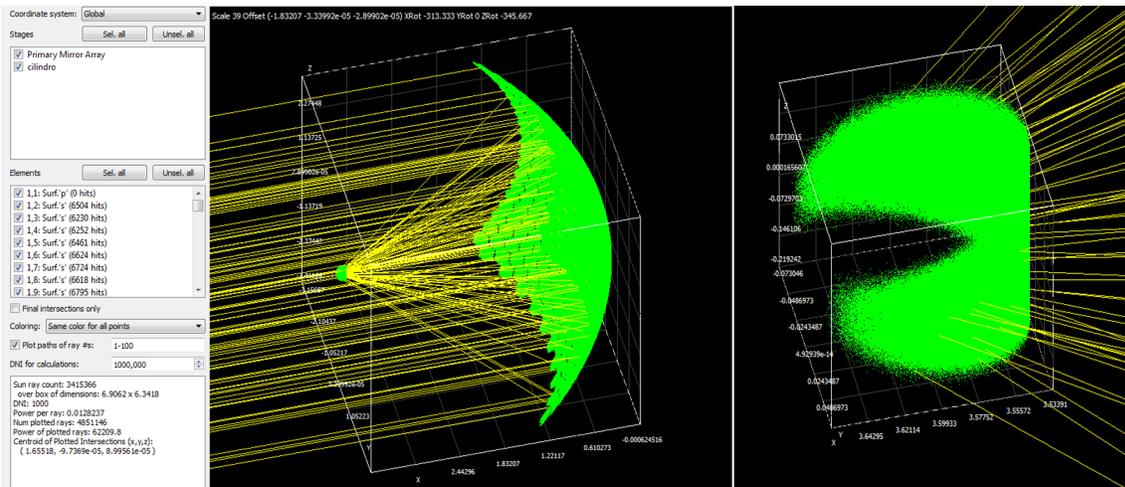


Figura 4.2: Trazado de rayos de la nueva configuración del sistema. Receptor ubicado en el foco.

En las Figuras 4.2 y 4.3 se observa el trazado de rayos y la distribución de flujo que incide sobre el receptor. Al hacer el receptor lo suficientemente largo se soluciona el problema que surgió en la simulación anterior y los valores de flujo son verdaderos.

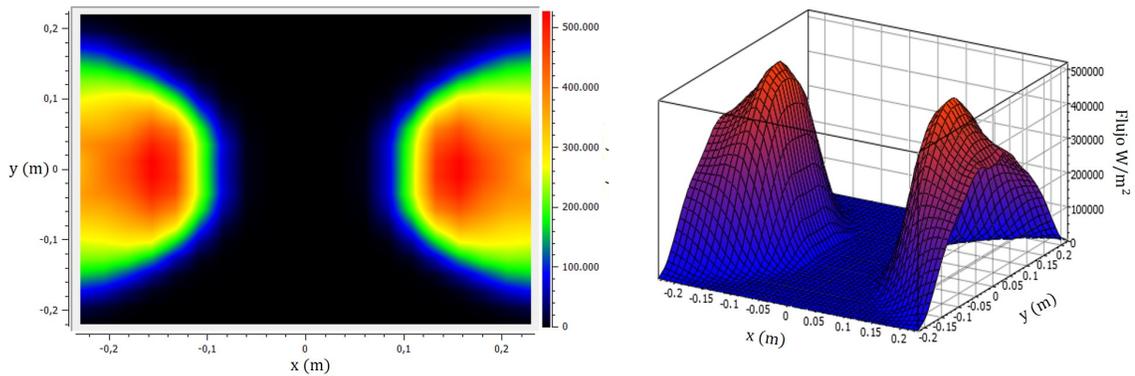


Figura 4.3: Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor en el foco.

4.2.2. Receptor acercándose al concentrador en saltos de 2.5 cm.

Se realizaron simulaciones del receptor acercándose al concentrador en saltos de 2.5 cm del foco hacia el concentrador, hasta llegar a una distancia de 10 cm más cerca del concentrador. Para cada uno de dichos saltos, se obtuvo el trazado de rayos y la distribución de flujo, estos resultados permitirán determinar la posición con respecto al concentrador del receptor, para alcanzar los valores de flujos radiativos deseados para que ocurra el proceso de HTL en el reactor.

- Receptor ubicado a 3.655 m del concentrador.

El receptor se ubica a una distancia del concentrador de 3.655 m. A esta distancia del concentrador, los rayos que salen de los extremos del mismo no inciden sobre el receptor, por lo que en la Figura 4.4 se observan algunos rayos en color rojo, indicando lo anteriormente explicado.

En la Figura 4.5 de contorno y superficie de la distribución de flujo, su comportamiento es el mismo que el de la figura anterior, lo que en este sentido el flujo máximo que capta el receptor disminuye, producto a que la cantidad de rayos que incide en el receptor también disminuye.

- Receptor ubicado a 3.58 m del concentrador.

Se realizaron simulaciones para el receptor a una distancia del concentrador de 3.63 m, 3.605 m y 3.58 m. A partir de dichas simulaciones se observó que a medida que el receptor se acerca al concentrador la cantidad de rayos que inciden en el mismo disminuye y por lo tanto el pico máximo de flujo también disminuye. Los resultados de dichas simulaciones se observan en Anexo 2.

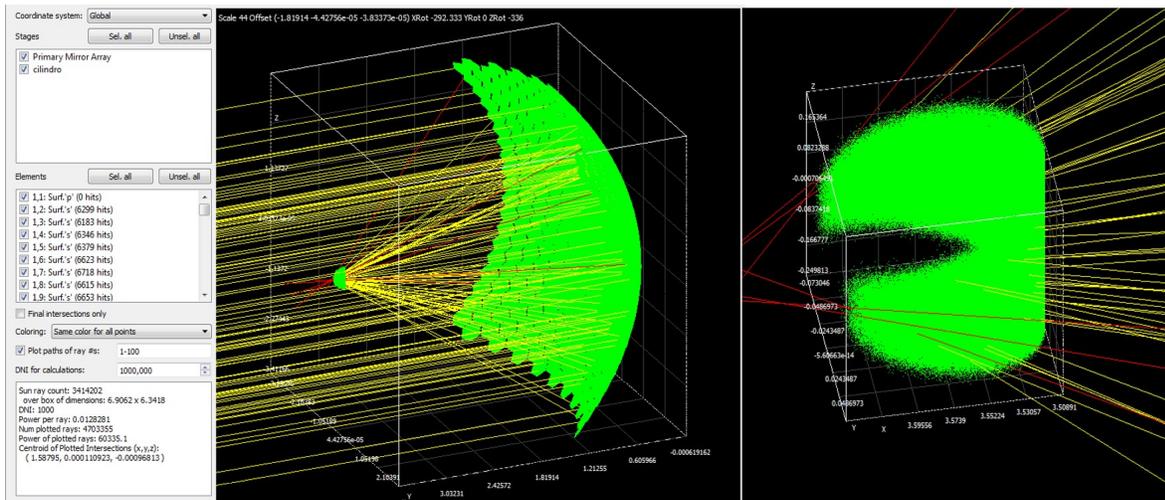


Figura 4.4: Trazado de rayos. Receptor a 3.655 m del concentrador.

