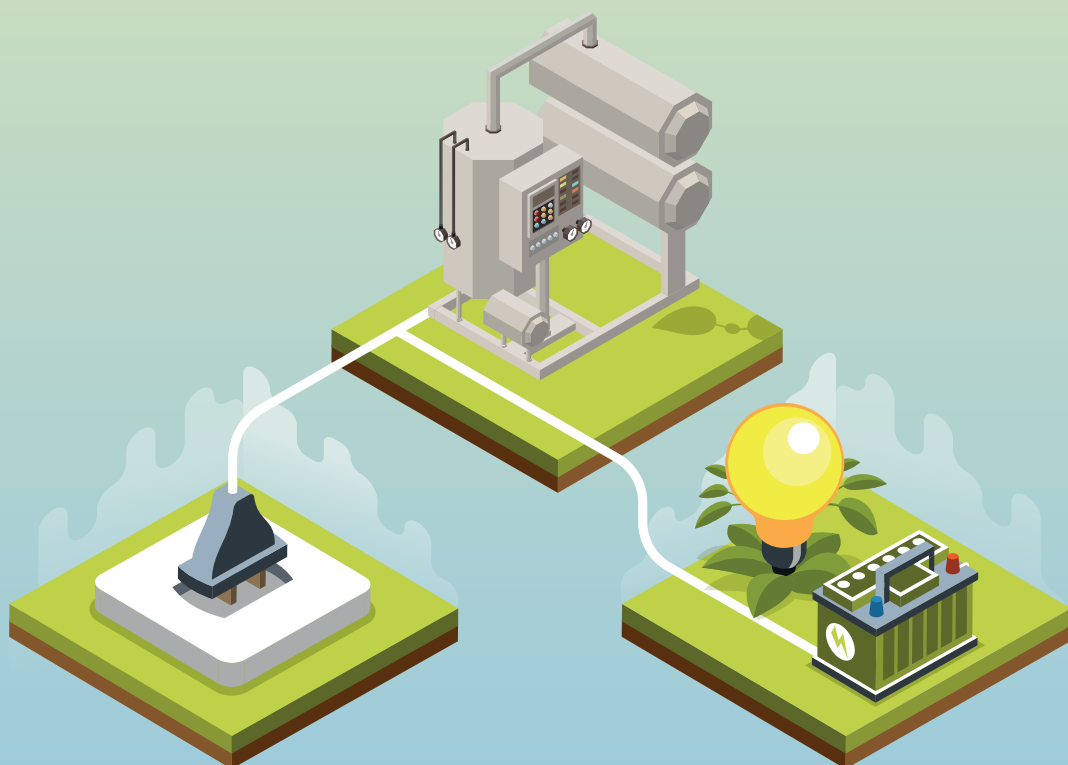


REACTOR A ESCALA AUGER PARA PIRÓLISIS RÁPIDA DE BIOMASA AGROINDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES CON FINES INVESTIGATIVOS

Cristian Antonio Pedraza Yepes
Óscar Fabián Higuera Cobos
Alberto Ricardo Albis Arrieta





Danilo Hernández Rodríguez
Rector

Miguel Caro Candezano
Vicerrector de Investigaciones, Extensión y Proyección Social

Alejandro Urieles Guerrero
Vicerrector de Docencia

Maryluz Stevenson Del Vecchio
Vicerrectoría Administrativa y Financiera

Josefa Cassiani Pérez
Secretaria General

Margarita Correa Vásquez
Jefe del Departamento de Investigaciones

Yussy C. Arteta Peña
Decana de la Facultad de Ingeniería

Agradecimientos especiales
Facultad de Ingeniería

Pedraza Yepes, Cristian Antonio -- Higuera Cobos, Oscar Fabián -- Albis Arrieta, Alberto Ricardo.

Reactor a escala Auger para pirólisis rápida de biomasa agroindustrial para la obtención de biocombustibles con fines investigativos/ Cristian Antonio Pedraza Yepes, Oscar Fabián Higuera Cobos, Alberto Ricardo Albis Arrieta. – 1 edición. – Puerto Colombia, Colombia: Sello Editorial Universidad del Atlántico, 2024.

108 páginas. 17x24 centímetros. Incluye bibliografía, tablas, gráficos, fotografías.

ISBN: 978-628-7657-41-0 (impreso)

ISBN: 978-628-7657-42-7 (Digital descargable)

1. Reactores -- diseños. 2. Energía eólica. 3. Pirólisis. 3. Biomasa. 4. Procesos energéticos renovables. I. Autor. II. Título.

CDD: 621 P371

Reactor a escala Auger para pirólisis rápida de biomasa agroindustrial para la obtención de biocombustibles con fines investigativos.

ISBN: 978-628-7657-41-0 (impreso)

ISBN: 978-628-7657-42-7 (Digital descargable)

© Universidad del Atlántico, 2024

Cristian Antonio Pedraza Yepes
Óscar Fabián Higuera Cobos
Alberto Ricardo Albis Arrieta, autores

Edición:

Sello Editorial Universidad del Atlántico Km 7 Vía Puerto Colombia (Atlántico)

<https://investigaciones.uniatlantico.edu.co/omp/index.php/catalog/index>
publicaciones@mail.uniatlantico.edu.co

Diagramación e Impresión:

Gráficas del Litoral SAS

Calle 55 No 45-53

3145623304 - 3136960799

Barranquilla



Esta obra se publica bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Esta licencia permite la distribución, copia y exhibición por terceros de esta obra siempre que se mencione la autoría y procedencia, se realice con fines no comerciales y se mantenga esta nota. Se autoriza también la creación de obras derivadas siempre que mantengan la misma licencia al ser divulgadas.

REACTOR A ESCALA AUGER PARA PIRÓLISIS RÁPIDA DE BIOMASA AGROINDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES CON FINES INVESTIGATIVOS

Cristian Antonio Pedraza Yepes
Óscar Fabián Higuera Cobos
Alberto Ricardo Albis Arrieta

Grupo de Investigaciones CONFORMAT
Programa de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad del Atlántico
Barranquilla
2024



Sello Editorial
**UNIVERSIDAD
DEL ATLÁNTICO**

Contenido

Resumen	15
1. Introducción	17
2. Marco referencial	21
2.1 Marco teórico	21
2.2 Fundamentos de diseño	21
2.2.1 Diseño	21
2.2.2 Modelo de Diseño	21
2.3 Energías renovables	22
2.3.1 Energía Eólica	22
2.3.2 Bioenergía	23
2.3.3 Clasificación de la Biomasa	24
2.3.4 Conversión de la biomasa	24
2.3.5 Aspectos técnicos	25
2.3.6. Beneficios y déficit de la Biomasa	26
2.4. Procesos de Pirólisis	27
2.4.1. Etapas de la Pirólisis	27
2.4.2. Biochar	28
2.5. Pirólisis rápida	29
2.6. Diseño de reactores	30
2.6.1. Reactores Químicos	30
2.6.2. Clasificación de Reactores	31
2.6.3. Reactores Ideales	32
2.6.4. Reactores Batch	32
2.6.5. Reactores Semi-Batch	33

2.6.6. Reactor CSTR	33
2.6.7. Reactor PFR	34
2.6.8. Reactor Auger	34
3. Diseño del reactor	37
3.1. Valoraciones de diseño	37
3.2. Condiciones de operación	38
3.3. Selección de materiales	39
3.4. Dimensionamiento del reactor	40
3.4.1. Diseño de Tornillo Sin Fin	41
3.4.2. Dimensionamiento de la Omega o Barril	44
3.4.3. Dimensionamiento de las resistencias cerámicas	45
3.4.4. Consideraciones generales del reactor	46
3.5. Sistema de tolvas	49
3.6. Sistema de trampa de recolección de producto	50
3.7. Cálculo de flujo en el sistema de reacción	51
3.7.1. Caudal del Sistema Transportador	51
3.7.2. Flujo de arrastre o fricción	52
3.7.3. Cálculo del flujo de presión	52
3.7.4. Cálculo de flujo de filtración	52
3.7.5. Obtención de una curva para los tiempos de residencia	53
3.8. Cálculo de la potencia requerida para el tornillo	53
3.8.1. Potencia para mover el material	53
3.8.2. Cálculo de la potencia requerida para mover el tornillo	54
3.8.3. Cálculo de la potencia requerida para la inclinación del tornillo	54
3.9. Diseño del sistema de control para el movimiento de los tornillos	54
3.9.1. Elección del Motor	55
3.9.2. Variador de frecuencia	56

3.10. Diseño del sistema de control de temperatura	57
3.10.1. Controlador PID	58
3.10.2. Relé	59
3.10.3. Termocuplas	59
3.11. Otras consideraciones	60
3.11.1. Sistema eléctrico	60
3.11.2. Protección de los Materiales	60
3.11.3. Portabilidad del Equipo	60
3.12. Implementacion del equipo	61
3.12.1. Sistema mecánico	61
3.13. Ensamble del equipo	63
3.13.1. Sistema eléctrico	64
3.13.2. Variador de frecuencia y motor	65
3.13.3. Circuito de Control de Temperatura	65
3.13.4. Sistema de Recolección de Datos	65
3.14. Otras consideraciones	66
3.15. Montaje final	66
3.16. Puesta en marcha del reactor	67
3.16.1. Calibración de termocuplas	67
3.16.2. Obtención de la curva experimental de temperatura	67
3.16.3. Obtención de la curva experimental de la velocidad de giro	69
3.16.4. Amperaje experimental del equipo	70
3.16.5. Posibles Fugas	70
3.17. Pruebas preliminares	70
3.17.1. Condiciones de operación	70
3.17.2. Metodología de operación	71
3.17.3. Comportamiento del Reactor	72

4. Comprobación del diseño y funcionamiento del sistema	75
4.1. Comprobación del diseño	75
4.1.1. Estructura Base	75
4.1.2. Tornillo sin fin	80
4.1.3. Sistema de transmisión de potencia	87
4.1.4. Sistema de tolvas	88
4.1.5. Simulación utilizando CFD para conocer los perfiles de temperatura	91
4.2. Resultado final y calibración	98
5. Conclusiones	101
6. Bibliografía	103

Índice de figuras

Figura 1. Esquema metodológico del modelo de diseño.	22
Figura 2. Procesos termoquímicos.	25
Figura 3. Esquema del proceso.	28
Figura 4. Biochar.	29
Figura 5. Reactor Auger con dos tornillos sin fin.	35
Figura 6. Reactor Auger sin separación de Biochar.	36
Figura 7. Esquema del reactor.	40
Figura 8. Corona de tornillo sin fin.	41
Figura 9. Diseño propuesto para la sección transversal.	45
Figura 10. Sistema de sellado para el transportador de calor.	46
Figura 11. Buje de bronce fosfórico.	48
Figura 12. Sello doble labio.	48
Figura 13. Funcionamiento del sistema de seguridad de la tolva.	50
Figura 14. Motor seleccionado.	55
Figura 15. Variador de frecuencia.	57
Figura 16. Esquema del sistema de control.	58
Figura 17. Renderizado estructura base.	63
Figura 18. Renderizado del reactor.	63
Figura 19. Sistema eléctrico con la cubierta.	64
Figura 20. Interfaz gráfica para el monitoreo y la adquisición de datos.	66
Figura 21. Mediciones de temperatura en el interior del reactor y en la termocupla.	67

Figura 22. Regresión lineal de la temperatura del reactor vs la temperatura medida por las termocuplas.	68
Figura 23. Curva del motor en función de la frecuencia del variador.	69
Figura 24. Condiciones de diseño y cargas.	76
Figura 25. Resultado de la simulación estática.	76
Figura 26. Figura de resultados del factor de seguridad.	77
Figura 27. Estudio de frecuencia.	78
Figura 28. Temperatura a lo largo de la estructura base.	79
Figura 29. Análisis del impacto de la carga térmica en la estructura base.	80
Figura 30. Condiciones de operación del tornillo sin fin.	81
Figura 31. (a) Esfuerzo equivalente de Ludwig von Mises presentes en el modelo, (b) Desplazamiento del modelo debido a las cargas y (c) Factor de seguridad.	82
Figura 32. Estudio de frecuencia para el tornillo sin fin.	83
Figura 33. Análisis del impacto de la carga térmica en el tornillo sin fin.	84
Figura 34. (a) Resistencia térmica. (b) Sección de tubería con las bridas.	86
Figura 35. Análisis del impacto de la carga térmica en el sistema de transporte	87
Figura 36. Sistema de transmisión de potencia.	88
Figura 37. Reservorio instalado.	89
Figura 38. Análisis del impacto de la carga térmica en la tolva.	90
Figura 39. (a) Volumen de control y (b) Volumen de control mallado.	92
Figura 40. Interfaz de fluent.	93

Figura 41. Mapa de contorno de la temperatura a lo largo del sistema de transporte.	94
Figura 42. Mapa de contorno de la velocidad a lo largo del sistema de transporte.	96
Figura 43. Mapa de contorno de la fracción volumétrica a lo largo del sistema de transporte.	97
Figura 44. Sistema terminado	98
Figura 45. Interfaz gráfica.	99

Índice de tablas

Tabla 1. Contenido medido en porcentaje.	26
Tabla 2. Propiedades térmicas del material.	39
Tabla 3. Propiedades mecánicas del material.	40
Tabla 4. Dimensiones obtenidas.	43
Tabla 5. Propiedades de la cascara de Manihot esculenta.	71
Tabla 6. Resultados del estudio de frecuencia.	78
Tabla 7. Velocidad en la salida del reactor.	97

Resumen

En esta investigación se presentan las consideraciones necesarias para el proceso de diseño, validación y puesta en marcha de un reactor tipo Auger a escala de laboratorio. La primera etapa implica realizar una revisión bibliográfica para establecer las condiciones de operación habituales a las que estarán expuestos los componentes que conforman dicho equipo. A partir de estas condiciones de operación, se seleccionarán los materiales compatibles con la carga térmica presente en el fenómeno físico a analizar, junto con cálculos preliminares. Posteriormente, se procederá con los diseños preliminares teniendo en cuenta el espacio disponible y las cargas a las que se verán sometidos los componentes. Luego, utilizando herramientas de diseño asistido por computadora y el software de diseño mecánico SolidWorks, se realizarán las verificaciones del diseño funcional y detallado seleccionado. Finalmente, se llevará a cabo la construcción de los componentes y su ensamblaje en un taller especializado.

El objetivo de este estudio es implementar un reactor Auger a escala de laboratorio para realizar investigaciones a partir de la pirólisis rápida de cualquier biomasa agroindustrial y obtener bioaceites hasta una temperatura de 800 °C. Esto con el propósito de mitigar los desechos agroindustriales y producir energía a partir de los bioaceites extraídos.

A través de este análisis y experimentación, se logró diseñar y construir los distintos sistemas del reactor Auger, finalizando con la prueba del prototipo en el laboratorio de bioprocesos de la Universidad del Atlántico, obteniendo excelentes resultados, como la conversión de biomasa en bioaceite hasta un 60%.

1. Introducción

La energía es uno de los recursos más esenciales para la sociedad actual; sin embargo, teniendo en cuenta que las principales fuentes de energía utilizadas son las causantes del cambio climático y que estos recursos son altamente finitos, se ha impulsado el uso de fuentes alternativas de energías, no solo amigables con el medio ambiente, sino sostenibles en el tiempo, porque se espera que la demanda energética crezca gradualmente con el aumento de la población global y la alta industrialización. Se le llama energías renovables a este tipo de energía por la característica “infinita” de sus recursos y entre estas se destacan la energía eólica, solar, marea-motriz y biomasa.

Suele confundirse el concepto entre energía renovable con energías verdes, pero estas se diferencian en la fuente de energía utilizada. Mientras que las energías verdes utilizan solo recursos naturales, la energía renovable se considera como cualquier recurso que pueda ser reutilizado o auto-re generativo, es decir, una energía verde siempre será renovable pero una energía renovable no siempre será verde, como es el caso de la energía nuclear, que a pesar de considerarse como energía renovable su combustible de trabajo no es obtenido de la naturaleza.

En la categoría de energía renovable también se encuentra la proveniente de la biomasa, la cual es obtenida mediante procesos químicos. Si bien se ha demostrado que el impacto ambiental que esta genera es considerablemente menor a los combustibles de origen fósil [1-2], la polución debido a la quema de biomasa fue uno de los primeros problemas a los que se enfrentó la humanidad. Se podría considerar que el primer contacto humano con la energía proveniente de la biomasa [3] fue la cantidad de componentes cancerígenos provenientes del humo en cuevas, cabañas y campamentos.

Solo es hasta la Edad Media cuando se vuelven a tener datos significativos sobre el uso del carbón en aplicaciones metalúrgicas. Más tarde, durante la Revolución Industrial, nos encontraremos con el uso

del gas y pocos años después, en 1850, ante la industria de destilados de madera, que experimenta un rápido crecimiento. En un salto temporal hasta 1920, el auge de la industria petrolera provoca la disminución de dichos destilados. Es para esta fecha de los años 20 que se tiene el primer informe sobre el uso del reactor Auger descrito por Laucks en 1927, quien investigó un reactor de tornillo de pirólisis lenta para el procesamiento del carbón, un reactor que permitiera producir un producto similar al Coque que se describió como un “combustible sin humo” [4]. En teoría, el reactor era simplemente un tubo calentado con un tornillo dentro. En la práctica, se observaron muchos problemas durante el funcionamiento del sistema, problemas que se le atribuyeron a la alta temperatura de la pared en comparación con la baja temperatura del eje del tornillo, provocando que el alquitrán se depositara en el eje frío. Laucks sugirió entonces transferir el calor usando un eje hueco para permitir el escalamiento.