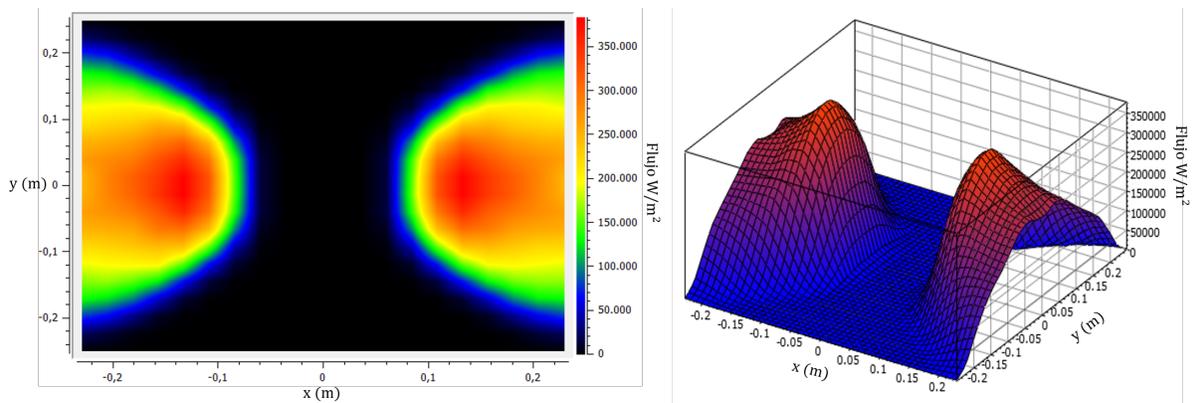


Figura 4.5: Gráfico de contorno y superficie de la distribución de flujo. Receptor a 3.655m del concentrador.

4.2.3. Receptor alejándose del concentrador en saltos de 2.5 cm.

Para determinar la mejor configuración para la ubicación del receptor, no solo se simuló el receptor acercándose al concentrador, sino que también fue de interés realizar simulaciones del receptor alejándose del mismo. Dichas simulaciones como para el caso en que el receptor se acercaba al concentrador, se realizaron en saltos de 2.5 cm hasta que el receptor se encontrara a 10 cm del foco alejándose del concentrador.

- Receptor ubicado a 3.705 m del concentrador.

En estas simulaciones se analiza el comportamiento de la distribución de rayos y la distribución de flujo cuando el receptor se ubica alejándose del concentrador a una distancia de 3.705 m.

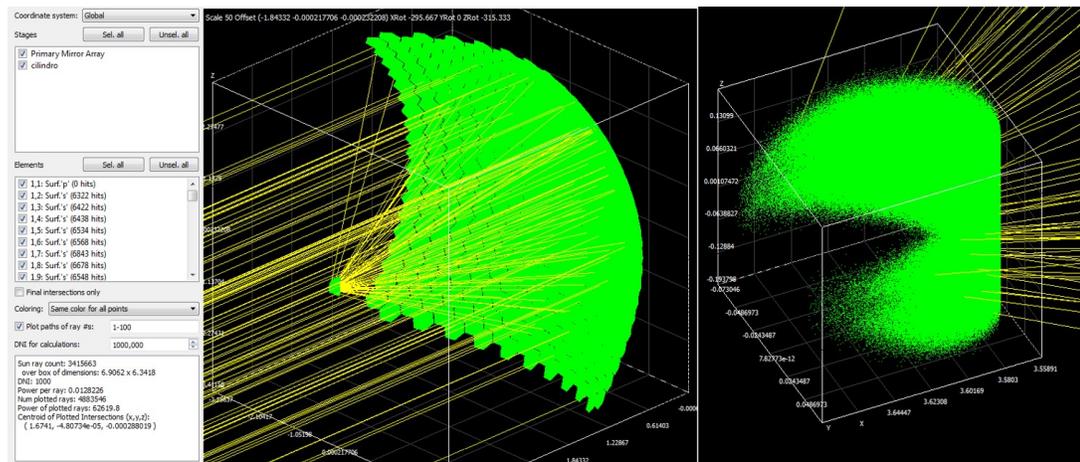


Figura 4.6: Trazado de rayos. Receptor a 3.705 m del concentrador.

En la Figura 4.6, se observa como los rayos de los extremos le pegan el receptor, pero como se encuentra más alejado del concentrador, la parte más alejada no se irradia, solo la que se encuentra más cerca. A su vez la intensidad del flujo es mayor, como se observa en la Figura 4.7.

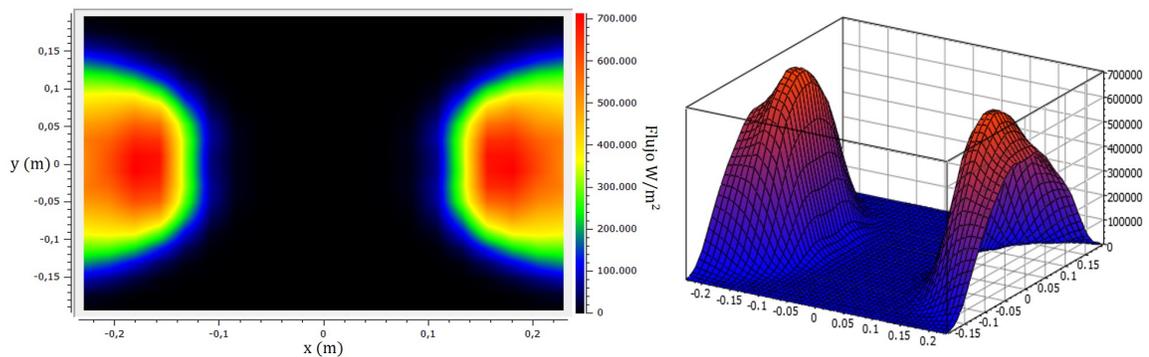


Figura 4.7: Gráfico de contorno y superficie de la distribución de flujo. Receptor a 3.705 m del concentrador.

- Receptor ubicado a 3.755 m del concentrador.

Se siguió desplazando el receptor alejándose del receptor a diferentes distancias del mismo: 3.73 m, 3.755 m y 3.78 m. Los resultados de las simulaciones a 3,73 m y 3.78 m se observan en los Anexos 3 y 4.

Los resultados demuestran que a medida que el receptor se aleja del concentrador la intensidad de flujo máximo aumenta, ya que el área que se irradia disminuye. En las siguientes figuras se observan los resultados del trazado de rayos y la distribución de flujo a 3.755 m del concentrador.

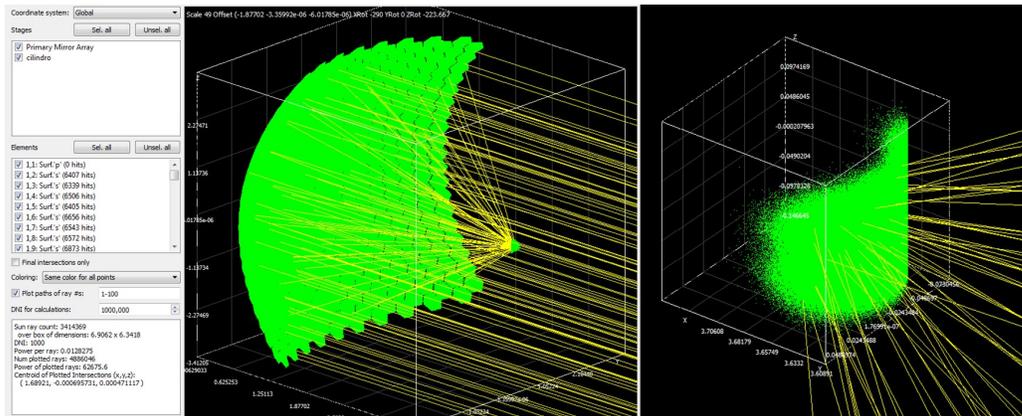


Figura 4.8: Trazado de rayos. Receptor a 3.755 m del concentrador.

Los rayos solo le pegan a la mitad del receptor, en la parte que se encuentra más cerca del concentrador. La distribución de flujo es utilizada en las simulaciones de transferencia de calor, ya que esta configuración es la más parecida al modelo implementando en ANSYS. Todos los rayos interceptan al receptor, por lo que la cantidad de energía absorbida es mayor que en las simulaciones cuando el receptor se aleja del concentrador.

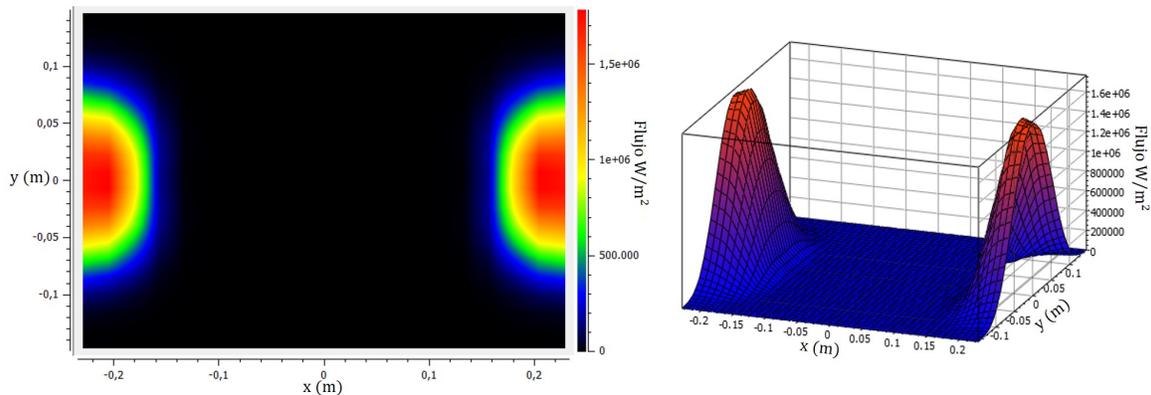


Figura 4.9: Gráfico de contorno y superficie de la distribución de flujo. Receptor a 3.755 m.

4.2.4. Flujo de radiación promedio.

A partir de las simulaciones realizadas, para cada distancia del receptor con respecto al concentrador, se determinó el flujo promedio, a partir de la cantidad de rayos captados por el receptor y la energía por rayo, dichos resultados los da el software. En la siguiente tabla se muestra el valor del flujo promedio para cada posición del receptor.

El flujo promedio es la razón de la energía captada por el receptor y al área del receptor. La energía captada es el producto del total de rayos que son captados en el receptor y la

Tabla 4.1: Flujo promedio captado por el receptor.

Distancia al concentrador	Rayos totales	Rayos captados	Energía por rayo (W)	Flujo promedio (W/m^2)
3.58	3000000	949560	0.0128249	80649.1
3.605	3000000	1139184	0.0128186	96706.9
3.63	3000000	1416003	0.0128197	120216.8
3.655	3000000	1703642	0.0128252	144699.0
3.68	3000000	1852065	0.0128247	157299.2
3.705	3000000	1882935	0.012827	159949.7
3.73	3000000	1885206	0.012824	160105.2
3.755	3000000	1884854	0.0128166	159982.9
3.78	3000000	1885133	0.0128234	160091.5

energía por rayo.

El flujo promedio obtenido, indica la cantidad de flujo que capta todo el receptor, producto a la transferencia de calor, aunque hay puntos más calientes, debido a la cantidad de rayos que son recibidos por unidad de área.

4.3. Simulaciones ANSYS.

En esta sección se muestran los resultados del estudio de transferencia de calor, utilizando CFD, del reactor y el agua contenida dentro del mismo en estado estacionario, y para un transitorio con una presión y temperatura de referencia del agua de 100 bar y 300 K respectivamente.

4.3.1. Resultados del cálculo del Estado Estacionario.

Se obtuvieron los perfiles de temperatura, presión y velocidad del reactor y el agua contenida en él en Estado Estacionario. En las Figuras se observan dichos resultados.

En las Figuras 4.10 y 4.11 se puede apreciar las temperaturas alcanzadas tanto en el reactor como en el agua a partir de la distribución de flujo radiativo, donde los valores máximo de temperatura que se alcanzan en el reactor es de 333 °C y 313 °C en el agua, poniendo de manifiesto la ocurrencia de la transferencia de calor del reactor al agua y obteniendo valores de temperatura para los cuales ocurre el proceso de licuefacción hidrotérmica.

Si se desea obtener valores de temperatura en el reactor más altos, pues se debe abrir el atenuador un por ciento más alto, mientras que si se desean alcanzar una temperatura menor el porcentaje de apertura debe ser menor al asumido para las simulaciones. En el perfil de temperatura, los puntos más calientes son aquellos donde incide directamente el flujo radiativo.

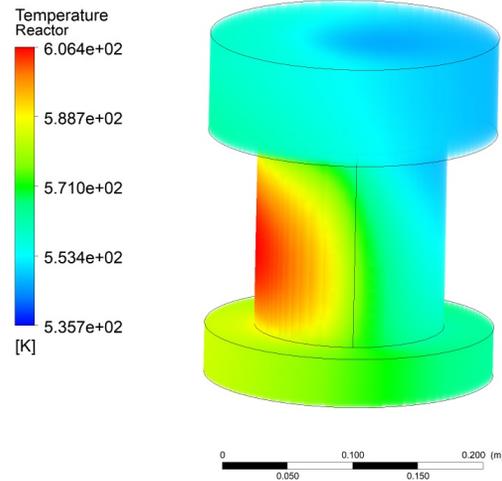


Figura 4.10: Perfil de Temperatura en el reactor en Estado estacionario.