En la década de 1950, la Compañía Lurgi desarrolló el proceso Lurgi-Ruhrgas para retocar la pizarra bituminosa finamente triturada y producir combustible con el uso de un reactor sinfín. A diferencia de los intentos anteriores, se logró una mejor transferencia de calor con el uso de arena como portador de calor. En 1958 se construyó una planta comercial en Dormhagen, Alemania, basada en este proceso Lurgi-Ruhrgas para producir etileno utilizando un suministro de nafta [5]. A finales del siglo XX, la pirólisis del carbón se consideró una alternativa económica a los métodos de limpieza posteriores a la combustión, como la eliminación de azufre, así que se empleó un reactor alimentador de carbón de doble husillo para sulfurar el carbón de manera preventiva mediante pirólisis suave en un primer paso, separando el H_2S y utilizando un solvente a base de calcio [6].

En 1990 Camp recomendó tres métodos para el continuo desarrollo del endurecimiento del coque, en su investigación propuso una mejora al proceso de calentar externamente el tornillo pirolizador, donde consiguió pirolizar 186 kg de carbón en 51 horas utilizando únicamente un tornillo pirolizador; además, realizó ciertas recomendaciones para el futuro desarrollo de una máquina que hiciera uso de tornillos gemelos [7].

Cada proceso tiene oportunidades de mejora. Luego del periodo de establecimiento del proceso de obtención de energía proveniente de la biomasa, [8] se realizó un proceso de optimización a un reactor Auger de 1 kg/h utilizando una mezcla mecánica de acero colado para pirolizar biomasa de roble rojo. Para optimizar el sistema, se empleó la metodología de superficie de respuesta, con un diseño de experimentos compuesto central circunscrito. Los factores estudiados fueron la temperatura de entrada del portador de calor y su flujo másico; la velocidad rotacional de los tornillos del reactor y el flujo volumétrico del gas de barrido.

Los resultados indican que el reactor Auger, que ha sido escasamente documentado en la literatura, es adecuado para la producción de aceite biológico, logrando un rendimiento líquido del 73 %wt. Para una optimización efectiva, es esencial comprender los fenómenos físicos y químicos presentes en el proceso [9]. Con este objetivo, se modeló un reactor Auger para medir la velocidad de transferencia de calor entre el portador de calor y las partículas de biomasa, con el fin de mejorar las velocidades de pirólisis. Como objeto de estudio se utilizó un reactor Auger de tornillos gemelos que estuvo en condiciones de operación piloto a escala desde hace años en KIT, identificando ineficiencias en la sección inicial de mezclado que afectaban la transferencia de calor de manera subóptima. Se propusieron tres modificaciones de diseño que permitieron eliminar estas ineficiencias y mejorar el rendimiento en comparación con el diseño original [10-11].

Actualmente, la Universidad del Atlántico cuenta con una línea de investigación en energías no convencionales. El desarrollo de un reactor Auger, desde el diseño hasta la evaluación, representa un avance significativo en esta área. Sería el segundo reactor de su tipo en el país, lo que ampliaría y complementaría las investigaciones sobre pirólisis que se realizan en la institución.

Este proyecto beneficiaría principalmente a los laboratorios del Programa de Ingeniería Química, tras la finalización del proyecto de producción de bio-oil mejorado mediante pirólisis catalítica de residuos agroindustriales del departamento del Atlántico. Este equipo sería de gran importancia para la universidad ya que impulsaría la realización de

nuevos estudios y análisis en una potencial fuente de generación energética. El aporte clave de esta investigación radica en la presentación de una metodología detallada para la construcción y puesta en marcha de un reactor Auger de doble tornillo (Twins), lo que supone un avance significativo en el campo.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

En este capítulo se presenta una descripción del conjunto de los conocimientos que requiere el lector para el entendimiento del tema propuesto, que se centra en el diseño a escala de un reactor tipo Auger para la rápida pirólisis de biomasa agroindustrial con el fin de producir biocombustibles para investigaciones en la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Los temas tratados incluyen: energías renovables, energía de biomasa, procesos de pirólisis, reactores de pirólisis y el reactor tipo Auger. A continuación, se examinan detalladamente cada uno de estos temas, resaltando los aspectos más relevantes en relación con la investigación propuesta.

2.2 Fundamentos de diseño

2.2.1 Diseño

El término diseño en la ingeniería implica la elaboración de un plan cuyo objetivo es lograr la satisfacción de una necesidad en particular o la solucionar una situación problema. Cuando la implementación de este plan resulta en la creación de un objeto físico es fundamental que dicho objeto posea características que garanticen su funcionalidad además de la posibilidad de ser comercializado [12].

2.2.2 Modelo de Diseño

Un proceso de diseño lleva implícita una metodología que se origina a través de un modelo. Independiente del modelo, se crea una ruta lógica de fases donde se desarrollan las tareas acordes a la etapa en ejecución. Esto no significa que no se generen discrepancias entre los diferentes modelos en cuanto a su alcance, pero deben llegar a un punto de

sinergia al describir el avance con el uso de secuencias. Los modelos de diseño pueden dividirse, como se muestra en la Figura 1, dependiendo del enfoque que tiene cada uno [13].

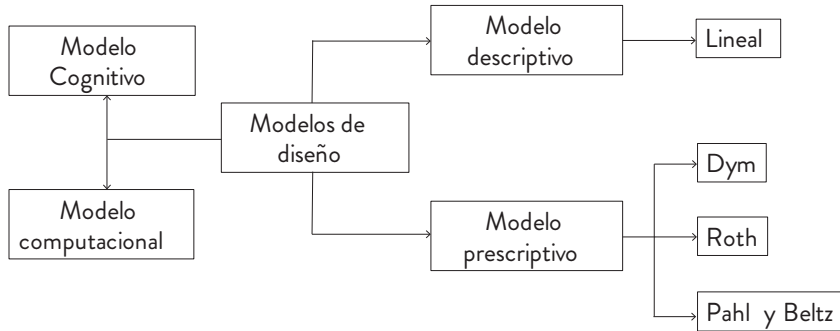


Figura 1. Esquema metodológico del modelo de diseño.

2.3 Energías renovables

Las energías renovables son recursos abundantes que, al ser obtenidos de forma natural, tienen la particularidad de no ocasionar daños medioambientales. Dichas energías se caracterizan por la no producción de gases de efecto invernadero, ni otras emisiones dañinas como las de CO₂, algo que sí ocurre con las energías no renovables como son los combustibles fósiles [14].

Las energías renovables o energías limpias son la mejor alternativa para el medio ambiente. Se caracterizan por renovarse de forma natural y se obtienen en una cantidad ilimitada gracias a que son producidas por la naturaleza continuamente. Los distintos tipos de energías renovables que existen son: energía hidráulica, energía eólica, energía solar, energía geotérmica, energía mareomotriz y energía de la biomasa [15].

2.3.1 Energía Hidráulica

Se refiere al aprovechamiento de la energía potencial que tiene el agua. Se obtiene buscando una caída de agua desde cierta altura a un

nivel inferior, la que luego se transforma en energía mecánica por medio de la rotación de un eje, con el uso de una rueda hidráulica turbina [14]. Habitualmente se considera como un ejemplo de energía renovable, puesto que no emite productos que perjudiquen el medio ambiente, sin embargo, se considera que produce un gran impacto ambiental teniendo en cuenta el proceso de construcción de las presas, que requieren inundar grandes superficies de terreno, alteran el caudal del afluente y modifican la calidad del agua [16-17].

2.3.2 Bioenergía

La energía de la biomasa o bioenergía es aquella que se obtiene de los compuestos orgánicos mediante procesos naturales. Con el término biomasa se alude a la energía solar, que convierte dióxido de carbono en materia orgánica por la vegetación y que se puede recuperar por combustión directa o transformando esa materia en otros combustibles, como alcohol, metanol o aceite. También se puede obtener, a partir de desechos orgánicos, biogás, de composición parecida al gas natural. En su más estricto sentido es un sinónimo de biocarburantes (combustibles derivados de fuentes biológicas). En su sentido más amplio, abarca también la biomasa, el material biológico utilizado como biocombustible, así como la situación social, económica, científica y técnica relacionada con la utilización de fuentes de energía biológica.

Una parte de la energía que llega a la Tierra procedente del Sol y es absorbida por las plantas a través de la fotosíntesis, y convertida en materia orgánica con un mayor contenido energético que las sustancias minerales. De este modo, cada año se producen 21011 toneladas de materia orgánica seca, con un contenido de energía equivalente a 68000 millones de tep (toneladas equivalentes de petróleo), que equivale aproximadamente a cinco veces la demanda energética mundial. A pesar de ello, su enorme dispersión hace que solo se aproveche una mínima parte de la misma. Entre las formas de biomasa más destacables por su aprovechamiento energético sobresalen los combustibles energéticos como la caña de azúcar, la remolacha, etc. y los residuos agrícolas, forestales, ganaderos, urbanos, los lodos de depuradora y computadoras, las plantas, etc. [18].

2.3.3 Clasificación de la Biomasa

La biomasa, como recurso energético, puede clasificarse en biomasa natural, residual y los cultivos energéticos.

La biomasa natural es la que se produce en la naturaleza sin intervención humana. Por ejemplo, la caída natural de ramas de los árboles (poda natural) en los bosques.

La biomasa residual es el subproducto o residuo generado en las actividades agrícolas (poda, rastrojos, etc.), silvícolas y ganaderas. También es el residuo de la industria agroalimentaria (alpechines, bagazos, cáscaras, vinazas, etc.) y de la industria de transformación de la madera (aserraderos, fábricas de papel, muebles, etc.), así como los residuos de depuradoras y el reciclado de aceites.

Los cultivos energéticos se definen como aquellos cultivados con el propósito específico de ser utilizados en la producción de biocombustibles. Junto a los cultivos tradicionalmente empleados en la industria alimentaria, como los cereales y la remolacha para la producción de bioetanol, y las oleaginosas para la producción de biodiesel, se encuentran también otros tipos de cultivos, tales como los lignocelulósicos forestales, herbáceos y cosechas alternativas, que son destinados a este fin energético.

2.3.4 Conversión de la biomasa

Los procesos termoquímicos utilizados en el proceso de conversión de la biomasa son:

Gasificación. Proceso endotérmico que ocurre en el rango de temperaturas comprendidas entre 750 °C y 1000 °C con el objetivo de producir, principalmente, un gas combustible conocido comúnmente como gas productor o de síntesis [17]. Dependiendo de las condiciones del proceso y del gas fluidizante, la composición del gas de síntesis contendrá cantidades variables de CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂ y otras especies orgánicas. A menudo, el calor requerido para la gasificación se proporciona oxidando parcialmente una porción del material de alimentación [18].

Combustión: es un proceso termoquímico que se lleva a cabo a altas temperaturas, superiores a 1500 °C, ampliamente comprendido y utilizado en diversas industrias. Al contar con la presencia del aire estequiométrico para oxidar completamente el combustible de entrada, la combustión genera calor como resultado, produciendo agua y CO₂ como subproductos [19]. En la Figura 2 se muestra una síntesis del proceso.

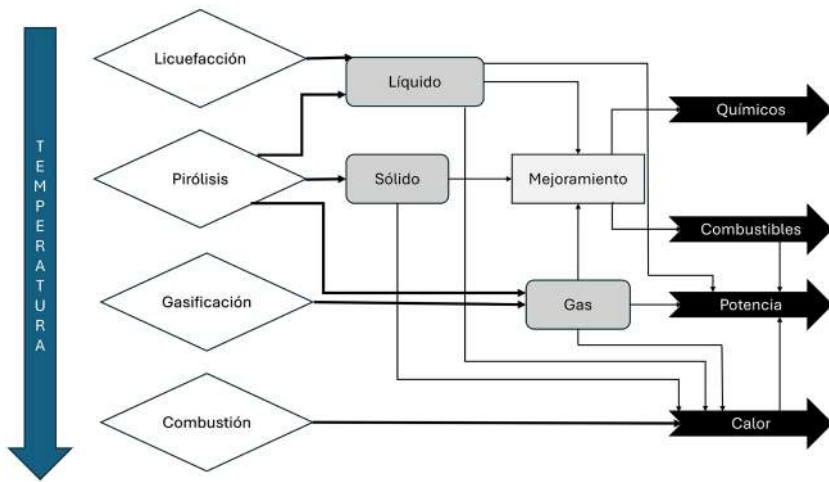


Figura 2. Procesos termoquímicos. Fuente. [1]

2.3.5 Aspectos técnicos

La biomasa está compuesta por más de 300 componentes de los que sobresalen: lignina, celulosas y hemicelulosas (azúcares, etanol y ácido fórmico). En la Tabla 1 se presentan los contenidos del porcentaje en peso de la celulosa, el hemicelulosa y la lignina en varios tipos de biomasa [20].

Tabla 1. Contenido medido en porcentaje

Contenido de lignocelulosa %			
Tipo	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Madera suave	41	24	28
Madera dura	39	35	20
Corteza de pino	34	16	34
Paja de trigo	40	28	17
Cáscara de arroz	30	25	12
Turba	10	32	44

2.3.6. Beneficios y déficit de la Biomasa

Es fundamental evaluar las características de cualquier tipo de energía para determinar si el combustible obtenido puede clasificarse como una fuente renovable. En relación con las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono), el uso de biomasa o sus derivados se considera neutro en emisiones netas si se emplea en cantidades que no superen la producción neta de biomasa del ecosistema explotado. Esto aplica especialmente a los usos tradicionales, como el aprovechamiento de restos de poda para leña o cocinas de bosta, siempre y cuando no se exceda la capacidad de carga del territorio.

En el ámbito de los procesos industriales, dado que es inevitable recurrir a otras fuentes de energía para la construcción de maquinaria, transporte de materiales y diversos procesos esenciales, las emisiones generadas por estas fuentes se consideran como emisiones netas. En procesos con bajo consumo energético, es posible obtener combustibles con emisiones netas significativamente menores que los combustibles fósiles comparables. No obstante, el empleo de métodos inadecuados, como la destilación con alambique tradicional para la producción de orujos, puede resultar en combustibles con mayores emisiones. Es crucial también analizar la posible generación de otros gases de efecto invernadero. Por ejemplo, en la producción de biogás, un escape accidental puede arruinar completamente el balance cero de emisiones,

puesto que el metano tiene un potencial 21 veces superior al dióxido de carbono, según el IPCC [21].

2.4. Procesos de Pirólisis

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno [21], con raíces que se remontan al antiguo Egipto [22]. Al calentarse un material, la humedad es el primer componente que se elimina, seguido de reacciones de pirólisis antes de que ocurra cualquier proceso térmico. En función de las condiciones, se producirán diferentes cantidades de sólidos, líquidos y gases [23]. La pirólisis tiene lugar en un rango de temperaturas que va de 400 °C a 600 °C, y por lo general a presión atmosférica. La pirólisis rápida se caracteriza por altas velocidades de calentamiento, cortos tiempos de residencia de vapor (segundos) y un rápido enfriamiento de los productos de reacción, lo que favorece la formación máxima de líquidos alrededor de 500 °C [24].

La pirólisis lenta, como alternativa, está marcada por velocidades de calentamiento más lentas, por tiempos de residencia de vapor más largos (minutos) y por altos rendimientos de material sólido de carbón, por ello, fue utilizada durante mucho tiempo para convertir madera en carbón [25]. Por otro lado, un beneficio de la licuefacción directa y la pirólisis, sobre la gasificación y la combustión, es la capacidad para producir un producto líquido que puede almacenarse y transportarse fácilmente, en comparación con el combustible gaseoso. Esto significa que el bioaceite puede ser producido en una ubicación distinta a la de su uso final, lo que representa un esquema de “procesamiento distribuido” beneficioso, ya que permite minimizar los costos de transporte de biomasa para instalaciones regionales de pequeña escala [26].

2.4.1. Etapas de la Pirólisis

Las etapas preliminares antes de comenzar con el proceso de pirólisis inician con la limpieza del residuo agroindustrial, que se puede

realizar por separación neumática en seco y continua con el proceso de picado, de este modo el residuo reducirá la humedad por debajo del 10 % del peso y disminuirá el tamaño a características adecuadas para comenzar con la pirólisis. Como se explica en la Figura 3.

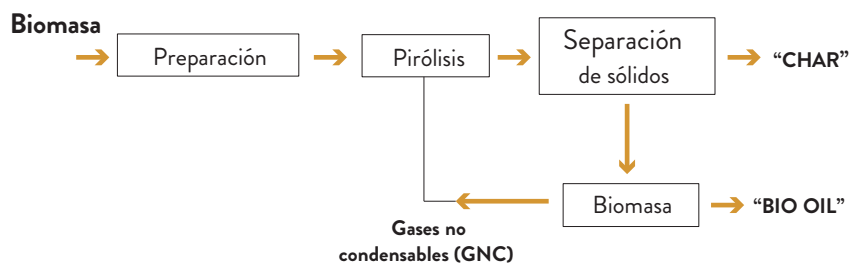


Figura 3. Esquema del proceso.

2.4.2. Biochar

Es un subproducto del proceso de la pirólisis que tiene propiedades similares al Coque (23-32 MJ/kg). El biochar de la pirólisis tiene un valor calorífico más alto que muchas calidades del carbón. En la Figura .4 podemos observar un ejemplar de biochar y al igual que el bioaceite se considera un combustible verde y neutro de CO₂. A nivel mundial el biochar es como conocido como un derivado del carbón útil para mejorar las cualidades físicas y químicas del suelo, y puede ser utilizado como enmienda en suelos contaminados en procesos de fitorremediación [27].