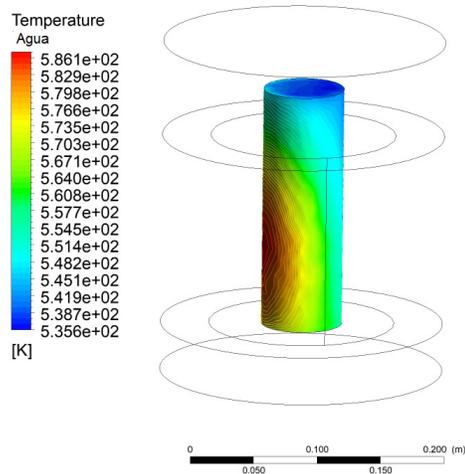


Figura 4.11: Perfil de Temperatura en el Agua en Estado estacionario.

Otro aspecto muy importante en tener en cuenta en el proceso de HTL es la presión y el comportamiento del movimiento del agua, ya que dichos parámetros son muy importantes para poder controlar el proceso en términos de seguridad. En la Figura 4.12 y 4.13 se observa el perfil de presión y de velocidad obtenido en el agua.

Los valores de presión obtenidos indica que la presión tiene un cambio significativo alrededor del eje Y, donde sobre dicho eje ejerce la fuerza de gravedad, provocando el movimiento del agua producto a las flotabilidad.

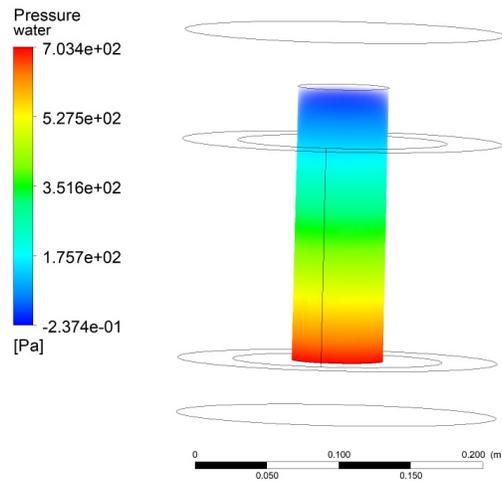


Figura 4.12: Perfil de Presión en el Agua en Estado estacionario.

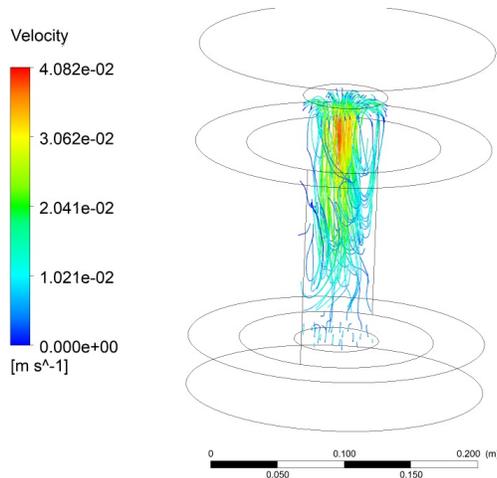


Figura 4.13: Perfil de Velocidad en el Agua en Estado estacionario.

4.3.2. Resultados del cálculo del Estado Transitorio.

A partir de los resultados obtenidos en el estado estacionario, los mismo se tomaron como como condición para realizar las mismas simulaciones en estado transitorio. En esta sección se muestran los resultados de la transferencia de calor para diferentes instantes de tiempo, donde muestra el comportamiento de los perfiles de temperatura, velocidad y presión para cada uno de ellos.

En la Figura 4.14 , se muestra el perfil de temperatura obtenido a 120 s en el reactor, mientras que en la Figura 4.15 se observa el perfil de temperatura en el agua a 0 s y a 120 s.

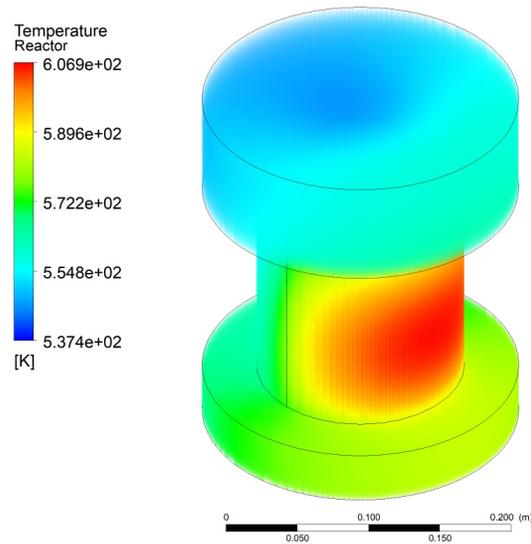


Figura 4.14: Perfil de Temperatura en el reactor en Estado transitorio a los 120 s.

La temperatura alcanzada en en el estado transitorio y estacionario es la misma, debido que la simulación en estado transitorio se tomó como condición los resultados en estado estacionario.

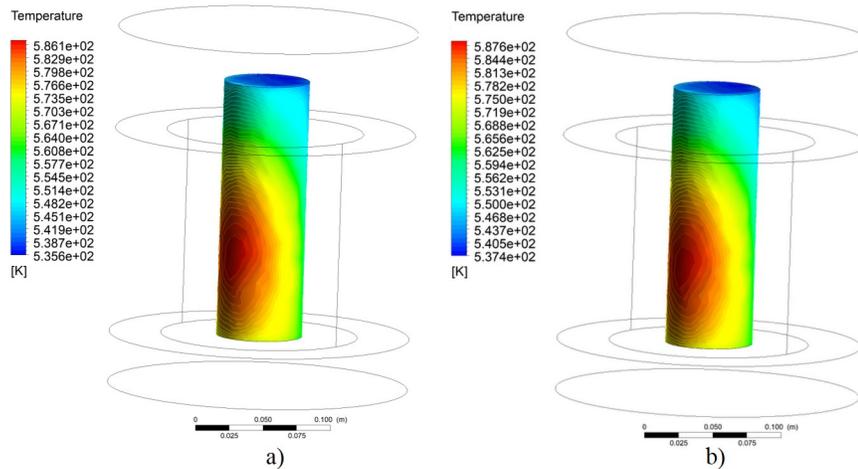


Figura 4.15: Perfil de Temperatura en el agua en Estado transitorio a) a los 0 s y b) a los 120 s.

En el instante que comienza la simulación (0 s), la temperatura mínima que alcanza el agua es aproximadamente igual a la ocurrida a los 120 s, lo mismo ocurre en la temperatura máxima alcanzada ya que el cambio de temperatura para estos cambios de tiempo es insignificante.

nificante. La temperatura más alta que se alcanza en el agua es de $314\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, y dicho valores está en los rangos donde ocurre el proceso de licuefacción.

La presión que alcanza el agua en el estado transitorio para los instantes de tiempo de 0 s y 120 s de muestran en la Figura 4.16.

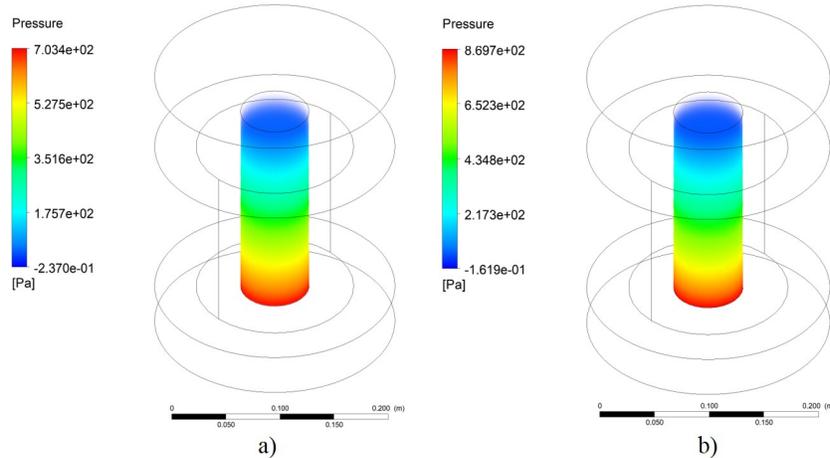


Figura 4.16: Perfil de Presión en el agua en Estado transitorio a) a los 0 s y b) a los 120 s.

En los perfiles de presión se observa una diferencia de 167 Pa en la presión máxima que se alcanza en el agua, siendo esto un cambio considerable en la presión provocando un movimiento del agua, producto a las fuerzas de flotación (Figura 4.17).

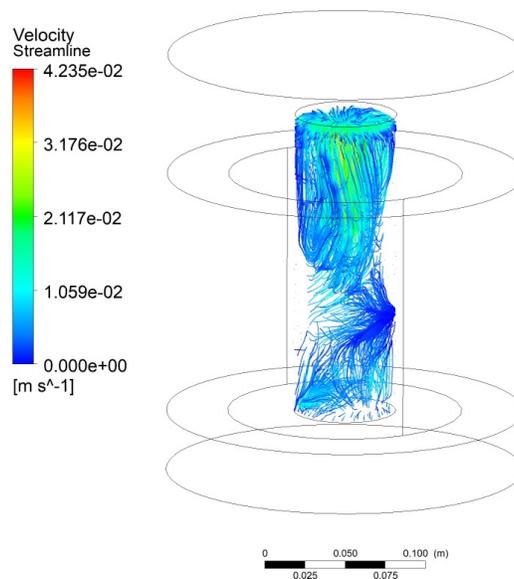


Figura 4.17: Perfil de velocidad del agua en Estado transitorio a los 120 s

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se realizaron dos simulaciones numéricas, la primera en SolTrace para el análisis del trazado de rayos y la distribución de flujo en el reactor y la segunda en ANSYS para realizar un estudio de transferencia de calor a partir de los altos valores del flujo radiativo que se obtiene de la concentración de la energía solar para desarrollar el proceso de HTL. En las simulaciones ópticas se consideró la posición del reactor a diferentes distancias del concentrador, lo que permite analizar el trazado de rayos y la distribución de flujo en el mismo, para luego con el flujo promedio absorbido en el concentrador poder determinar los valores de temperatura que se alcanzan en el reactor.

Se realizó el estudio de la transferencia de calor en estado estacionario, los resultados obtenidos fueron utilizados como condición inicial del estado transitorio, obteniendo los perfiles de temperatura y velocidades en el interior del reactor, lo que servirá de partir para el desarrollo del proceso de forma experimental.

- En SolTrace se realizó la simulación óptica con las dimensiones reales del reactor, lo que arrojó valores de la distribución de flujo que no eran reales, por lo que se tuvo que construir una nueva configuración del reactor lo suficientemente grande para eliminar dichos inconvenientes.
- En las simulaciones ópticas el reactor se colocó hasta 10 cm del punto focal, ya sea acercándose o alejándose del concentrador, en saltos de 2.5 cm y se obtuvo la intersección de los rayos y la distribución del flujo en el receptor.
- Se obtuvo que cuando el receptor se acerca al concentrador el flujo máximo en el receptor disminuye porque los rayos que salen de los extremos del concentrador no le pegan, mientras que al alejarse el receptor dicho flujo máximo aumenta, pero solo le pegan los rayos en la cara más próxima al concentrador.
- A partir de los gráficos de distribución de flujo, se concluyó que el comportamiento de los mismo es muy parecido al de un concentrador de canal parabólico, aunque no se puede afirmar que los valores del flujo obtenido, sí lo sean.
- Se seleccionó el flujo promedio de obtenido cuando el receptor se ubica a una distancia de 3.755 m del concentrador, se le determinó el 220 % para simular el atenuador del Horno Solar, obteniendo un flujo de $32\ 000\ W/m^2$.

- La modelación en CFD del reactor para HTL en estado estacionario y transitorio a partir de los resultados del primero, permitió obtener los perfiles de temperatura, presión y velocidad en el agua y los temperatura en el reactor.
 - Se obtuvo que en el estado transitorio no ocurre una variación considerable de la temperatura con respecto al tiempo y que le valor máximo que es alcanzado en el agua es 314 °C aproximadamente, valor que se encuentra en el rango donde ocurre el proceso de licuefacción.
 - La presión varía con respecto al tiempo, provocando el movimiento del agua producto a las fuerzas de flotación.
-

Capítulo 6

Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se recomienda para trabajos futuros relacionados con el tema, diseñar una mejor configuración de un reactor para licuefacción hidrotérmica para que sea integrado con la tecnología de concentración solar, así como evaluar otros tipos de tecnologías de concentración solar que permitan obtener una distribución de flujo uniforme; y mejorar el modelo de simulación en ANSYS CFX para obtener valores más reales de lo que ocurre en el interior del reactor.

Apéndice A

Anexos.

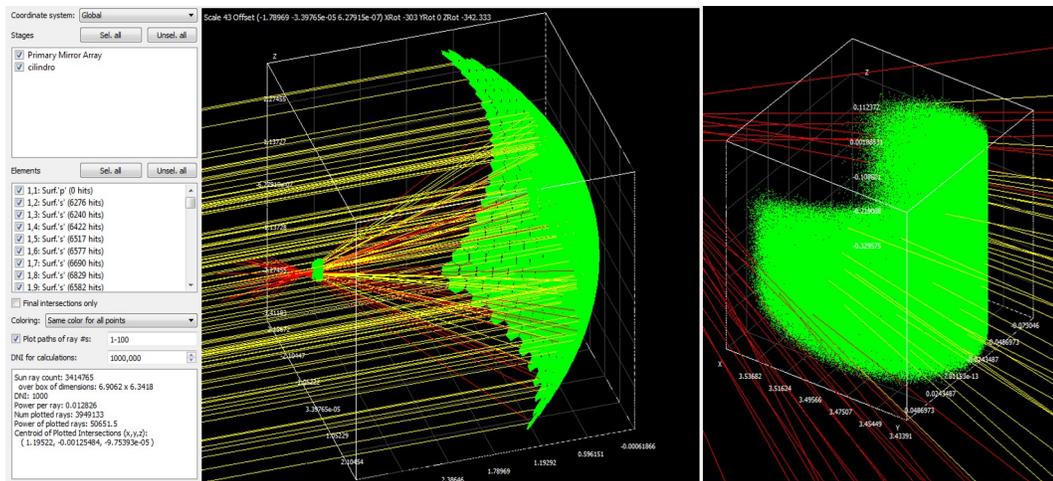


Figura A.1: Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.58 m del concentrador.