En cuanto a su estructura química, el biocarbón es similar al carbón utilizado como combustible, siendo su única distinción el objetivo para el cual fueron preparados. Sin embargo, el biocarbón presenta relaciones O/C más altas que el carbón mineral, que también deriva de la biomasa. Se considera que los componentes del biocarbón son altamente recalcitrantes, lo que significa que pueden permanecer en el suelo durante largos periodos de tiempo sin experimentar alteraciones significativas (cientos a miles de años). La incorporación de este producto al suelo puede funcionar como un sumidero de carbón, con-

tribuyendo así a la mitigación del exceso de CO₂ en la atmósfera [28]. La adición de biocarbón al suelo puede alterar la textura, estructura, distribución del tamaño del poro, el área superficial total, densidad aparente, capacidad de retención de humedad, crecimiento de las plantas y facilidad de laboreo del suelo [29].

La cantidad de materia prima que puede ser utilizada para la producción de biocarbón es amplia, sin embargo, no todos los productos o subproductos son apropiados para este fin, por lo tanto a la hora de elegir los materiales, estos no deben competir con otros usos. Entre los materiales más usados para este fin se encuentran los residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, desechos de papel y de arroz [28].



Figura 4. Biochar.

2.5. Pirólisis rápida

La pirólisis rápida es un proceso complejo que, a pesar de haber sido objeto de numerosas investigaciones en las últimas décadas, sigue evolucionando a un ritmo acelerado. Este proceso se destaca por su versatilidad y diversidad, siendo reconocido por su capacidad para producir un combustible líquido de alto rendimiento a partir de una amplia gama

de materias primas de biomasa. Se requieren mínimos pretratamientos en la biomasa para llevar a cabo la pirólisis rápida [30]. Dependiendo de los resultados deseados, es posible realizar el proceso sin necesidad de aportes externos de energía. Además, según las aplicaciones del producto, la pirólisis rápida puede ser neutra en carbono o incluso tener un impacto negativo en las emisiones de carbono. Como se mencionó previamente, la pirólisis rápida implica un rápido calentamiento en ausencia de oxígeno para descomponer la biomasa en un combustible líquido, generando subproductos sólidos y gaseosos. Se reconoce generalmente que existen cuatro características principales en el proceso de pirólisis rápida [30].

- Muy altas tasas de transferencia de calor.
- Temperatura de reacción controlada.
- Tiempos cortos de residencia de vapor
- Rápida separación
- Enfriamiento de los productos de reacción.

2.6. Diseño de reactores

Es la ciencia y el arte de seleccionar, crear y diseñar reactores químicos con un propósito específico: llevar de la forma más eficiente posible, reactivos a productos. Esta disciplina junto a las diferentes operaciones de separación, son las que establecen a la ingeniería química como una rama independiente de la ingeniería. Para tal fin es necesario conocer tanto la cinética, como la termodinámica de las reacciones de interés.

2.6.1. Reactores Químicos

Los reactores químicos son dispositivos utilizados para llevar a cabo reacciones químicas. En general, se busca determinar el tamaño y el tipo de reactor, así como el método de operación. Además, a partir de los parámetros de diseño, se pretende prever con cierta certeza la respuesta de un reactor ante condiciones específicas, como por ejemplo,

un cambio brusco en la composición de la alimentación.

2.6.2. Clasificación de Reactores

Existen varios criterios a la hora de clasificar a los reactores químicos.

En función del número de fases presentes en el reactor, pueden distinguirse:

Reactores homogéneos: son aquellos en los que, tanto reaccionantes como productos, se encuentran en la misma fase (gas o líquido en general).

Reactores heterogéneos: son aquellos en los que hay más de una fase.

Según la forma en la que operan se clasifican en:

Reactores continuos: aquellos que trabajan en estado estacionario, es decir, en los que se introduce alimentación fresca a cada instante.

Reactores discontinuos: aquellos que trabajan por lotes. Se carga una cantidad de alimentación y se deja reaccionar durante un tiempo, una vez transcurrido se carga otra cantidad de alimentación y así sucesivamente.

Reactores semicontinuos: aquellos en los que una fase del reactor se comporta de forma continua mientras que otra lo hace de forma discontinua.

Según el tipo de flujo existen:

Reactores ideales: aquellos en los que el tipo de flujo es ideal (teórico). Se distinguen dos tipos:

- Reactor de mezcla perfecta.
- Reactor de flujo en pistón.

Reactores reales: aquellos que no son ideales.

2.6.3. Reactores Ideales

Aquellos en el que el tiempo de residencia es igual para todos los elementos. Pueden ser:

Reactor discontinuo perfectamente agitado: es aquel que en su contenido está perfectamente agitado y su composición es igual en todo el reactor. Composición que varía con el tiempo hasta alcanzar una conversión final o de equilibrio del reactivo, para las condiciones establecidas como temperatura, concentraciones iniciales de reactivos, presencia de inertes, etc. Una vez detenida la reacción cuando la velocidad de reacción tienda a cero, se debe vaciar total o parcialmente el reactor e incorporar nueva corriente de entrada si se quiere seguir produciendo productos de reacción.

Reactor continuo de mezcla perfecta: en este reactor la composición de la corriente de salida es igual a la composición dentro de cualquier punto, no varía en el tiempo y se considera en estado estacionario. Este tipo de reactores son ideales para estudios cinéticos o de diseño experimental porque son de sencilla construcción en el laboratorio y en su cálculo de diseño ofrecen la posibilidad de relacionar el grado de conversión requerido (X), la velocidad de reacción (r), el volumen (V) y las concentraciones iniciales de reactivos (C_0).

Reactor de flujo pistón: en este tipo de reactores la temperatura se mantiene constante ya que se trata de un sistema en estado estacionario. La velocidad de reacción dependerá exclusivamente de la conversión o concentración. Estos reactores, en realidad, son tubulares y se caracterizan por la ausencia de retromezcla, lo que significa que cada porción de corriente de entrada no se mezcla con la siguiente. En consecuencia, la composición de cada volumen diferencial varía a lo largo de la longitud del reactor.

2.6.4. Reactores Batch

Estos reactores trabajan en estado no estacionario siendo el más sencillo un tanque agitado. Su principal ventaja es que su costo de instrumentación es bajo, además es flexible en su uso y se le puede detener

de modo fácil y rápido. Sin embargo, el costo de funcionamiento y de mano de obra es alto, debido a la gran cantidad de tiempo que se pasa parado como resultado de su carga, descarga y limpieza. Además no siempre es posible implementar un sistema de control adecuado. Este reactor suele usarse en pequeñas producciones o pruebas piloto, asumiendo que la composición es uniforme en cualquier instante y basándose en la selección de un componente limitante.

2.6.5. Reactores Semi-Batch

Al igual que los reactores Batch, operan de manera discontinua, la diferencia es que al menos uno de los reactantes es añadido mientras ocurre la reacción. Consecuentemente, los balances de calor y masa se ven afectados por la progresiva adición de uno de los reactantes, además, no existe el estado estacionario. Cuentan esencialmente con dos ventajas:

Para reacciones exotérmicas, la adición controla la velocidad de producción de calor, de esta forma ajusta la velocidad de la reacción a la capacidad refrigerante del reactor.

Para múltiples reacciones, la adición progresiva de uno de los reactantes mantiene su concentración a un bajo nivel, lo que permite reducir la velocidad de una reacción secundaria comparada a la reacción principal.

Este tipo de reactores, mantiene las ventajas de flexibilidad y versatilidad del reactor Batch pero compensa sus debilidades en el control de la reacción, con la adición de al menos uno de los reactantes. Por esta razón, son comúnmente usados en productos químicos finos y en la industria farmacéutica.

2.6.6. Reactor CSTR

Estos reactores trabajan en estado estacionario, es decir, que sus propiedades no varían con el tiempo. Este modelo ideal supone que la reacción alcanza la máxima conversión en el instante en que la alimentación entra al tanque. Es decir que en cualquier punto de este reactor las concentraciones son iguales a las de la corriente de salida. Además,

la velocidad de reacción para cualquier punto dentro del tanque es la misma y suele evaluarse la concentración de salida ofreciendo un mezclado de alta eficiencia que se aproxima a las condiciones ideales.

2.6.7. Reactor PFR

Estos reactores trabajan en estado estacionario, de manera que las propiedades en un punto determinado del reactor son constantes con el tiempo. Este modelo supone un flujo ideal de pistón y la conversión es función de la posición. Además, la composición del fluido varía de un punto a otro a través de la dirección del flujo, por lo que el balance para un componente dado de la o las reacciones químicas implicadas debe realizarse en un elemento diferencial de volumen.

2.6.8. Reactor Auger

El concepto de reactor Auger también presenta una mezcla mecánica de biomasa y un medio de transferencia de calor sólido a granel. Sin embargo, en lugar de que el recipiente del reactor gire, hay dispositivos de mezcla que giran dentro de un recipiente de reacción horizontal estacionario. Típicamente, la biomasa y el portador de calor se dosifican independientemente en el reactor, y el portador de calor se calienta antes de entrar al reactor. La Figura 5 muestra un reactor con dos tornillos sin fin. Sin embargo, un único sin fin o similar también se puede usar un implemento de mezcla mecánica.

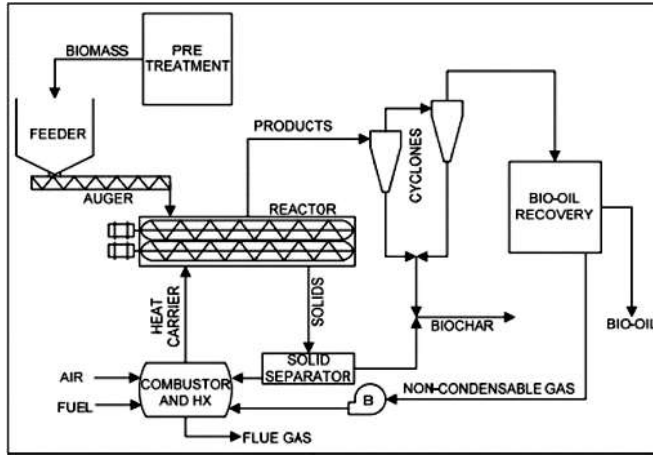


Figura 5. Reactor Auger con dos tornillos sin fin. Fuente [2]

A medida que los productos de vapor se generan salen del reactor debido a las diferencias de presión, mientras que los materiales sólidos, incluido el biochar y el portador de calor, salen al final del reactor. Al igual que en diseños anteriores, parte del biochar sale del reactor Auger junto con los productos del vapor y se elimina utilizando ciclones. Para separar el biochar del material portador de calor, se puede emplear un dispositivo separador sólido basado en diferencias de tamaño o densidad de las partículas.

Siguiendo la línea de los reactores de cono rotativo y lecho fluidizado circulante (CFB, por sus siglas en inglés), un intercambiador de calor combinado y un reactor de combustión recalientan el portador de calor antes de reintroducirlo al reactor Auger. Por otro lado, la Figura 6 muestra un reactor Auger en el que no separa el biochar del portador de calor. En un enfoque similar al reactor CFB, el biochar se quema para recalentar el portador de calor recirculado.

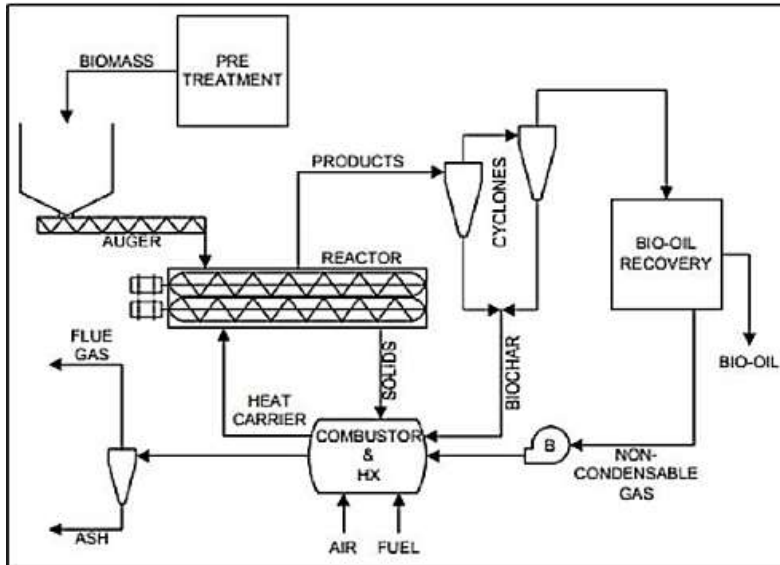


Figura 6. Reactor Auger sin separación de Biochar. Fuente: [2]

El reactor de barrena tiene ventajas y desventajas similares al reactor de cono giratorio. Como no se necesita gas de fluidización, se puede obtener un volumen de reactor más pequeño que tiene el potencial de disminuir los costos de capital. El desgaste mecánico es un problema potencial con este reactor. Este concepto no se ha demostrado a gran escala y no se conoce ningún sistema comercial en funcionamiento. Esta tecnología aún se encuentra en la fase de investigación y será revisada a profundidad en la siguiente sección.

3. Diseño del reactor

En este capítulo se abordará el proceso de diseño, fundamental en el desarrollo de este proyecto. Se iniciará con la selección de modelos de diseño encontrados en proyectos similares, comparándolos con el diseño desarrollado en este trabajo. Posteriormente se describirá el diseño de la estructura de soporte del reactor, la tolva de alimentación y el tornillo sin fin.

3.1. Valoraciones de diseño

Aunque cada equipo tiene sus propias características, en este estudio se proponen las siguientes consideraciones mínimas que sirven como base para el diseño del reactor AUGER desarrollado en esta investigación:

- Versatilidad para la aplicación en cualquier sistema de producción industrial.
- En términos dimensionales, debe ser menor comparado con otros equipos industriales utilizados en el ámbito de mezcla industrial y campos relacionados.
- La técnica de mezcla debe ser continua eliminando tiempos muertos dentro del proceso.
- El sistema debe ser hermético para evitar contaminación del medio con el material que se está tratando.
- La cantidad de elementos rodantes debe ser la menor posible, además, de fácil mantenimiento.
- Su proceso de fabricación debe ser de carácter nacional sin restricciones de accesorios por tiempos de importación.
- El tiempo de permanencia del material en el proceso de mezcla debe ser de 10 segundos.

- Su consumo de combustible debe ser lo más ahorrativo posible.
- Se requiere que sus niveles de contaminación ambiental concernientes a la emanación de CO₂ sean los más bajos posibles.

3.2. Condiciones de operación

Antes de desarrollar las propuestas de diseño, es fundamental establecer las condiciones de operación propias del proceso que se llevará a cabo en el prototipo de reactor en esta investigación. Puntualizaremos la búsqueda de información sobre las condiciones de operación para la pirólisis rápida de biomasa, siendo las características de la biomasa el factor primordial para maximizar el rendimiento del líquido. Para garantizar un calentamiento rápido y una completa estabilización, se requiere que la biomasa esté compuesta por pequeñas partículas. Aunque el tamaño de partícula puede variar según la tecnología de reactor utilizada, se acuerda generalmente un tamaño de partícula alrededor de 2.0 mm. Otro paso previo es la reducción del contenido de humedad de la biomasa, con un requerimiento típico de alrededor del 10 % en peso o menos, lo que minimiza la presencia de agua en el bioaceite final y reduce los requisitos de energía térmica para la reacción [21].

Como bien se sabe la pirólisis rápida es un proceso endotérmico, con calor sensible requerido para llevar la biomasa de las condiciones ambientales a las de reacción. El régimen de temperatura debe estar por encima de los requisitos de calor sensible. Las reacciones rápidas de pirólisis requieren una adición mínima de calor. Daugaard et al. estimaron un calor total para la pirólisis que varía de 1.0 a 1.8 MJ/kg dependiendo de la materia prima [31]. Es fundamental que el calor se transfiera de manera rápida a la biomasa en el proceso de pirólisis rápida, y se han investigado y desarrollado diversos mecanismos y configuraciones de reactores con el fin de lograr este objetivo de manera eficaz. Se han reclamado velocidades de calentamiento del orden de 103 °C/s [4]. Si la biomasa se calienta lentamente, se producen reacciones secundarias y se forman más productos sólidos a medida que disminuyen los ren-

dimientos líquidos [32]. Por esto es necesario asegurar la velocidad y la selección de materiales para que trabajen bajo estas condiciones de temperatura sin sufrir deformaciones.

3.3. Selección de materiales

Se necesita un material con buenas propiedades de resistencia mecánica capaz de soportar altas cargas a una temperatura elevada y que pueda mantener una superficie limpia, por esto el material seleccionado es el acero inoxidable AISI 316. En la Tabla 2 se muestran las propiedades térmicas críticas del material a considerarse en este caso.

Tabla 2. Propiedades térmicas del material.

Coefficiente de expansión térmica	
Rango de temperatura (°C)	Coefficiente
200-100	16.5×10^{-6}
20-500	18.2×10^{-6}
200-1000	19.5×10^{-6}
Conductividad térmica	
Rango de temperatura (°C)	W/m*K
20-100	14.6

Se puede observar que el material cuenta con un bajo coeficiente de expansión lineal y baja conductividad térmica a altas temperaturas, lo que influye a la hora de su selección, teniendo en cuenta que este material será utilizado para realizar el intercambio de calor entre las dos sustancias y estas propiedades son necesarias. Una de las principales ventajas del reactor Auger es que es esencialmente mecánico, por lo tanto, unas buenas propiedades mecánicas son esenciales a la hora de elegir el material. En la Tabla 3 se muestran las propiedades mecánicas del material obtenidas de la ficha técnica del distribuidor [32].

Tabla 3: Propiedades mecánicas del material.

Propiedad	Valor
Resistencia a la tensión	205 MPa
Resistencia última a la tensión	515 MPa
Dureza	95 RB

3.4. Dimensionamiento del reactor

Para poder comprender el dimensionamiento del tornillo, se muestra en la Figura 7 una imagen extraída del diseño propio, tomando como ejemplo las investigaciones de Savgorodny, en la que se pueden apreciar las principales dimensiones del tornillo:

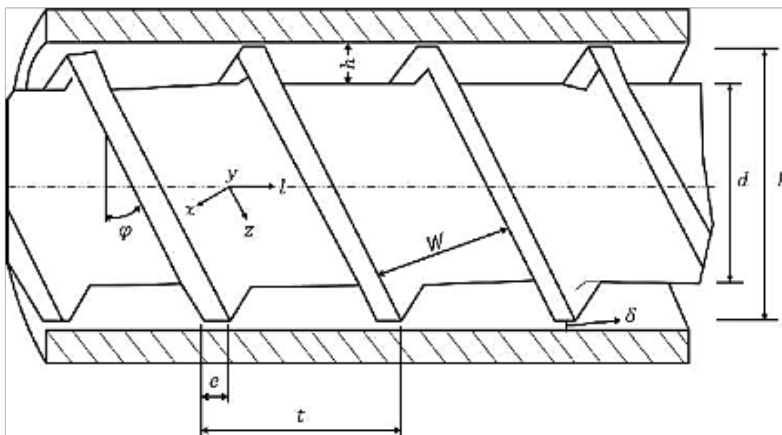


Figura 7. Esquema del reactor.

- d : Diámetro interior.
- D : Diámetro exterior.
- W : Ancho del canal
- e : Espesor de filete
- Paso del hilo ϕ Angulo de hilo δ Tolerancia entre pared de la omega y el filete del tornillo.

En las siguientes subsecciones se explicará cómo fue el diseño de las piezas críticas necesarias para el óptimo funcionamiento del reactor. Es importante resaltar que este proceso se realizó únicamente para las piezas claves del equipo, respaldado por análisis matemáticos. Por tal motivo es posible que se presenten discrepancias en el resultado final de la pieza, una vez que sean mecanizadas.

3.4.1. Diseño de Tornillo Sin Fin

En la actualidad existen diferentes empresas especializadas en la elaboración de tornillos sin fin, por lo general en su mayoría se enfocan en estándares para producción en masa. Pero a la hora de diseño del tornillo se tuvo en cuenta la dimensión del reactor y el tipo de biomasa a tratar. En la Figura 8 se muestra un tornillo con un canal, por lo general estos tornillos son fabricados giratorios dentro de un cilindro fijo. Pero para tener una mayor compresión se supondrá que el tornillo esta fijo mientras el cilindro gira. Del tornillo se tienen direcciones positivas en los ejes X, Y y Z del sistema de coordenadas fijas y también es posible obtener los ejes auxiliares que van de manera longitudinal al tornillo. El Angulo de hilo del tornillo se obtiene de la siguiente expresión:

$$\phi = \arctan\left(\frac{t}{\pi * D_{ext}}\right) \quad (1)$$

Al evaluar la anterior expresión, con los valores $t = 33\text{mm}$ y $D = 32\text{mm}$ se obtiene que $\Phi = 18.18^\circ$



Figura 8. Corona de tornillo sin fin.

Para determinar el número de revoluciones o filetes que tendrá la corona, es fundamental considerar el tipo de tornillo que se usará, ya que el paso del tornillo guarda una relación inversamente proporcional con la cantidad de revoluciones y, a su vez, está directamente relacionado con el tiempo de residencia en el equipo. Los filetes se unirán mediante soldadura tipo TIG y se ensamblarán de forma longitudinal, como se ilustra en la Figura 8. Para hallar la velocidad axial del tornillo, se expresará en función de velocidad de giro, esto para determinar que a medida que aumenta el paso, la velocidad disminuye. Esta relación es especialmente relevante en velocidades de giro bajas, donde los controladores no operan con tanta precisión. Es esencial comprender que el tiempo de permanencia de la biomasa en el sistema de reacción será de aproximadamente 16 segundos, lo que corresponde al tiempo que tarda una partícula en recorrer el tornillo desde el punto de inicio hasta el final con una velocidad axial constante.

Por otro lado, a la profundidad del canal, diferencia del radio externo y el radio interior del tornillo sin fin, se le asignó una dimensión de 8.5 mm, para poder dejar un mínimo espacio de libertad a los tornillos giratorios. Para hallar la tolerancia entre el diámetro externo del tornillo, el espesor del filete y las paredes inferiores de la omega o sistema, se requieren las siguientes ecuaciones:

$$\delta = 0.002 * D \quad (2)$$

Donde δ , es la tolerancia entre el barril y el tornillo sin fin.

$$e = 0.12 * D \quad (3)$$

Donde e , es el espesor del filete del tornillo. Teóricamente debería ser 3.84 mm, pero por comodidad a la hora de mecanizar la pieza y su posterior rectificada en el torno se trabaja con un espesor de 3 [mm]. Un caso similar ocurrió con la tolerancia entre la base de la omega y el filete. Según cálculos tiene un valor de 0.064 mm, pero se aproximó a 0.5 mm tomando como consideración que en los talleres metalmecánicos es imposible llegar a tener dicha precisión. Ver la Tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones obtenidas.

Dimensiones	
Largo (mm)	600
Diámetro externo (mm)	32
Diámetro interno (mm)	16
Paso de tornillo (mm)	33
Ángulo de hilo (°)	18.18
Espesor de filete (mm)	3
Tolerancia con omega (mm)	0.5

Para cumplir con las dimensiones específicas del sinfín y los requisitos mínimos de área y volumen, y con el objetivo de evitar interferencias y simplificar el proceso de construcción, se empleará el software de diseño mecánico en 3D, Solidworks, para diseñar el sistema transportador de calor. Con el fin de disminuir el espacio muerto en el diseño, se ha decidido dar una forma en omega a la sección transversal donde se ubicarán los tornillos, en contraste con la forma rectangular utilizada en el diseño FZK. Para la implementación de un único tornillo Auger, se utilizará una sección transversal de forma circular. Para obtener información detallada sobre las dimensiones y la figura, se pueden consultar los anexos.

Expansión térmica radial. Con los cálculos anteriores es posible determinar la tolerancia que existe entre el tornillo sin fin y la pared de la omega, cuando hay una dilatación debido a las altas temperaturas. La ecuación que permite calcular la dilatación térmica radial es:

$$\Delta r = 2\pi * r_0 * \alpha (\Delta T) \quad (4)$$

Dónde:

- Δr : es la diferencia entre el radio inicial del sinfín y radio final expandido.
- r_0 : coeficiente de dilatación térmica lineal del acero.
- ΔT : es la Diferencia de temperatura final e inicial.

Con la información anterior se puede expresar la tolerancia, utilizando la siguiente ecuación:

$$\delta = \Delta r_{\text{omega}} - \Delta r_{\text{tornillo}} = 2\pi * (r_{0\text{omega}} - r_{0\text{tornillo}}) * \alpha(T_f - TT) \quad (5)$$

Reemplazando con los datos conocidos, se obtiene la siguiente expresión:

$$\delta = 3.45 * 10^{-5}(T_f - 273K) \quad (6)$$

Con la ecuación anterior, bastaría introducir la temperatura final para determinar la tolerancia entre la omega y el tornillo. Por ejemplo, si se considera que la temperatura alcanzará los 1000°C como condición extrema de operación, la tolerancia sería de 0.034 mm. Aunque esta distancia es muy pequeña, en las condiciones de operación habituales no afectaría negativamente el funcionamiento del equipo. Sin embargo, es un valor a tener en cuenta, debido a que un aumento excesivo podría generar fricciones que impedirían el funcionamiento óptimo de la máquina y potencialmente ocasionar averías en algún componente.

3.4.2. Dimensionamiento de la Omega o Barril

La omega con el tornillo sinfín es el conjunto de piezas más importante del reactor. En este componente, se lleva a cabo la función de pirólisis, y la omega es la frontera entre las resistencias cerámicas, los tornillos y la materia prima de estudio. Con el fin de garantizar precisión y evitar fricciones innecesarias, se estableció una tolerancia de 0.5 mm entre el piso de la omega y los tornillos, lo que influye en su diseño. Este modelo se ha concebido para prevenir que la materia, objeto de estudio, se adhiera a las paredes sin ser procesada. Al diseñar la omega, se tuvo en cuenta tanto el radio de los tornillos sin fin como la forma en la que esta se apoyaría en las resistencias cerámicas. Debido a la complejidad de su ensamblaje, la omega se dividió en tres partes fundamentales durante el proceso de mecanizado. Inicialmente, se creó una placa para la parte superior, la cual se sometió a un doblado con un radio de 35°.

Para las bases o pisos de la omega, se emplearon dos placas con la

longitud correspondiente y se aplicó un doblado con un radio de 17.5° en cada una. Para la unión de las piezas, se consideraron los esfuerzos a los que estaría sometida la estructura y el acabado final deseado. Para ello, se utilizó soldadura especializada en aceros TIG, que cumple con los requerimientos necesarios para esta unión. El material empleado tenía un espesor de $\frac{3}{4}$, lo que garantiza que no se deforme a altas temperaturas. Este proceso de fabricación se ilustra en la Figura 9.

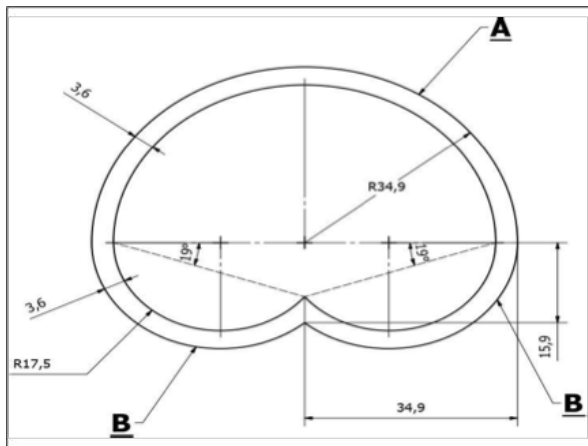


Figura 9. Diseño propuesto para la sección transversal.

El largo requerido para cumplir con todas las especificaciones anteriores es de 600 mm, aunque es probable que se modifique de manera mínima esta medida, porque depende de la dimensión de la resistencia y de la estructura de soporte donde reposará el sistema de reacción.

3.4.3. Dimensionamiento de las resistencias cerámicas

La resistencia se diseñó en forma de cama para alojar la omega. Este tipo de resistencia eléctrica posee una superficie interna con estructura de malla y su componente principal es el cobre, que permite alcanzar altas temperaturas. Para llevar a cabo el proceso de pirólisis rápida se requiere alcanzar una temperatura entre 500°C y 800°C . Con el propósito de controlar estas temperaturas elevadas y maximizar la eficiencia del equipo en el proceso, una vez instalada la resistencia y la omega, se las recubrió completamente con fibra de vidrio para evitar pérdidas de calor.

Para hallar la potencia necesaria para la resistencia eléctrica, se tomó como base la temperatura mencionada y se realizó un balance de energía. Se puede analizar el modelo del problema como si fuera un tubo de cañería, donde la pared interior se encuentra a 600 °C y el entorno del laboratorio a una temperatura ambiente de 23 °C. Los radios de la omega corresponden a los de su base inferior y superior. La potencia mínima requerida en condiciones ideales para elevar la temperatura de la pared interna de la omega a 600 °C es 240 W. Como este valor representa un mínimo, se debe aplicar un factor de seguridad que garantice el buen funcionamiento de los dispositivos.

3.4.4. Consideraciones generales del reactor

A continuación se exponen las justificaciones que respaldan la elección de las piezas y de los diferentes sistemas utilizado para alcanzar el proceso de pirólisis rápida.

Sellado. El reactor debe operar en una atmósfera inerte, es decir que debe estar completamente aislado del exterior. El sistema empleado para evitar las filtraciones, salida de líquidos o vapores, es el uso de bridas con sello de silicona italiana con alta capacidad de resistir temperaturas elevadas. Este sello de silicona es aprisionado por las bridas a medida que se aprietan los pernos del sistema, con lo que se logra el sellado de manera mecánica. En la Figura 10 se explica el sellado.

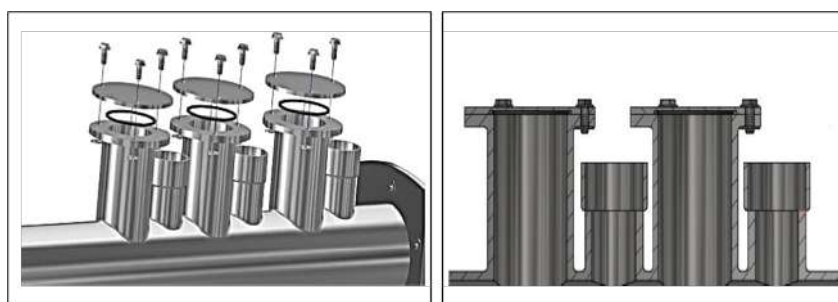


Figura 10. Sistema de sellado para el transportador de calor.

Alineación de los tornillos sin fin. La alineación precisa de los tornillos es fundamental para el buen funcionamiento, evitando así la generación de fricción con la parte inferior de la omega. Esta fricción podría generar desgaste en las piezas y provocar desbalanceo durante la operación. Dicha alineación adquiere relevancia significativa dado que la tolerancia entre la omega y los tornillos se redujo a 0.5 mm.

Por lo general las alineaciones en la industria se hacen con rodamientos, pero en este caso se descartó debido a las altas temperaturas de trabajo (unos 200 °C), que podrían causar la quema de la grasa que cubre los rodamientos. Teniendo en cuenta el criterio anterior se implementó un sistema de alineación mediante el uso de bujes metálicos, que permiten la posibilidad de trabajos en condiciones extremas, gracias a sus propiedades físicas como la resistencia al roce y soporte de altas temperaturas.

Se fabricaron bujes de bronce fosfórico, destacados por su alta resistencia, bajo coeficiente de fricción y tenacidad. El fósforo presente en este material reduce la viscosidad del metal en estado fundido y lo hace adecuado para entornos de trabajo donde el desgaste constante y la corrosión química son motivo de preocupación. También se utiliza como diafragmas, bujes, ejes, cojinetes, arandelas de empuje, fuelles y piezas de válvulas [33].

La principal función del buje es ser la pieza de apoyo que permite el giro del eje del tornillo. Su superficie exterior se apoya en la tapa inferior de la omega, mientras que la pared interior del buje se apoya en el eje del tornillo. Esto quiere decir que para lograr el centrado del tornillo, es necesario alargar el eje del sinfín por ambos lados para proporcionar una superficie de apoyo al buje.

De esta forma, el eje del tornillo resbala sobre la pared interior del buje, permitiendo el giro mientras se asegura su centrado. La Figura 11 ilustra el diseño y función del buje en el sistema.



Figura 11. Buje de bronce fosfórico.

Delimitación física del reactor. Para evitar la salida de gases y el ingreso de agentes contaminantes en la pequeña abertura que delimita los bujes y el volumen del reactor cerca de la conexión con el sistema de engranes, se implementaron sellos doble labio, fabricados de un material a base de polímero elástico lubricado y que tienen como función principal evitar fugas gaseosas y líquidas de un entorno a otro. En la mayoría de los casos, este tipo de sellos son usados en la industria de autopartes o en sistemas que involucran rodamientos [34]. Estos sellos, además de cumplir su función, también ofrecen la ventaja de asegurar los tornillos, como puede apreciarse en la Figura 12.



Figura 12. Sello doble labio.

3.5. Sistema de tolvas

En todo sistema de reacción es esencial contar con un componente encargado de suministrar los materiales necesarios. En este sentido, la tolva desempeña dicha función al permitir que la materia a estudiar caiga por gravedad hasta llegar al tornillo sin fin. El diseño del cuello de la tolva se ha concebido de manera que se encuentre cercano a la omega o a la tubería del transportador energético, que en este caso es granalla de acero inoxidable, con el propósito de evitar la acumulación y pérdida de material.

La tolva recibe todos los elementos necesarios para el proceso de reacción, lo que resulta en una mezcla de aire en su interior, lo cual no es conveniente porque se requiere de una atmósfera inerte, por lo tanto se ha previsto que la tolva cuente con una tapa removible que garantice la función de hermetismo una vez se haya cargado el material deseado permitiendo así, controlar las condiciones de operación a la hora de ingresar al sistema de reacción.

Como medida de seguridad, se agregó una válvula de seguridad en la parte inferior para evitar la caída de material de manera no deseada. Además, se realizarán dos perforaciones en la tolva para la entrada y salida del gas inerte que se utilizará, con el fin de desplazar el volumen de aire presente en su interior. Cabe mencionar que para operar en las condiciones adecuadas de pirólisis (volumen libre de aire), la tolva debe regular el paso del gas inerte hacia el interior y exterior del reactor. Por ello, la última consideración de este sistema consiste en añadir una mini válvula de bola en la salida del gas inerte contenido en la tolva, la cual presenta una resistencia de 18 Ohmios y una corriente de 13.5 Amperios. Todo lo anterior se explica en la siguiente Figura 13.

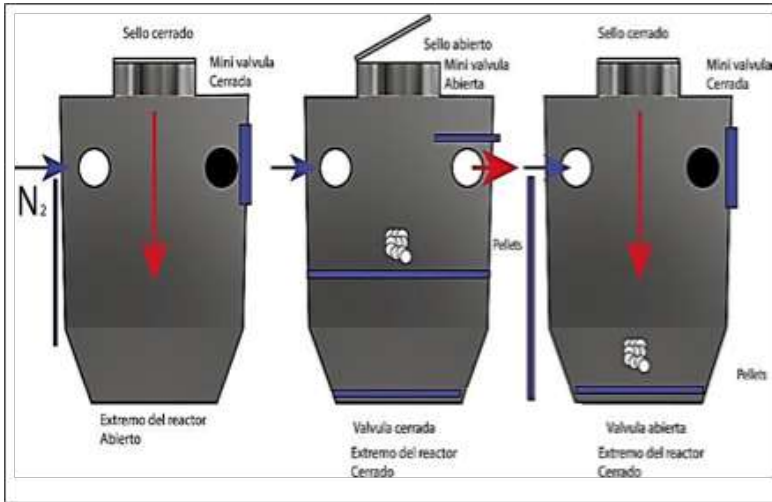


Figura 13. Funcionamiento del sistema de seguridad de la tolva.