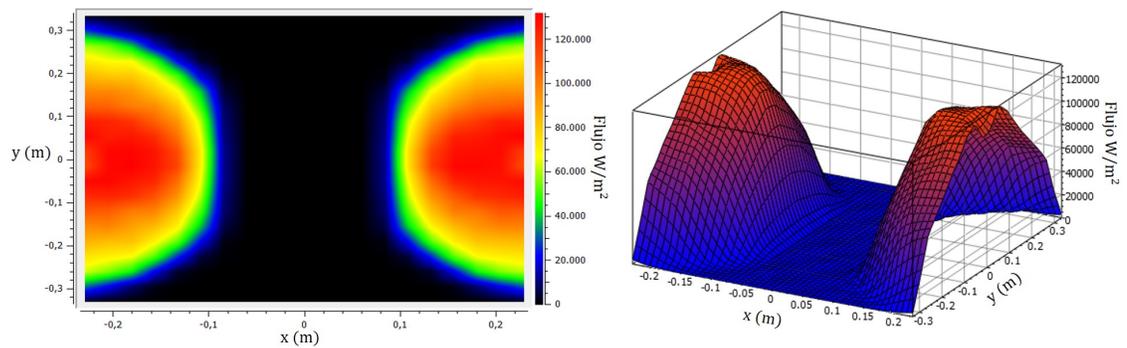


Figura A.2: Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.58 m del concentrador.

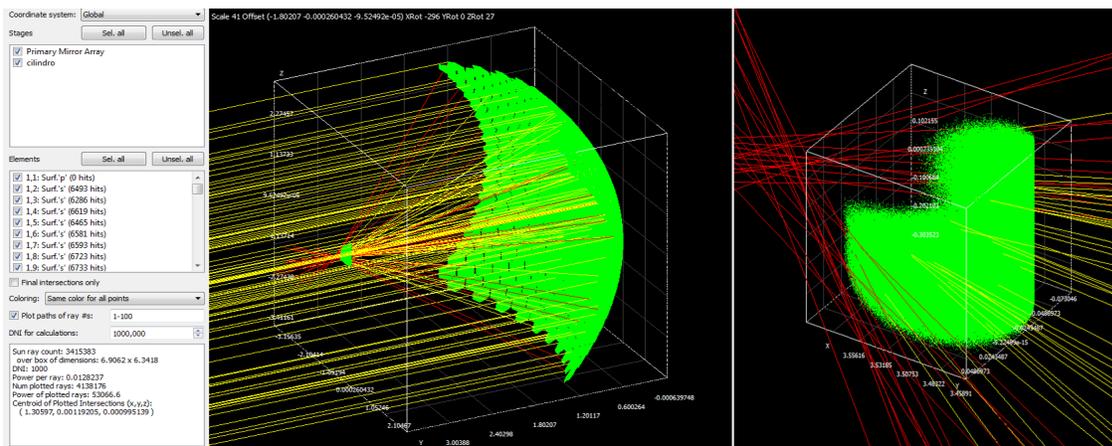


Figura A.3: Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.605 m del concentrador.

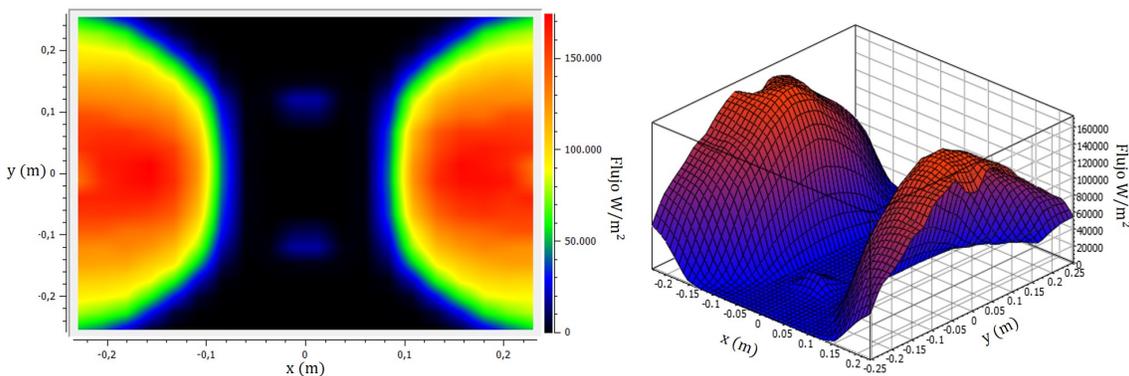


Figura A.4: Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.605 m del concentrador.

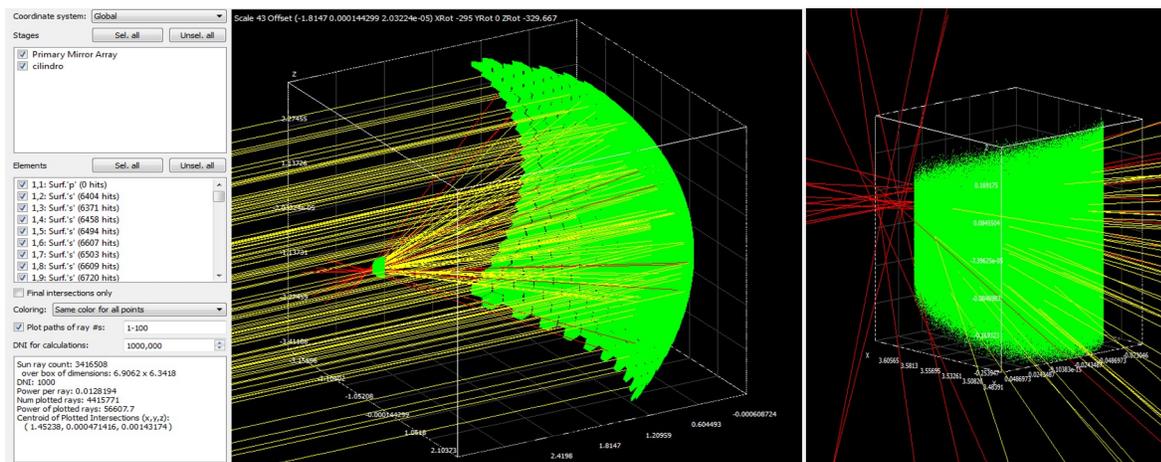


Figura A.5: Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.63 m del concentrador.