3.6. Sistema de trampa de recolección de producto

Los productos obtenidos por el método de pirólisis son variados, dependiendo de la necesidad o condiciones que de la operación o del tipo de mezcla que se ingrese al reactor. De esta manera y de acuerdo a lo revisado en la bibliografía, se obtienen sólidos (fracciones de polímero sin reaccionar, coque, residuo carbonoso o catalizador), ceras (fracciones sólidas de textura cerosa con número de 48 carbonos por lo general sobre el C22), líquidos (compuestos de cadena corta, usualmente entre el C5 y el C21) y gases (compuestos no condensables entre el C1 y el C4).

Esta investigación se centra en la parte física de tres sistemas importantes para el proceso de pirólisis y deja abierta las condiciones para añadir componentes extras o modificaciones futuras en las zonas de extracción o recolección del producto. En el caso de líquidos y sólidos al final de la omega, hay una cavidad por donde los productos salen del

sistema por acción y efecto de la gravedad. Caso contrario ocurre con los gases, siendo un trabajo más complejo porque se busca recolectar muestras en diferentes puntos de reacción, por tal motivo se instalaron válvulas en diferentes posiciones para poder realizar la toma de muestra en con condiciones diversas.

3.7. Cálculo de flujo en el sistema de reacción

Existen empresas especializadas en el diseño y fabricación de tornillos sin fin. Sin embargo para cumplir con los requerimientos específicos de los tornillos que necesitamos, se deben mecanizar los tornillos a la medida para garantizar el óptimo funcionamiento del sistema. Dado que no son estándar, se han considerado diversos factores matemáticos, químicos y físicos a los que los tornillos estarán expuestos durante el proceso.

3.7.1. Caudal del Sistema Transportador

Para conocer el flujo volumétrico o el caudal que pasaría por el sistema de reacción es importante determinar tres tipos de flujos que están representados por la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = \left(\frac{\alpha k}{k + \beta + \gamma} \right) \eta \quad (7)$$

Donde:

- \dot{V} : es el flujo volumétrico.
- α : denota el flujo de arrastre.
- β : es el flujo de presión.
- γ : es el flujo de filtración.
- K : es la constante total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora.
- η : denota la velocidad de giro del tornillo.

Cada flujo tiene una relación entre el tornillo y algunos componentes del sistema, y se definen en una ecuación diferente. Estos cálculos fueron tomados del autor Savgorodn, donde se muestra la construcción de una extrusora de plástico a partir de ciertos parámetros y cálculos matemáticos [35].

3.7.2. Flujo de arrastre o fricción

El flujo de arrastre hace referencia al esfuerzo hecho por el tornillo para arrastrar la mezcla y las fuerzas de fricción, entre la biomasa y las paredes de la omega. Y depende de la velocidad de giro del tornillo, al igual que el flujo de presión y filtración. Este flujo se puede entender de mejor manera si se analiza como el resultado de las fuerzas viscosas, provocadas en un flujo entre una placa estacionaria y móvil. Así tenemos: $\alpha=11.56 \text{ cc}$.

3.7.3. Cálculo del flujo de presión

Gracias a la profundidad que posee el tornillo, genera internamente una gradiente de presión que aumenta a medida que el tornillo se acerca al dado. Esta gradiente afecta un flujo ficticio denominado como flujo de presión. En este caso el valor es: $\beta= 7.5810^{-4} \text{ cc}$.

3.7.4. Cálculo de flujo de filtración

Este cálculo permite conocer las posibles fugas provocadas entre la omega y los tornillos, en un espacio inexistente. Tenemos que $\gamma=1.44 \cdot 10^{-6} \text{ cc}$. Con base a los cálculos de flujo, se observa que presión y filtración son muy pequeños, y que no se tendrán en cuenta para la hallar el flujo de caudal. Tampoco es posible hallar la constante total de cabeza k, debido a que el reactor no posee un dado de extrusión y las diferentes dimensiones de este son las que le dan el valor al término. Con lo anterior la Ecuación quedará expresada así:

$$\dot{V} = \alpha * \eta \quad (8)$$

3.7.5. Obtención de una curva para los tiempos de residencia

En el proceso de pirólisis se obtienen diversos productos como resultado de la reacción. Sin embargo, cada producto presenta un tiempo de residencia distintivo, debido a que algunos compuestos experimentan cambios de estado. El tiempo de residencia se refiere al periodo que una partícula tarda en ingresar al sistema de reacción y recorrer la longitud del tornillo, dependiendo de las RPM (revoluciones por minuto) que este último tenga.

3.8. Cálculo de la potencia requerida para el tornillo

La potencia requerida para mover un tornillo sinfín se divide en tres componentes: potencia para mover el material, potencia para mover el tornillo sin carga y potencia para compensar la inclinación del sinfín. Es importante resaltar que los cálculos se realizaron considerando un solo tornillo, con el fin de facilitar su comprensión.

3.8.1. Potencia para mover el material

La siguiente fórmula determina la potencia requerida para transportar el material dentro del reactor:

$$P_H = \frac{\dot{m} * L * \gamma * g}{3600} \quad (9)$$

Donde:

\dot{m} : es el flujo másico. En este contexto de diseño, se utilizará un valor por encima de lo normal para garantizar un margen de seguridad en la operación del equipo, incluso bajo condiciones no especificadas. Para nuestro caso $\dot{m} = 100 \frac{g}{min}$.

γ : es el coeficiente de fricción del material transportado (asumido como 0,25 en la biomasa) [36].

g : es la aceleración de la gravedad.

Al reemplazar los valores se obtiene: $P_H = 2.45 * 10^{-3} kW$

3.8.2. Cálculo de la potencia requerida para mover el tornillo

Para determinar la potencia contamos con la siguiente expresión:

$$P_N = \frac{D * L}{20} \quad (10)$$

$$P_N = 9.6 * 10^{-4} kW.$$

3.8.3. Cálculo de la potencia requerida para la inclinación del tornillo

Al no haber inclinación en el funcionamiento del equipo el valor para esta variable es 0 (cero).

3.9. Diseño del sistema de control para el movimiento de los tornillos

El sistema de movimiento del tornillo está formado por el motor y su variador de revoluciones, cuya interacción determina tanto el tiempo de residencia en el reactor como el torque que el tornillo aplicará a la mezcla.

3.9.1. Elección del motor

Para la elección del motor se considerarán los datos de los tiempos de residencia de las partículas dentro del sistema de reacción, donde se han obtenido tiempos entre 0.2 y 0.3 minutos para velocidades de 90 y 60 RPM, respectivamente. De esta manera, el primer factor a tener en cuenta para la selección del motor es que cuente con una caja reductora que permita, que el giro de salida del equipo se encuentre en ese rango específico. Es importante tener en cuenta que el tiempo de residencia varía de forma inversa a la velocidad de rotación del motor, lo que significa que pequeñas variaciones en las velocidades de rotación más bajas pueden ocasionar cambios significativos en el tiempo de residencia. Por lo tanto se sugiere que el giro de salida del motorreductor esté más orientado a las velocidades bajas que a las altas. Con estas consideraciones como base, se seleccionará un motorreductor con características que se ajusten a las condiciones del reactor, de $\frac{1}{4}$ HP de la marca JWD con referencia 90GK18, cuya potencia es adecuada para cubrir las necesidades del equipo, como se ilustra en la Figura 14.



Figura 14. Motor seleccionado.

El reactor Auger, al ser de tipo mecánico, requiere de un sistema de transmisión de potencia que incluye una catarina, un engrane y un rodamiento acoplados al motor elegido. También fue necesario utilizar una transmisión indirecta de potencia debido a la ubicación del motor con respecto a la catarina que conectaba los dos tornillos sin fin. Es importante señalar que los resultados matemáticos se utilizaron para la selección del motor del sistema de reacción y también para elegir el motor del sistema de alimentación. La potencia transmitida por el motor es de 0.14 HP, teniendo en cuenta la eficiencia del motor y la transmisión. El torque transmitido por los tornillos a 90 RPM y 60 RPM es de 11.08 Nm y 16.60 Nm, respectivamente.

3.9.2. Variador de frecuencia

Para seleccionar el variador de frecuencia fue necesario considerar la zona geográfica porque de ella depende la frecuencia de operación del mismo. En el caso de Colombia, los variadores de frecuencia operan a 60 Hz y un voltaje de 110 V. La velocidad de giro de un motor es directamente proporcional a la frecuencia de la red eléctrica e inversamente proporcional al número de polos que posee el equipo, por ello, la disminución de este valor genera una menor velocidad de giro en el tornillo mientras que el aumento provoca un giro más veloz.

Para un óptimo funcionamiento el equipo debe contar con una potencia mayor o igual a $\frac{1}{4}$ Hp, que es la del motorreductor. Además, debe poseer una entrada monofásica que alimente el sistema de control del movimiento del tornillo y una salida trifásica, que le permita alimentar el motor de iguales características. Por ello se pensó en un variador de frecuencia de $\frac{1}{2}$ Hp con una entrada monofásica de 220 V y una salida trifásica de la marca WEG, de la línea CF300, que ofrece la ventaja de cambiar el sentido de giro de los tornillos si fuese necesario. Este Variador de frecuencia se ilustra en la Figura 15.



Figura 15. Variador de frecuencia.

3.10. Diseño del sistema de control de temperatura

El control de temperatura resultó un reto, porque buscaba tener una mayor independencia entre las temperaturas del sistema de reacción y el sistema portador de calor. En cada sistema se instaló una resistencia cerámica dividida en tres piezas que forman un único conjunto para mayor comodidad. Por otro lado, para el manejo de las temperaturas de las resistencias, se implementó un sistema de control de lazo cerrado compuesto por un controlador, un sensor y un efector, donde la señal eléctrica será transmitida a este último y enviada a través de un relé. El sistema de control se puede observar en la Figura 16.



Figura 16. Esquema del sistema de control.

3.10.1. Controlador PID

Los controladores son los equipos encargados de comparar la señal de entrada con el valor medido por el sensor, determinando la ejecución o no de una señal eléctrica. Esos controladores pueden emplear diferentes algoritmos de comparación, entre los cuales se incluye la acción proporcional, la acción derivativa, la acción integral y la combinación de las mismas [37]. La acción proporcional es aquella que ejecuta una acción proporcional al error, entre la entrada de señal y el sensor. Si la diferencia es mínima, se ejecutará una acción de menor magnitud, pero si la diferencia es mayor dará lugar a una acción más intensa. Sin embargo, este proceso tiene una desventaja, no considera la variable tiempo como variable, lo que puede ser problemático en situaciones de respuesta rápida[38].

Para un funcionamiento óptimo, el controlador PID mezclar todas las acciones mencionadas anteriormente, lo que contribuye a disminuir el error en estado estacionario. Por esta razón se optará por un controlador PID, que ofrece la ventaja de generar una respuesta más estable y con capacidad predictiva. El equipo seleccionado será de la marca SIMATIC, con referencia CPU 1214CDC.

3.10.2. Relé

La función principal de un relé es abrir o cerrar los contactos mediante una señal presente en el circuito eléctrico. Los relés tienen la ventaja de contar con contactos que funcionan como interruptores en el circuito eléctrico integrado. Comúnmente para saber cuándo un circuito está energizado, se dice que el contacto está abierto (NO), pero si es el caso contrario, se dice que el contacto está cerrado (NC). Cada zona de temperatura en el reactor cuenta con su propio relé para activar el conjunto de resistencias cerámicas. Estas resistencias, fabricadas con cemento cerámico (Concrax 1500) y alambre Kantal, tienen una potencia de 325 W cada una y alcanzan las temperaturas deseadas.

Para nuestro caso, se requiere una corriente mínima de 4.54 A, por lo tanto el relé debe tener una corriente de salida mayor a este valor. Es importante asegurarse de que la señal de entrada de corriente continua que recibe el relé esté dentro del rango igual o mayor al de la señal de salida del controlador. Tanto las resistencias como el controlador del reactor deben ser alimentados con una corriente de 220 VAC. De acuerdo a las condiciones se optará por un relé en estado sólido con corriente de salida de 10 A, alimentación de 220 VAC y que acepte señales entre 3 y 32 VDC.

3.10.3. Termocuplas

Son transductores que tienen como finalidad medir la tensión que se produce entre los dos metales que lo componen, unidos en un extremo. Cuando dicha unión se calienta o se enfría se produce una diferencia de potencial pequeña, enviando una señal que modifica su magnitud en función de la temperatura. Debido a las condiciones extremas de trabajo que se tendrán en el reactor, se escogerá el uso de las termocuplas tipo K por soportar temperaturas de hasta 900 °C y presentar una rápida respuesta al cambio.

3.11. Otras consideraciones

3.11.1. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico del reactor está diseñado para prevenir sobrecargas en las líneas del equipo, cumpliendo con la norma técnica colombiana NTC 2050. El reactor posee tres sistemas eléctricos completamente independientes (motor y dos zonas de calefacción), cada uno equipado con un interruptor termo magnético con el fin de evitar daños futuros si sucede un cortocircuito [39]. Cada circuito está protegido por una caja eléctrica de fácil desmonte y traslado, que alberga los enchufes del sistema de calefacción y de los motores, manteniéndolos ocultos para mejorar la estética y seguridad. Se realizará un circuito visible que muestra las operaciones esenciales del reactor.

Este circuito incluye un botón con luz de encendido y apagado, un botón de emergencia que corta toda alimentación eléctrica al equipo si es necesario y un interruptor para controlar la velocidad de los tornillos. También se ha incorporado un botón para cambiar el sentido de los tornillos y una luz piloto que alerta cuando la temperatura sobrepasa los 850 °C.

Finalmente, se implementarán todas las conexiones a tierra necesarias incluyendo las del motor y del reactor, las de las resistencias y controladores, y por último, la de la caja eléctrica para un funcionamiento seguro y confiable del sistema eléctrico del reactor.

3.11.2. Protección de los materiales

El sistema de la tolva y el sistema de reacción están protegidos por una gruesa capa de fibra de vidrio, que permite la conservación de temperatura.

3.11.3. Portabilidad del equipo

El reactor fue diseñado para ser portátil, considerando la facilidad de desmontaje de sus piezas.

3.12. Implementación del equipo

El diseño de reactor se basa principalmente en conjuntos o sistemas que permiten el óptimo funcionamiento del mismo como se ha mencionado en los capítulos anteriores. Otra característica del reactor es que se divide en dos sistemas mayores, uno relacionado con la parte física y funcional, es decir con el sistema mecánico del equipo, mientras que el otro es el sistema eléctrico y de control.

3.12.1. Sistema mecánico

Las piezas que forman parte del sistema mecánico fueron elaboradas en su mayoría en el taller metalmecánico, muy pocas fueron compradas directamente. A continuación las explicamos:

Tolvas. La función principal de la tolva que limita con el sistema de reacción es recibir la materia de estudio en condiciones óptimas para iniciar el proceso de pirólisis. Por otro lado se dispone de otra tolva destinada al depósito el portador energético o de calor (granalla en acero inoxidable). El volumen que recibe la carga que va hacia el tornillo sin fin se caracteriza por almacenar 20 kg, cantidad suficiente para llevar a cabo las pruebas preliminares requeridas. La tolva posee unas perforaciones de $\frac{1}{4}$ que permiten la entrada y salida del gas inerte (nitrógeno) y se implementó, para la salida de nitrógeno, una pequeña válvula de bola que permite la entrada del gas hacia el sistema de reacción. Finalmente, la tolva posee una geometría cónica rectangular para que la materia no se acumule a la hora de llegar al tornillo [39].

Barril u omega de reacción. Este componente es crucial en el proceso de la pirólisis, es donde se mezclan las materias primas ingresadas al reactor para obtener los productos esperados en la investigación. Los sinfines se encuentran centrados gracias a los bujes de bronce fosfórico y a los sellos de doble labio. Es fundamental que el barril esté sellado de manera hermética para evitar el ingreso de agentes contaminantes o la salida de vapores que puedan afectar a la salud de quienes trabajarán con la máquina. Para los extremos terminales del barril se implementaron bridas cuadradas bajo la norma ASME B 16.5, con do-

ble perforación para los bujes y un camino circular para el descanso del sello de silicona. Además, al inicio de los tornillos se conectan al sistema de transmisión de potencia a través de un canal que atraviesa la brida cuadrada para reducir las vibraciones en los tornillos, asegurar que permanezcan balanceados y se mantengan sobre el mismo eje. Finalmente, este sistema cuenta con un revestimiento de resistencias cerámicas protegido por una capa gruesa de fibra de vidrio para conservar la temperatura, descansando sobre una lámina rolada con radio de 250 mm con a tapa superior y a los extremos, garantizando la protección del sistema del barril. Estas resistencias son las encargadas de alcanzar altas temperaturas por periodos de tiempo deseado.

Salida del producto. Este sistema ha sido diseñado para permitir modificaciones futuras. Aunque actualmente cuenta con trampas recolectoras de producto completamente ajustable, puede adaptarse a otros sistemas dependiendo de lo que se desee. Cuenta además, con una salida inferior soldada al barril o la omega, por donde salen productos sólidos y líquidos, que son recogidos en un recipiente para su posterior estudio. En la parte superior, se encuentran tres salidas de gases o vapores. Si se desea se puede dejar una sola conexión disponible mientras las otras dos se tapan herméticamente con bridas ciegas. Se destaca la sencillez con que la fue diseñado el equipo para su fácil armado y desarmado a la hora de hacer un mantenimiento.

Estructura base: Para la estructura base del reactor se empleará una tubería cuadrada de 2” de acero inoxidable, seleccionando este perfil cuadrado por su resistencia y capacidad para soportar altas temperaturas, presiones y elementos destructivos. La tubería cuadrada posee diversos beneficios como uniformidad en sus propiedades mecánicas, paredes con grosor uniforme y concentricidad. Otro beneficio es la resistencia, ya que al estar conformado en frío permite a los tubos cuadrados tener una mayor resistencia a la tensión y un mayor límite elástico. Como se mencionó anteriormente el reactor será completamente portable y se puede apreciar en la Figura 17.



Figura 17. Renderizado estructura base.

3.13. Ensamble del equipo

Con todos los componentes y sistemas armados del reactor, el equipo tendría unas dimensiones aproximadas de: 1.36 m de altura; 0.6 m de ancho y 1.2 m de largo. En la siguiente Figura 18, se puede apreciar el resultado final luego del ensamble.



Figura 18. Renderizado del reactor.

3.13.1. Sistema eléctrico

Para este sistema se tomaron en cuenta las observaciones mencionadas en la parte de diseño. Cada zona de calefacción consume un aproximado de 4.56 A, mientras que cada motor consume un alrededor de 1.22 A, de acuerdo a la información suministrada por el fabricante. En conjunto resulta un amperaje máximo 9.93 A, aproximadamente. De acuerdo con esto, la alimentación del sistema es comandada por un interruptor termomagnético polar de 10 A, que tiene como función principal prevenir eventuales sobrecargas en las líneas eléctricas que van hacia el laboratorio. Es importante recordar que este interruptor corta la fase de la línea eléctrica, por lo que es necesario identificar y asegurar cuando se opere la maquina con un marcador de polos. En caso de emergencia o de un suceso inesperado, contará con un pulsador de emergencia para cortar la alimentación eléctrica en todo el circuito. El pulsador es de estilo hongo, normalmente cerrado, seguido al termo magnético monopolar. Además de lo anterior, se instalará un pulsador con luz de 220 VAC para que una vez alimentado el sistema, señale que el equipo está encendido. En la Figura 19 se puede apreciar estos componentes.



Figura 19. Sistema eléctrico con la cubierta.

3.13.2. Variador de frecuencia y motor

Para cuidar el equipo en caso de una sobrecarga el motor, se ha previsto la instalación de un interruptor termomagnético tripolar de 6 A. Cabe resaltar que según el fabricante, el amperaje del motor es aproximadamente de 0.85 A. Complementario a este interruptor se instalará un contacto trifásico (contactor trifásico ABB A 9-30). Este componente tiene la función de conectar el enchufe trifásico de seguridad (tipo hembra) por un lado, y por otro lado, enlaza con un switch de dos posiciones normalmente abierto de 10 A. Estos elementos se ubicarán en la caja de control eléctrico con la finalidad de que la operación de encendido y apagado del motor se establezca a una frecuencia predeterminedada. Por seguridad, el motor y el variador de frecuencia son conectados a tierra para proteger al operario en caso de una subida de energía del equipo.

3.13.3. Circuito de control de temperatura

En cada zona de temperatura se instalará un interruptor termomagnético bipolar de 6 A. El máximo emparejamiento de cada zona es de 4.54 A, que es el que da el controlador. Desde el controlador salen dos señales, una señal de corriente alterna y otra de corriente continua.

3.13.4. Sistema de recolección de datos

El sistema de adquisición de datos está basado en un CPU Siemens DC1214C con una tensión de alimentación de 24 V. Cuenta con 14 entradas digitales, 10 salidas digitales y 2 salidas analógicas. Para recibir las señales de los sensores ubicados a lo largo de todo el sistema, se utilizaron módulos de entrada analógicas 8AI y 4AI. Para el control, el sistema posee salidas AO que emiten las señales para ser recibidas por la CPU. El proceso de recolección de datos se comunica a través de un PC de escritorio a través de un cable USB y un software desarrollado en LabVIEW, en el cual se monitorea y controla el proceso. En la Figura 20 se muestra la interfaz gráfica del programa desarrollado para este fin.

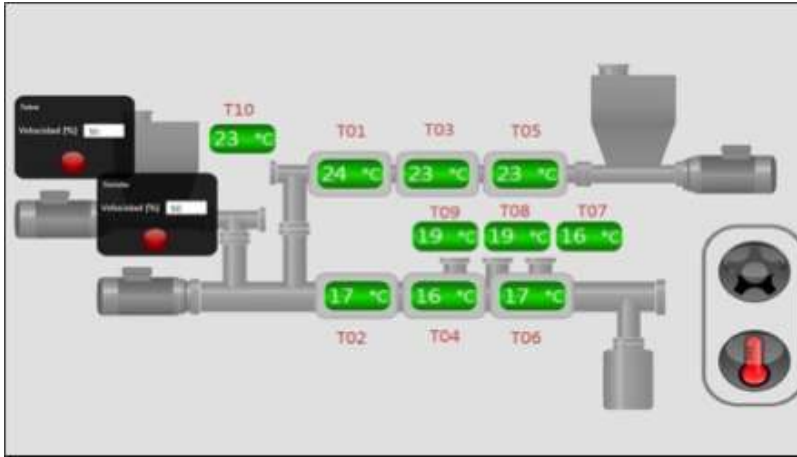


Figura 20. Interfaz gráfica para el monitoreo y la adquisición de datos.

3.14. Otras consideraciones

Para evitar confusiones y conseguir que el alambrado eléctrico se viese estéticamente ordenado, se implementó un sistema de amarres plásticos, espirales plásticas y calugas adhesivas.

3.15. Montaje final

El reactor se manufacturará en la ciudad de Medellín, en el taller metalmecánico IMPEJOY. El taller por segunda vez prestó sus servicios para construir un reactor sinfín y por primera vez construirá uno con doble tornillo, con portador de calor y entrada de nitrógeno. Es un taller que cuenta con la maquinaria adecuada y el personal especializado en temas como gasificadores y reactores de ciclónicos.

3.16. Puesta en marcha del reactor

Después de implementar el diseño y el ensamblaje final del reactor, se realizará la puesta en marcha y las pruebas correspondientes del equipo. El objetivo de esta etapa es obtener las curvas experimentales de temperatura para verificar el funcionamiento real del equipo y garantizar su operatividad.

3.16.1. Calibración de termocuplas

A pesar de que las termocuplas venían calibradas por el proveedor, se realizaron pruebas de verificación de medidas utilizando dos termocuplas ya calibradas. Se tomaron 5 medidas de temperaturas diferentes, tomando como referencia los valores obtenidos por las dos termocuplas previamente calibradas.

3.16.2. Obtención de la curva experimental de temperatura

Para obtener la curva se establecerá una relación entre la temperatura interna del reactor y la temperatura obtenida por las termocuplas. Se verificará la diferencia de temperatura entre las termocuplas propias del reactor y la temperatura experimental a su interior, observando diferencias significativas, que se muestran en la Figura 21.

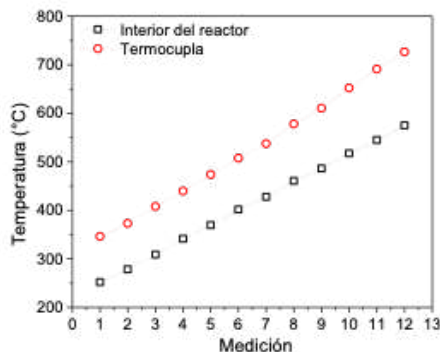


Figura 21. Mediciones de temperatura en el interior del reactor y en la termocupla.

Para realizar lo anterior, se desarrollaron mediciones en intervalos de 30 °C comenzando en 250 °C hasta 675 °C en las zonas 1 y 2, asegurándose que por cada medida el sistema alcanzará el estado estacionario. Luego de ello se registraron los valores que se reflejan en el gráfico. Como se puede apreciar, la serie de temperaturas dentro del reactor se distancian aproximadamente 95 °C en la primera medición, incrementándose a un delta de 150 °C en la última medición. Además, se evidencia un aumento progresivo y lineal en esas diferencias. Al ser estos coeficientes cercanos a 1, se procederá a graficar la temperatura del interior del reactor en función de la temperatura detectada por las termocuplas. El resultado se puede ver en la Figura 22.

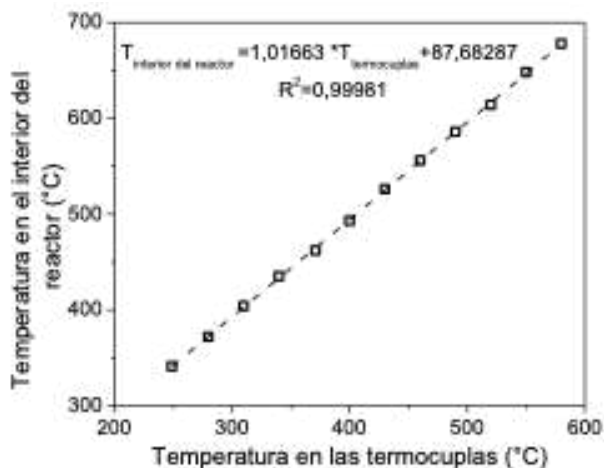


Figura 22. Regresión lineal de la temperatura del reactor vs la temperatura medida por las termocuplas.

La nueva gráfica nuevamente sigue un patrón lineal con un coeficiente de correlación muy cercano a 1 y una ecuación de la recta dada por: $y = 1.01663X + 87.68287$. De este modo, utilizando la fórmula anterior, es posible determinar la temperatura del lecho del reactor en función de lo marcado en las termocuplas. Las fuentes de error que explican este comportamiento son diversas y complejas, incluyendo pérdidas térmicas por conducción tanto axial como radial, la posición de las termocuplas (no se puede saber de manera certera si la termocupla del interior del reactor está en contacto con la pared interior o si se encuentra justo debajo de una chaqueta calefactora), presencia de gas

en el interior del porta termocupla en la zona 2, o si el contacto de las termocuplas con su respectivo porta termocupla está siendo completo o parcial, ya que las termocuplas miden en la punta, y si el contacto es en otra zona o es realizado de manera parcial, los valores se verán afectados). De todo lo anterior, se concluye que la ecuación obtenida es un método efectivo de predicción de la temperatura interior del reactor a partir de lo que se muestra en el panel de control.

3.16.3. Obtención de la curva experimental de la velocidad de giro

Con el fin de conocer la velocidad de giro del tornillo, se tomará la velocidad en relación con la frecuencia enviada por el variador y a partir de esto se realizará una curva experimental. El resultado se muestra en la Figura 23, representando la velocidad de giro del motor en función de la frecuencia del variador.

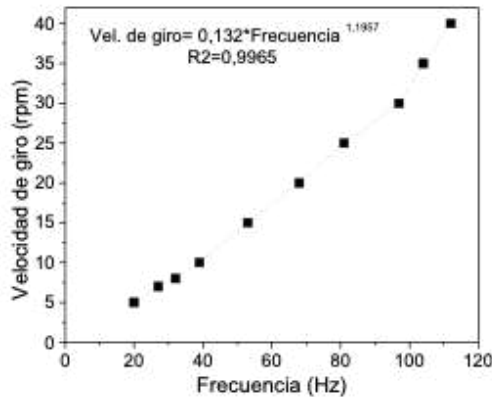


Figura 23. Curva del motor en función de la frecuencia del variador.

Para determinar la curva se contabilizaron las revoluciones del tornillo por minuto con un cronometro, realizando pruebas en intervalos de 1 rpm entre 5 y 10 rpm; de 5 rpm entre 10 y 50 rpm; y finalmente de 10 rpm entre 50 a 100 rpm .

3.16.4. Amperaje experimental del equipo

Con el fin de verificar el dimensionamiento experimental del termo magnetismo mono polar, se conectará un multímetro a la alimentación eléctrica del reactor. Al encender el reactor y realizar pruebas a máxima potencia (con las resistencias calentando sin rampa y el motor trabajando normalmente), se obtuvo una lectura de 8.9 A. Este resultado cumple con las especificaciones del termo magnetismo polar que es de 10 A, confirmando que está bien dimensionado y que se apagará en caso de sobrecarga. Es importante tener claro que la potencia máxima del equipo es de 220 VAC, que corresponde a 2 KW aproximadamente.

3.16.5. Posibles fugas

Antes de poner en marcha el reactor, se sellaron todas las uniones y el ingreso de nitrógeno gaseoso. Para verificar si el equipo estaba bien sellado se creó una película de agua con detergente líquido para generar burbujas, pero el resultado dio negativo. A futuro, es posible que se produzcan fugas debido al deterioro de los sellos de silicona por las altas temperaturas. Sin embargo, estas fugas se pueden prevenir mediante el remplazo o ajuste de los sellos.

3.17. Pruebas preliminares

Para comprender y familiarizarse con el reactor se hicieron pruebas previas a su entrega, lo que permitió crear un manual de usuario para los futuros operarios.

3.17.1. Condiciones de operación

Las primeras pruebas se desarrollaron con cáscara procesada de yuca seca (*Manihot esculenta*) y consistieron en realizar una pirólisis térmica completamente sencilla sin uso de catalizador. En la Tabla 5 se muestra algunas propiedades.

Tabla 5. Propiedades de la cáscara de yuca.

Propiedades	
Densidad (g/cm ³)	1.560
Temperatura de fusión (°C)	60
Diámetro de pellet (μm)	750
Malla	60-200

La carga de cáscara de yuca utilizada en cada una de las reacciones fue de 10 g. Las temperaturas que se emplearon para las pruebas estuvieron entre los 500 °C y 540 °C. Y el motorreductor fue operado con una velocidad de 30 rpm, que es igual a 128 Hz, aproximadamente. En base a lo anterior, el tiempo de residencia de las partículas dentro del reactor fue de 12 s. El tiempo de residencia escogido fue con base a los resultados obtenidos por (Albis Arrieta et al., 2017) en los estudios de la pirólisis rápida. El tiempo de reacción fue de 14 s., el cual es dos segundos mayor al cálculo teórico. Aun así, se cumplen las especificaciones deseadas dentro del estudio. El gas de nitrógeno para crear la atmósfera inerte, manejará un flujo de 0.6 ml/s [40-41].

3.17.2. Metodología de operación

Este es el protocolo de operación en las primeras pruebas:

- Se apretarán todas las uniones del equipo antes de la operación para evitar posibles fugas y se agregó teflón donde fuese necesario (aunque el teflón no soporta las altas temperaturas).
- Se conectará la alimentación del nitrógeno permitiendo el paso del mismo, para desplazar agentes no deseados hasta la salida por el filtro.
- Se conectará el equipo a la alimentación eléctrica. Se encenderá el equipo y las resistencia, asegurando que se alcance el estado estacionario.
- Se revisarán constantemente posibles fugas, con una mezcla de agua y detergente para platos. Sin encender los motores, se ajustará la frecuencia del variador.

- Se debe: abrir la válvula que lleva el nitrógeno a la tolva. Abrir la tapa superior de la tolva que conecta al sistema de reacción para cargar la biomasa. Cerrar y esperar aproximadamente 5 min a que salga el aire empujado por el nitrógeno y este se regule si es necesario.
- Hecho lo anterior, se encenderá el motor para transmitir potencia a los tornillos y dar inicio la pirólisis.

3.17.3. Comportamiento del reactor

Con la ayuda de colegas de la universidad de Antioquia, se realizaron tres pruebas preliminares para garantizar el funcionamiento del equipo. Al culminar estas pruebas, se detectaron diversos problemas que se fueron abordando a medida que surgiendo.

Carencia de un agitador dentro de las tolvas. Se está estudiando la posibilidad de implementar un sistema de agitación dentro de las tolvas para prevenir acumulaciones de la materia prima en las esquinas de la base. Se proyecta que, en el caso de otros tipos de biomasa, la tendencia a atascarse en las paredes de la tolva y en la entrada del sistema de reacción podría ser más común por la baja fricción del pellet. Como resultado, se determinó la necesidad de un dispositivo que agite los pellets dentro de la tolva, de manera que pueda facilitar el ingreso al tornillo. Se recomienda que el dispositivo implementado posea un movimiento vertical que no influya con la geometría de la tolva y que pueda hacer presión sobre los pellets, generando un empuje de los mismo hacia el tornillo. Esto se propone con el fin de que en investigaciones futuras se pueda implementar.

Expansión térmica. La expansión térmica radial entre el tornillo y la omega, como se discutió en capítulos anteriores, puede resultar en un espacio muy reducido a altas temperaturas (según cálculos teóricos). Cualquier error derivado de la implementación podría causar fricciones no deseadas, desgaste o incluso interferir con el giro del motor. Dentro de las pruebas, se detectó un leve roce entre el tornillo y la pared de la omega cuando se alcanzaron temperaturas de trabajo sobre los 450 °C. Además de lo anterior, se planteó la hipótesis de un roce

entre los ejes de los tornillos y los bujes de bronce fosfórico junto con una expansión térmica lineal. Considerando una temperatura interna del reactor de 500 °C y la longitud del tornillo (600 mm), la expansión final del tornillo fue de 2.44 mm. Con este resultado, se podrá prever el comportamiento del tornillo al aumentar la temperatura hasta 800 °C. Teniendo en consideración este escenario, se procederá a pulir los sectores donde el filete del tornillo choca con el piso de la omega, para evitar el desgaste de las piezas o el mal funcionamiento de la máquina. Se aplicará una pintura especial en el borde del filete para marcar las áreas a pulir internamente en la omega, y se ajustarán los bujes y se acortarán ligeramente los ejes de los tornillos. Después de estas modificaciones hubo unas leves alteraciones en el diámetro del tornillo y en la tolerancia entre este y la pared de la omega, que no fueron mayores a 0.5 mm. Tras repetidas pruebas, el reactor funcionó sin problemas, evitando así complicaciones debido a la expansión térmica.