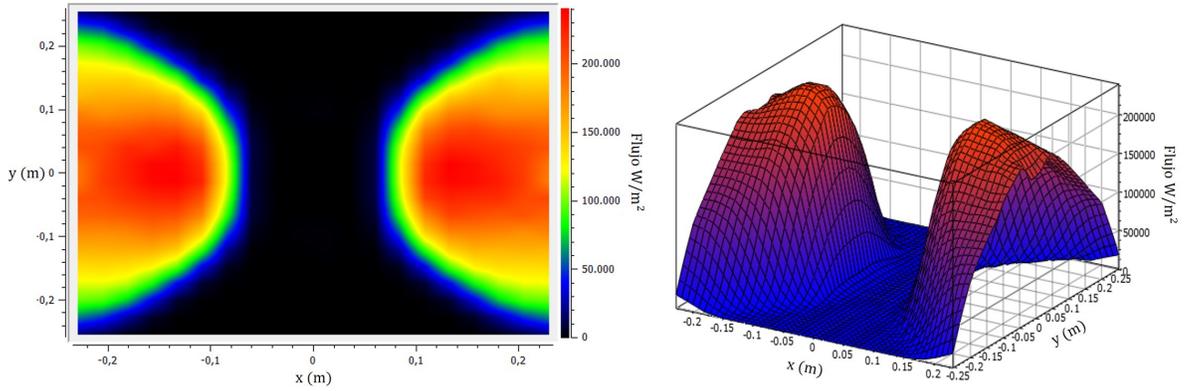


Figura A.6: Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.63 m del concentrador.

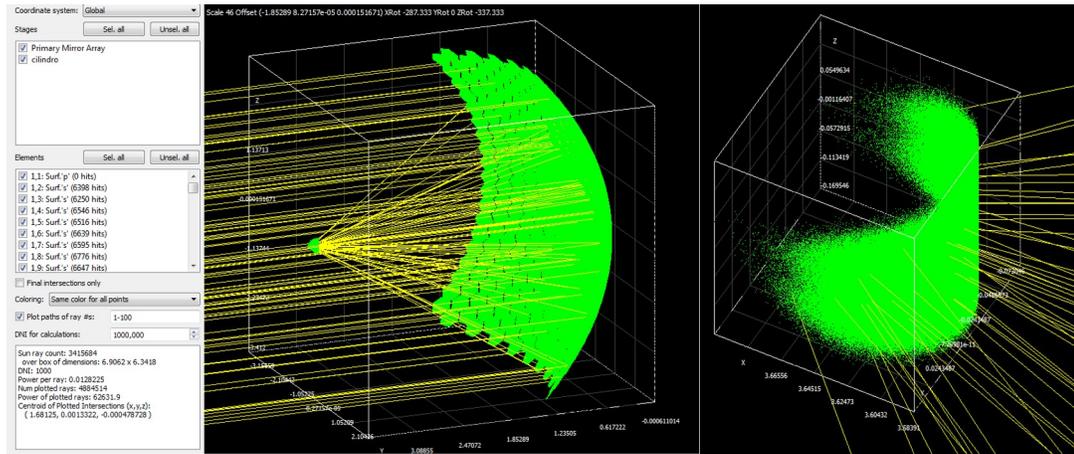


Figura A.7: Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.73 m del concentrador.

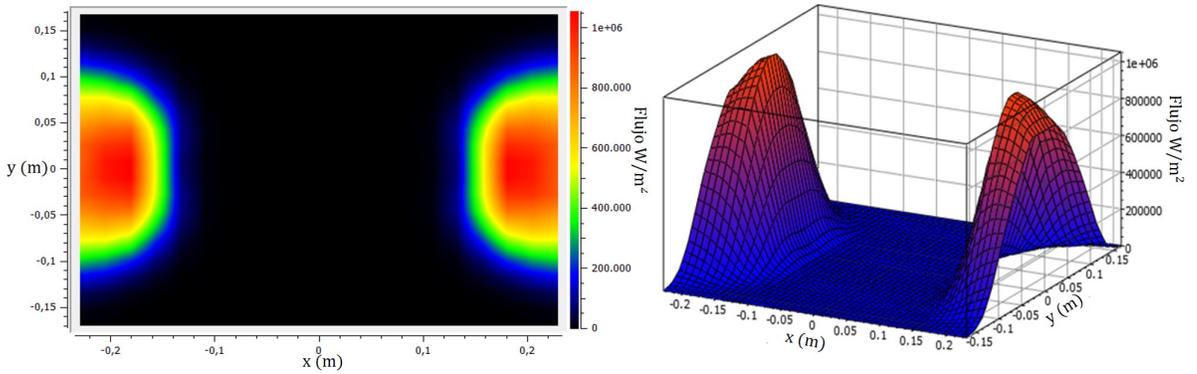


Figura A.8: Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.73 m del concentrador.

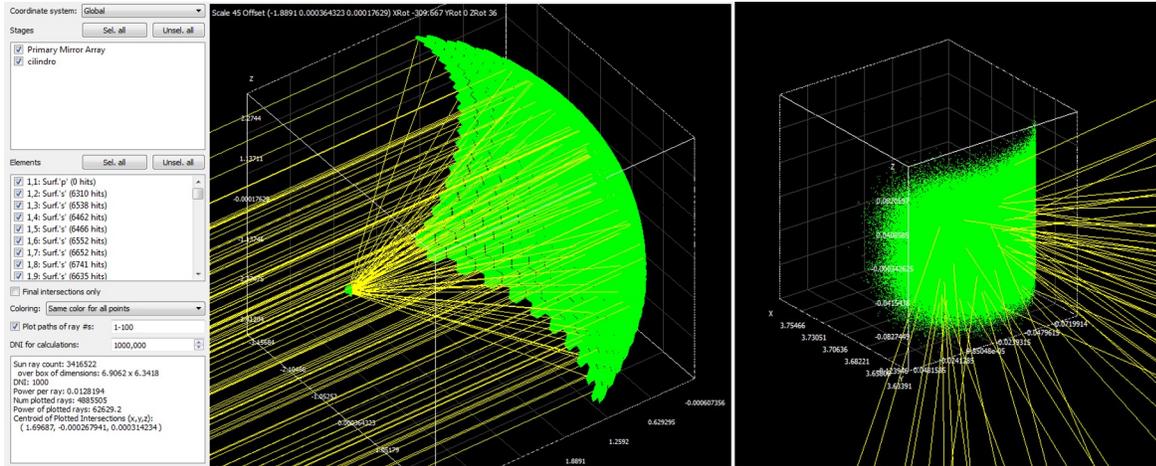


Figura A.9: Trazado de rayos. Receptor ubicado a 3.78 m del concentrador.