Necesidad de un sistema de refrigeración líquida. Se dice que el calor es un enemigo latente, pero para nuestro caso de estudio es nuestro gran aliado, gracias a que, si no se llega a las temperaturas deseadas, no se podrán obtener los resultados esperados como lo muestran los cálculos teóricos. Al trabajar con temperaturas que superan los 500 °C, se puede ver comprometido el sistema eléctrico y de adquisición de datos, que a pesar de estar aislados, se ven afectados de manera indirecta por las grandes ondas de calor que se produce dentro del sistema de reacción. Como sugerencia futura es recomendable implementar un sistema de refrigeración líquida, unido a un serpentín que proteja los sistemas ya mencionados, así como colocar una extensión de los mismo en punto claves de la omega, salida de portador de calor y salida de materia procesada.

4. Comprobación del diseño y funcionamiento del sistema

En esta sección se detalla el proceso de comprobación del diseño de los componentes que conforman el sistema, así como los pasos seguidos para la construcción de los componentes que fueron diseñados específicamente para este caso de estudio.

4.1. Comprobación del diseño

Como parte del proceso de diseño del sistema, es necesario corroborar que las piezas propuestas sean capaces de soportar las cargas asociadas a su función dentro del sistema. Para esto se empleó el software de diseño mecánico SolidWorks.

4.1.1. Estructura base

Se propone un diseño para la estructura que sostendrá todos los componentes necesarios para el funcionamiento del reactor Auger. Para comprobar la viabilidad del diseño propuesto se realizará una simulación estática del modelo presentado, teniendo en cuenta las fuerzas que actúan sobre él. Además, para tener un mayor grado de fiabilidad en el diseño y teniendo en cuenta que será sometido a cierto grado de vibraciones debido al motor que está presente en el sistema, se realizarán análisis de frecuencia y de vibraciones, en el software SolidWorks, con la licencia proporcionada por la Universidad del Atlántico. Para iniciar la simulación en el entorno seleccionado se establecerán las cargas a las que estará sometido el modelo, incluyendo la gravedad y el peso de los componentes que soportará. En la Figura 24 se detallan las condiciones específicas para el modelo.

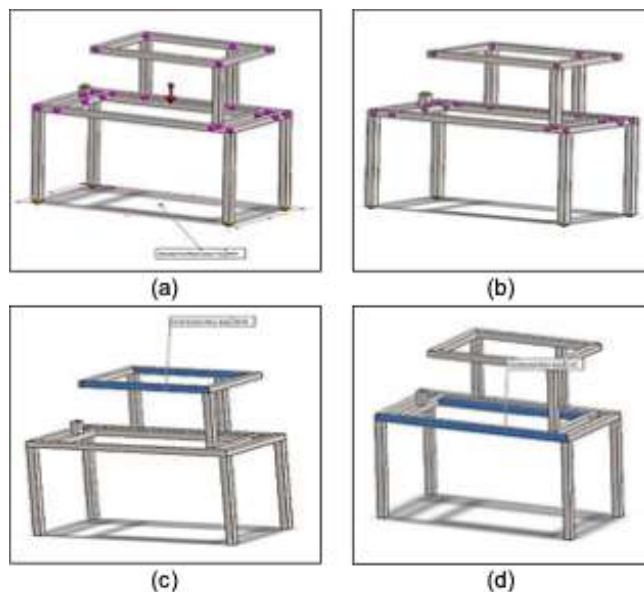


Figura 24. Condiciones de diseño y cargas: (a) Efecto de la gravedad, (b) Carga ejercida por el alimentador del portador de calor, (c) Carga por la biomasa y (d) Carga ejercida por el portador de calor.

El siguiente paso fue el mallado de la representación del diseño y la posterior simulación. En la Figura 25 se muestran los resultados de la simulación estática.

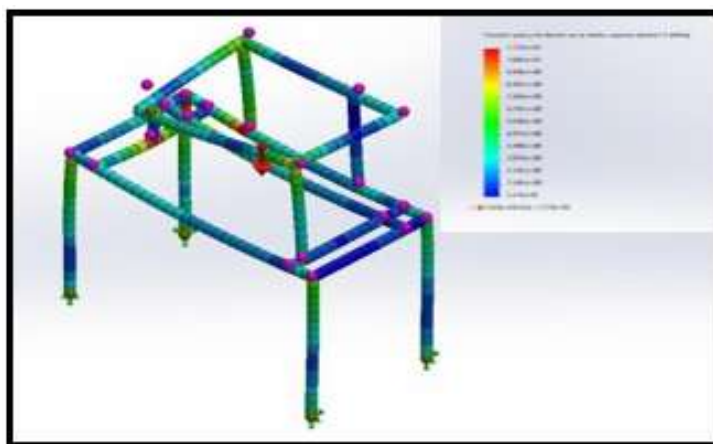


Figura 25. Resultado de la simulación estática.

En la Figura 25 se destaca una zona crítica de la estructura donde se apoya el sistema de alimentación del portador de calor, lo que requiere prestar mayor atención durante la construcción del sistema. La figura muestra los resultados visibles amplificados según las cargas proporcionadas, mostrando la posible deformación que podría sufrir el modelo si el material no es capaz de resistir las fuerzas externas. Para validar estos resultados se utilizará el factor de seguridad, que indica cuántas veces el sistema evaluado soporta el esfuerzo máximo proporcionado por el material. Usualmente el factor de seguridad mínimo utilizado en el diseño de elementos mecánicos es de 1.3, y este será el valor seleccionado para el caso. Otro factor a la hora de validar un diseño estructural, es el desplazamiento que sufre el modelo en su estructura. En este caso, dado que el desplazamiento es muy pequeño, el resultado obtenido se omite si bien el máximo registrado en la figura es de 0.31 mm. El factor de seguridad se muestra en la Figura 26.

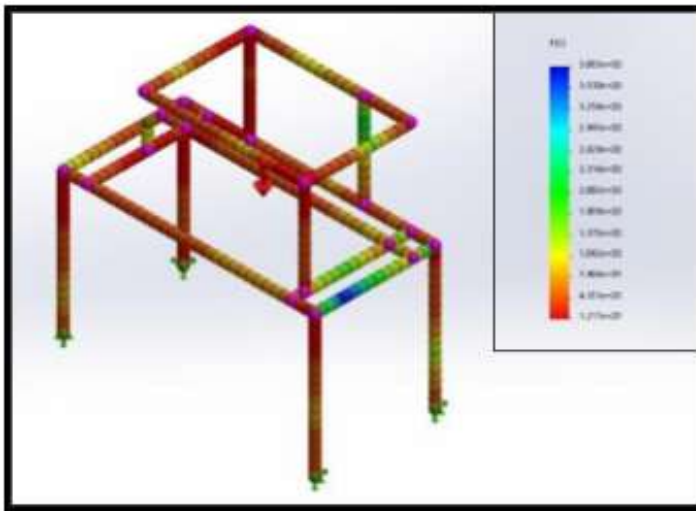


Figura 26. Figura de resultados del factor de seguridad.

Basándonos en los resultados obtenidos y en la evaluación del factor de seguridad, teniendo en cuenta que el factor mínimo requerido en toda la estructura es de 1.3, se puede determinar que la estructura no solo soportará las cargas a la que se verá sometida durante su tiempo de operación, sino que también sufrirá un nivel de daño que será tan pequeño

que se garantiza una vida útil prolongada. En la Tabla 6, se muestran los resultados tabulados del estudio de frecuencia realizado con ayuda del software SolidWorks. En esta tabla se detallan las primeras 5 frecuencias resonantes del sistema, esto permite conocer las frecuencias recomendadas para el funcionamiento diseño propuesto.

Tabla 6. Resultados del estudio de frecuencia.

Estudios de frecuencia %		
N° de modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1	18.288	0.05468
2	19.139	0.05225
3	26.659	0.037511
4	36.037	0.027749
5	37.234	0.026857

La Figura 27 presenta los modos de vibración de la estructura base del sistema, lo que ha permitido identificar las cinco primeras frecuencias naturales críticas del material.

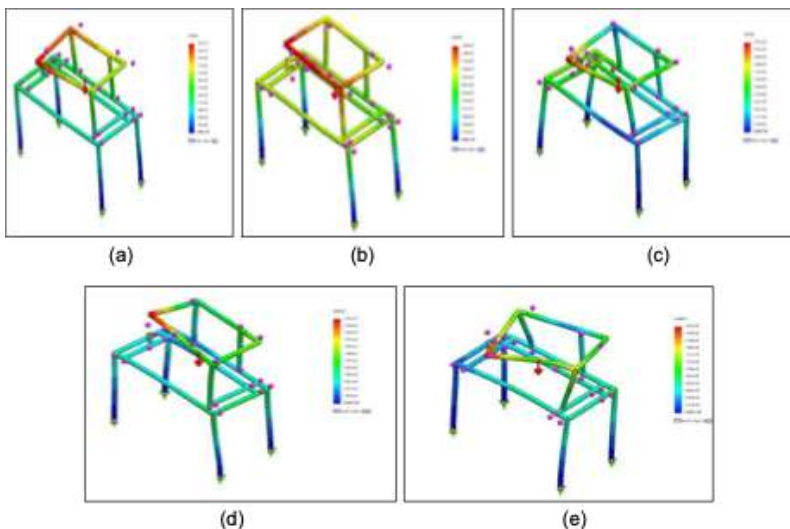


Figura 27. Estudio de frecuencia: (a) Frecuencia modal 1 = 18.288, (b) Frecuencia modal 2 = 19.139, (c) Frecuencia modal 3 = 26.659, (d) Frecuencia modal 4 = 36.037 y (e) Frecuencia modal 5 = 37.234.

Como parte del análisis decidimos estudiar el impacto de las cargas térmicas sobre la estructura base. Se seleccionó la zona más crítica donde se registran las temperaturas más altas y se produce una mayor transmisión de calor debido al contacto directo con la estructura. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 28.

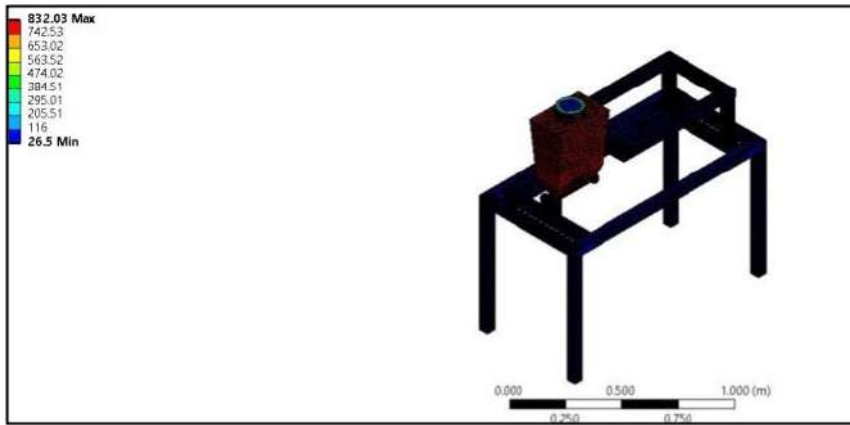


Figura 28. Temperatura a lo largo de la estructura base.

En la Figura 28 se observa que la temperatura de la estructura no se ve significativamente afectada por la carga térmica proveniente de la tolva de alimentación. Se llevará a cabo un análisis de esfuerzos para determinar que tanto se ve afectada la estructura. Las condiciones de frontera establecidas para esta simulación incluyen una temperatura de 800 grados Celsius para el sistema de alimentación y una temperatura ambiente de 25 °C. En la Figura 29 se analiza el impacto de la carga térmica.

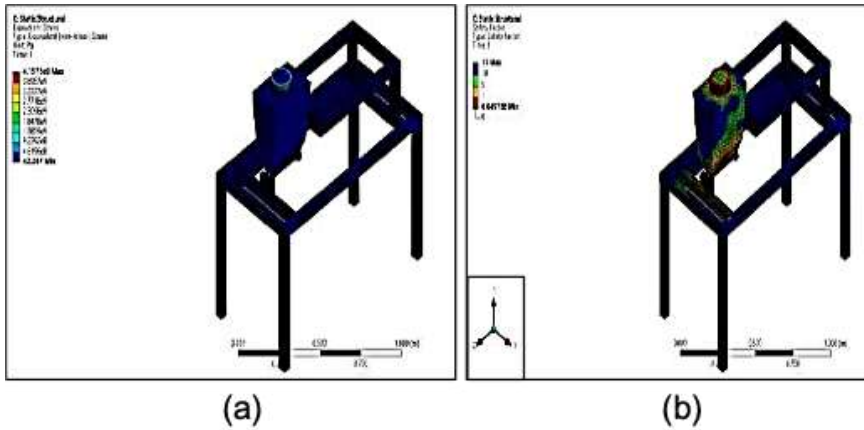


Figura 29. Análisis del impacto de la carga térmica en la estructura base: (a) Esfuerzo equivalente de Von Mises y (b) Factor de seguridad.

En la Figura 29 se observan los resultados de la simulación que combina el análisis térmico con el de esfuerzos, mostrando los efectos de la carga térmica sobre la estructura. Además, se ha tenido en cuenta el peso del sistema de alimentación de biomasa. Dado que el factor de seguridad de la estructura base cumple con los requerimientos, se considera que su construcción es segura. No obstante, es necesario observar con más detalle el comportamiento en la tolva de alimentación.

4.1.2. Tornillo sin fin

Para validar el diseño del tornillo sin fin, se ha seleccionado el componente más crítico, teniendo en cuenta que ambos están sometidos a las mismas condiciones de trabajo en cuanto a cargas. Dado que las propiedades físicas del material seleccionado son robustas, no se ha tenido en cuenta el efecto que pueda tener la temperatura de trabajo en estas condiciones. El material del tornillo es de acero inoxidable AISI 316, elegido por sus características adecuadas para la aplicación prevista. Para iniciar la simulación fue necesario determinar los soportes y las cargas a los cuales está sometido el objeto de estudio. En este caso, el tornillo está sujeto fijamente en ambos extremos y se ejerce un torque de 6 Nm sobre él. Algunos ejemplos de estas condiciones se presentan en la Figura 30.

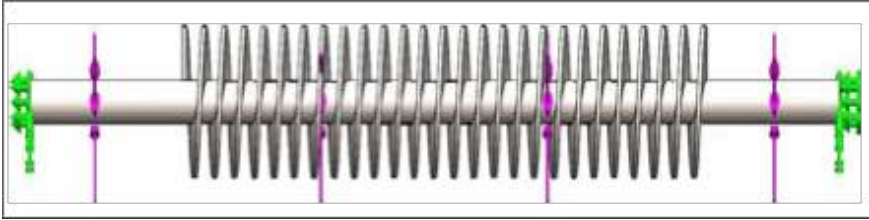


Figura 30. Condiciones de operación del tornillo sin fin.

Al establecer las condiciones de operación, se procede a realizar el mallado teniendo en cuenta que, para simulaciones estáticas, no es necesario utilizar una malla extremadamente extensa. Se opta por un mallado sencillo que permitirá un procesamiento más rápido. Para dar validez a este diseño, se utilizarán como parámetros los resultados de los estudios estáticos y de frecuencia. En la Figura 31a, se puede observar que la mayor concentración de esfuerzos de Ludwig von Mises se presenta en los extremos con sujeciones fijas, y estos esfuerzos decrecen a medida que aumenta la distancia de análisis. El esfuerzo máximo en el modelo es significativamente menor al límite máximo permitido por el material, lo que indica que es apto para su uso práctico.

En la Figura 31b, se muestra el desplazamiento experimentado por el tornillo sin fin cuando está sometido a las cargas mencionadas anteriormente. El valor máximo de desplazamiento no genera interferencias con el resto del modelo ni implica ningún riesgo de ruptura, lo que lleva a concluir que, bajo esta consideración de diseño, el modelo cumple con las especificaciones requeridas.

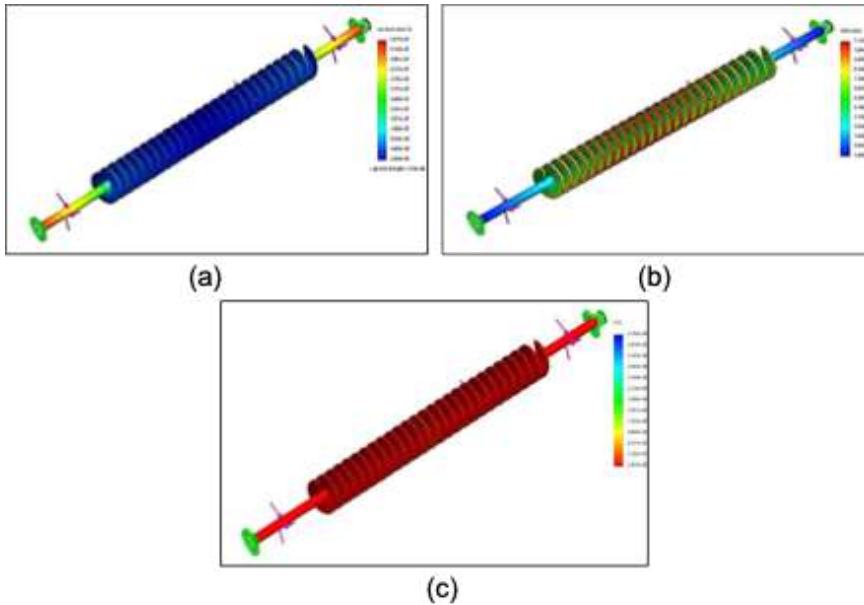


Figura 31. Desplazamiento tornillo sin fin: (a) Esfuerzo equivalente de Ludwig von Mises presentes en el modelo, (b) Desplazamiento del modelo debido a las cargas y (c) Factor de seguridad.