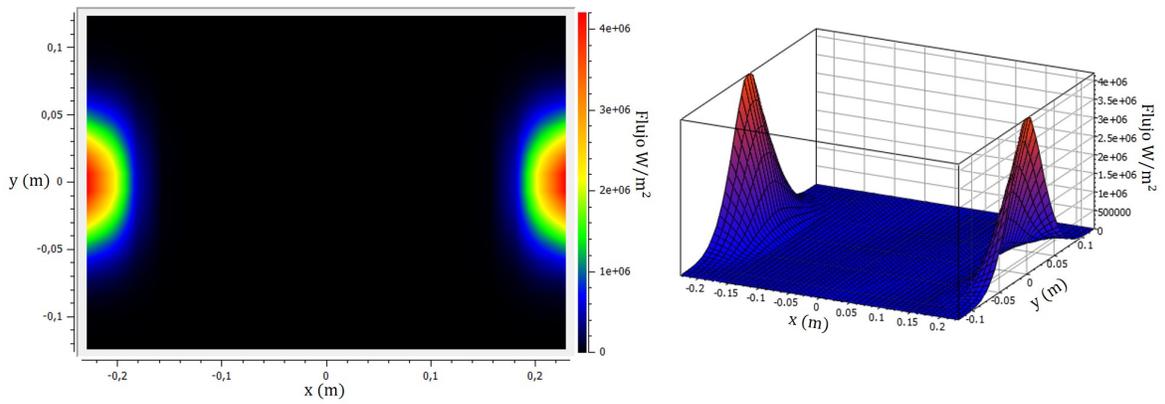


Figura A.10: Gráfico de Contorno y Superficie de la distribución de flujo. Receptor ubicado a 3.78 m del concentrador.

Referencias

- [1] J. Akhtar and N. A. S. Amin. A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:1615–1624, 2011.
- [2] J. Akhtar and N. A. S. Amin. A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:1615–1624, 2011.
- [3] Y. Alhassan, N. Kumar, and I. M. Bugaje. Hydrothermal liquefaction of de-oiled *Jatropha curcas* cake using Deep Eutectic Solvents [DESs] as catalysts and co-solvents. *Bioresource Technology*, 2015.
- [4] S. Amin. Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae. *Energy Conversion and Management*, 50:1834–1840, 2009.
- [5] P. Azadi. An integrated approach for the production of hydrogen and methane by catalytic hydrothermal glycerol reforming coupled with parabolic trough solar thermal collectors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37:17691–17700, 2012.
- [6] M. Balat. Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 3: Reactions of Liquefaction. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 30(7):649–659, 2008.
- [7] P. Biller and A. Ross. Chapter 17 - Production of biofuels via hydrothermal conversion. *Handbook of Biofuels Production (Second Edition)*, pages 509–547, 2016.
- [8] Y. Chisti. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, 26(3):126–131, 2008.
- [9] W. Costanzo, R. Hilten, U. Jena, K. Das, and J. R. Kastner. Effect of low temperature hydrothermal liquefaction on catalytic hydrodenitrogenation of algae biocrude and model macromolecules. *Algal Research*, 13:53–68, 2016.
- [10] D. C. Elliott, P. Biller, A. B. Ross, A. J. Schmidt, and S. B. Jones. Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process. *Bioresource Technology*, 178:147–156, 2015.

-
- [11] R. A. P. Enciso. Caracterización óptica y térmica del Horno Solar del IER. *Tesis para optar por el grado de Doctor en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México*, 2015.
- [12] J. L. Faeth, P. J. Valdez, and P. E. Savage. Fast Hydrothermal Liquefaction of *Nannochloropsis* sp. To Produce Biocrude. *Energy Fuels*, 27:1391–1398, 2013.
- [13] L. C. Fernández, J. Montiel, A. Millán, and J. Badillo. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3):101–115, 2012.
- [14] A. Giaconia, G. Caputo, A. Ienna, D. Mazzei, B. Schiavo, O. Scialdone, and A. Galia. Biorefinery process for hydrothermal liquefaction of microalgae powered by a concentrating solar plant: A conceptual study. *Applied Energy*, 208:1139–1149, 2017.
- [15] A. Gollakota, N. Kishore, and S. Gu. A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:1378–1392, 2018.
- [16] S. Guran. Chapter 9. Sustainable Waste-to-Energy Technologies: Hydrothermal Liquefaction. *Sustainable Food Waste-to-Energy Systems*, pages 159–175, 2018.
- [17] A. Kruse, A. Funke, and M.-M. Titirici. Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology*, 17(3):515–521, 2013.
- [18] B. Meryemoglu, A. Hasanoglu, S. Irmak, and O. Erbatur. Biofuel production by liquefaction of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) biomass. *Bioresource Technology*, 151:278–283, 2014.
- [19] L. Nazari, Z. Yuan, S. Souzanchi, M. B. Ray, and C. Xu. Hydrothermal liquefaction of woody biomass in hot-compressed water: Catalyst screening and comprehensive characterization of bio-crude oils. *Fuel*, 162:74–83, 2015.
- [20] PaulAdams, T. Bridgwater, A. Lea, A. Ross, and I. Watson. Chapter 8 - Biomass Conversion Technologies. *Greenhouse Abdul Raheem Gas Balances of Bioenergy Systems*, pages 107–139, 2018.
- [21] M. Pearce and M. S. C. Sansom. Techno-economic analysis of solar integrated hydrothermal liquefaction of microalgae. *Applied Energy*, 166:19–26, 2016.
- [22] A. Raheem, W.A.K.G.WanAzlina, Y. Yap, Y. Yap, and R. Harun. Thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49:990–999, 2015.
- [23] J. Rowbotham, P. Dyer, H. Greenwell, and M. Theodorou. Thermochemical processing of macroalgae: a late bloomer in the development of third-generation biofuels? *Biofuels*, 3(4):441–461, 2012.
-

-
- [24] R. Singh, A. Prakash, B. Balagurumurthy, and T. Bhaskar. Chapter 10. Hydrothermal Liquefaction of Biomass. *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*, pages 269–291, 2015.
- [25] K. Tekin, S. Karagöz, and S. Bektaş. A review of hydrothermal biomass processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40:673–687, 2014.
- [26] S. S. Toor, L. Rosendahl, and A. Rudolf. Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. *Energy*, 36:2328–2342, 2011.
- [27] S. S. Toor, L. Rosendahl, and A. Rudolf. Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. *Energy*, 36:2328–2342, 2011.
- [28] P. T. Patil, U. Armbruster, and A. Martin. Hydrothermal liquefaction of wheat straw in hot compressed water and subcritical water–alcohol mixtures. *The Journal of Supercritical Fluids*, 93:121–129, 2014.
- [29] K.-Q. Tran. Fast hydrothermal liquefaction for production of chemicals and biofuels from wet biomass – The need to develop a plug-flow reactor. *Bioresource Technology*, 213:327–332, 2016.
- [30] H. Xu, X. Miao, and Q. Wu. High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *Journal of Biotechnology*, 126:499–507, 2006.
- [31] Y. Zhang. Chapter 10: Hydrothermal Liquefaction to Convert Biomass into Crude Oil. *Biofuels from Agricultural Wastes and Byproducts*, pages 201–232, 2010.
-