En la Figura 31c se muestra el factor de seguridad del sin fin. Como último parámetro de comprobación del diseño, se mide el factor de seguridad presente, teniendo en cuenta que este usualmente es de 1.3 para piezas mecánicas y como se puede observar en la Figura 31b, el factor de seguridad mínimo presente en el sistema de estudio es de 2.456. Con lo anterior, se puede concluir que el diseño propuesto para este elemento mecánico cumple con las condiciones para su producción y empleo dentro del reactor. En la Figura 32 se ilustra la simulación del tornillo sin fin, variando la frecuencia modal.

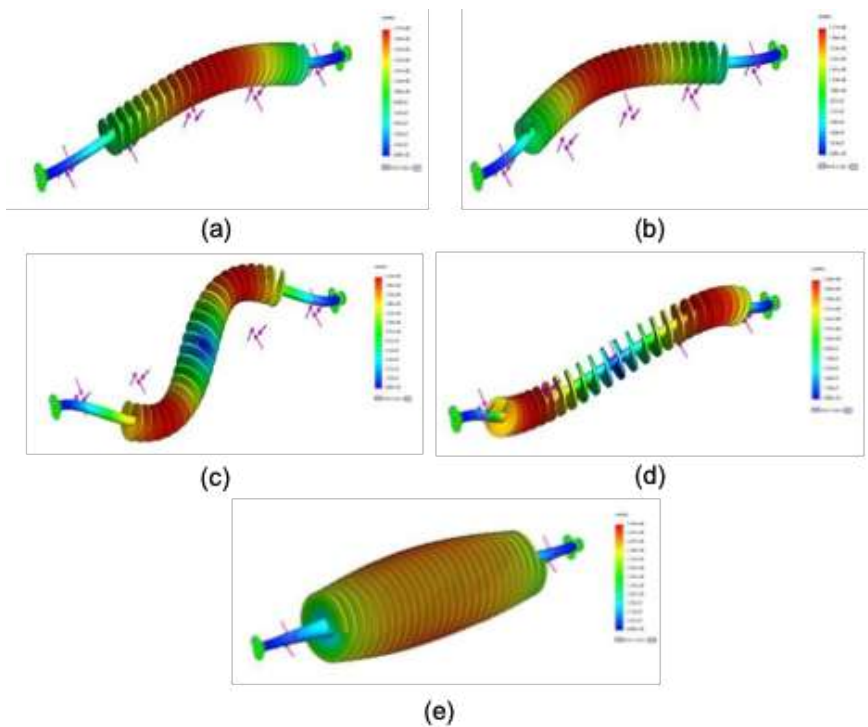
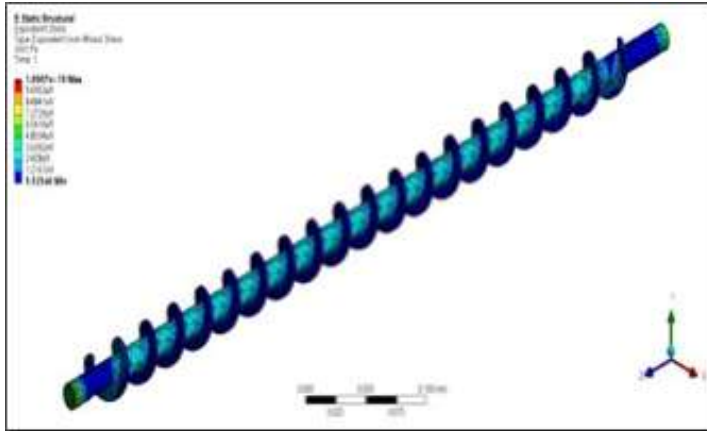
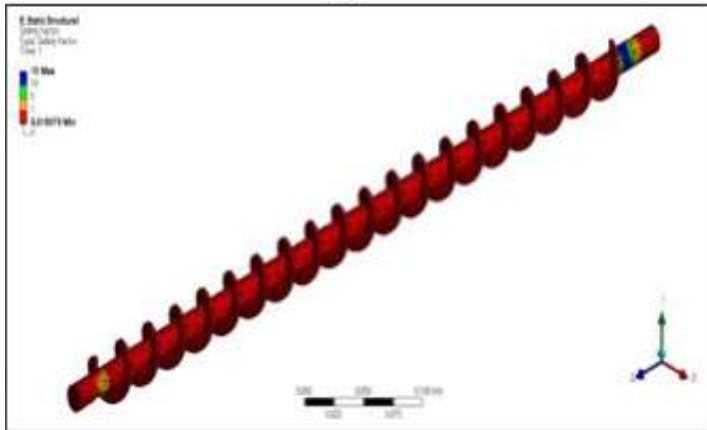


Figura 32. Estudio de frecuencia para el tornillo sin fin: (a) Frecuencia modal 1 = 128.16, (b) Frecuencia modal 2 = 128.35, (c) Frecuencia modal 3 = 368.33, (d) Frecuencia modal 4 = 368.46 y (e) Frecuencia modal 5 = 748.74.

Los modelos representados en la Figura 32 se encuentran escalados para mostrar cómo se comportarían ante las frecuencias indicadas. Dado que operan a una frecuencia menor a las consideradas críticas, se puede concluir que los diseños para los tornillos sin fin para el sistema son aptos y no deberían presentar ningún problema. En la simulación se han utilizado las mismas condiciones de operación que en la simulación de la estructura base, con una temperatura de 800 °C. Esta temperatura se ha seleccionado debido a que supera considerable la máxima temperatura de operación a la que estará sometido el tornillo. En la Figura 33, se muestra el impacto de la carga térmica en el tornillo sin fin.



(a)



(b)

Figura 33. Análisis del impacto de la carga térmica en el tornillo sin fin: (a) Esfuerzo equivalente de Ludwig von Mises y (b) Factor de seguridad.

En la Figura 33 se pueden observar gráficamente los efectos de las cargas térmicas y mecánicas sobre el tornillo. Es importante considerar que la simulación mediante elementos finitos es método aproximado, por lo que el resultado puede diferir de lo que sucede en la realidad. Con base en estos resultados, se han tomado precauciones en el sistema para aliviar los efectos de la temperatura en el tornillo

sin fin. En la Figura 9, se muestra el diseño propuesto para la sección transversal de la tubería del sistema transportador de mezcla de biomasa. Como recomendación, se sugiere que, para el empalme de la parte superior con la inferior, se reduzca el diámetro exterior a 69.8 mm. La parte señalada con la letra B está diseñada con tubería de acero inoxidable Schedule 40, con un diámetro nominal de 1 ¼” (espesor de 3,56 mm). Con un tubo de estas características se pueden obtener las dos secciones que conforman la forma omega, mientras que la parte A está diseñada con tubería de diámetro nominal de 2 ½” (espesor 5.16 mm).

Dado que el sistema debe mantenerse herméticamente cerrado para que no exista escape de calor, se incorporaron resistencias térmicas fabricadas en cerámica. Para asegurar la ausencia de espacios vacíos entre las resistencias y el sostenedor del sistema, se colocaron pequeñas paredes de hormigón, como se muestra en la Figura 34, que refleja el resultado del diseño propuesto. Para este caso no se consideró necesario validar estos diseños, ya que las cargas presentes no ejercen un efecto significativo sobre la estructura que sostiene el sistema. En la Figura 9 se muestran las bridas necesarias para sellar la sección de escape del sistema de reacción, las cuales contienen empaques de plástico para asegurar el hermetismo.



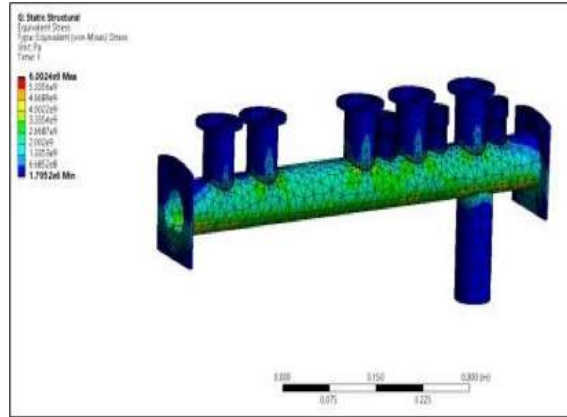
(a)



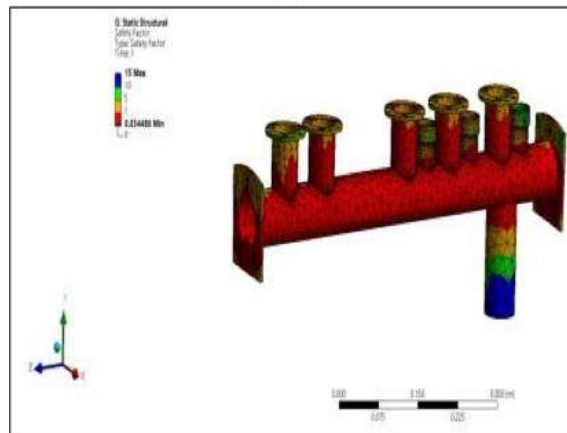
(b)

Figura 34. (a) Resistencia térmica. (b) Sección de tubería con las bridas.

El análisis térmico del sistema es otro componente crítico a considerar. Una zona vulnerable a altas temperaturas es aquella por donde se transporta la mezcla de biomasa y el portador de calor. Por esta razón se ha evaluado su comportamiento frente a grandes cargas térmicas que podrían superar los límites de temperatura de operación del sistema. En la Figura 35 se pueden observar efectos similares a los observados en el tornillo sin fin, lo que ha requerido tomar precauciones adicionales para la operación segura del reactor.



(a)



(b)

Figura 35. Análisis del impacto de la carga térmica en el sistema de transporte: (a) Esfuerzo equivalente de Von Mises y (b) Factor de seguridad.

4.1.3. Sistema de transmisión de potencia

El reactor Auger, al ser un tipo de reactor mecánico, necesita de una entrada de potencia mecánica para su funcionamiento. En el caso de un reactor Auger de tornillos dobles, se hace indispensable contar con un sistema de transmisión de potencia compuesto por una catarina, un engrane, un rodamiento y un motor. Debido a la disposición del motor con respecto a la Catarina que conecta los dos tornillos sin fin, fue necesario utilizar una transmisión indirecta de potencia. Es importante

aclarar que se necesitan dos sistemas de transmisión de potencia, dado que la ubicación del sistema de alimentación del portador de calor y del sistema de reacción impide compartir la misma entrada de potencia. En la Figura 36 se presentan los componentes descritos y utilizados en el sistema de transmisión de potencia, diseñados para ofrecer velocidades de rotación de hasta 63 rpm, según las especificaciones requeridas para la pirólisis rápida según la literatura consultada.



Figura 36. Sistema de transmisión de potencia.

4.1.4. Sistema de tolvas

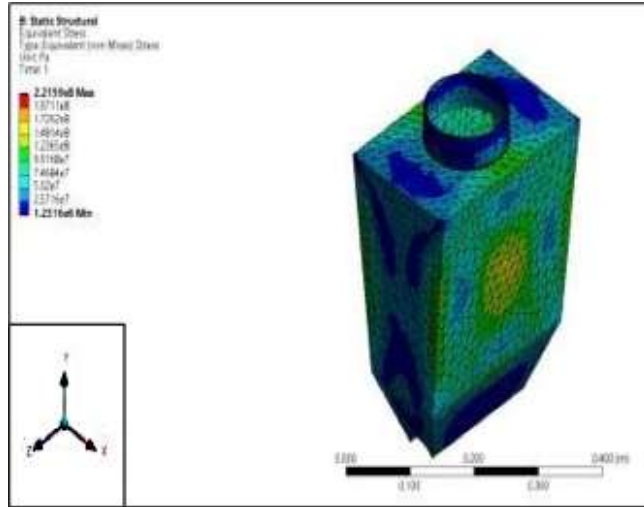
Un componente importante para controlar el flujo másico de biomasa y portador de calor, es el reservorio de donde provienen estas sustancias. Por lo tanto, al diseñar estos depósitos, se tuvo en cuenta que el paso de los elementos debe ofrecer la menor resistencia posible. Por esta razón se optó por un diseño en forma de tolva con un ángulo de 26° . Las superficies de las paredes se han diseñado para ser lo

más lisas posibles, con el fin de evitar que la fricción impida el correcto desplazamiento de la materia prima. La capacidad de ambos reservorios es de 0.0016 m^3 , como se puede observar en la Figura 37.

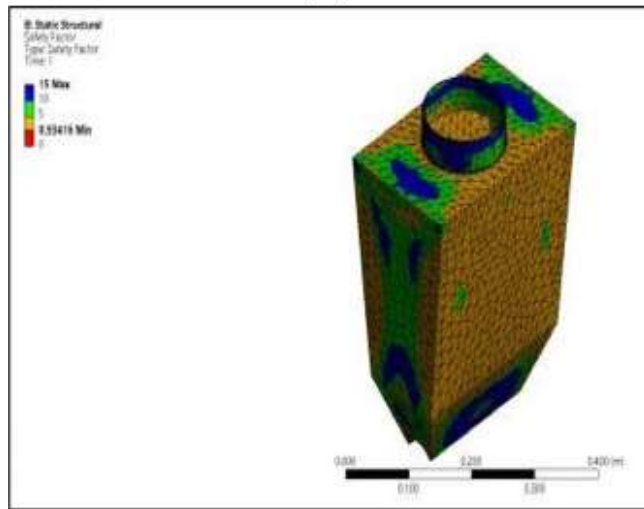


Figura 37. Reservorio instalado.

Análisis térmico. En el análisis térmico realizado, se aplicaron las mismas condiciones de frontera utilizadas para la simulación térmica de la estructura base. Se añadió una presión interna para simular el efecto de la materia prima al chocar con las paredes, lo que permitió conseguir los resultados detallados en la Figura 38. Los resultados del factor de seguridad revelan valores por encima de los recomendados, lo que indica que el diseño propuesto es seguro para su implementación, sin necesidad de incorporar medidas de seguridad adicionales.



(a)



(b)

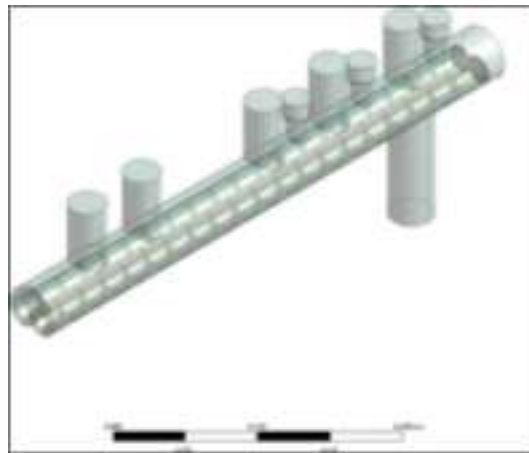
Figura 38. Análisis del impacto de la carga térmica en la tolva: (a) Esfuerzo equivalente de Ludvig von Mises y (b) Factor de seguridad.

Las condiciones de frontera utilizadas para este caso fueron las mismas consideradas para la simulación térmica de la estructura base. Se añadió una presión interna para simular el efecto de la materia prima chocando con las paredes, de esta forma se consiguieron los resultados

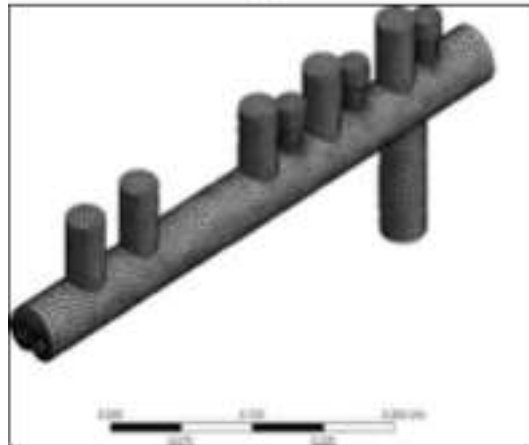
observados en la Figura 38. Dado que los resultados del factor de seguridad muestran valores por encima del valor recomendado, se considera que el diseño propuesto es seguro para su implementación, sin necesidad de aplicar medidas de seguridad extras.

4.1.5. Simulación utilizando CFD para conocer los perfiles de temperatura

En el marco del análisis del proceso de pirólisis, se realizó una simulación CFD sencilla utilizando el software ANSYS FLUENT, disponible a través de la licencia académica. Para iniciar la simulación CFD, el primer paso consistió en la importación de la geometría dentro del espacio de trabajo de ANSYS. En este caso, el objetivo era obtener el perfil de temperatura en el sistema que transporta la mezcla de portador de calor y biomasa. A diferencia de la simulación enfocada en el análisis estructural, donde se trabajaba directamente sobre la geometría realizada, en la simulación de CFD fue necesario definir previamente el volumen de fluido en movimiento dentro del dominio de estudio. Este proceso se ilustra en la Figura 39a.



(a)



(b)

Figura 39. Volumen de control para el perfil de temperatura: (a) Volumen de control y (b) Volumen de control mallado.

En la Figura 39a se presenta el volumen de control seleccionado para la obtención del perfil de temperatura. El siguiente paso crucial implica la generación del mallado, como se ilustra en la Figura 39b. Este procedimiento es uno de los más importantes a la hora de realizar un estudio CFD, ya que una mala topología podría conducir a resultados incorrectos o fallas durante la simulación.

En la Figura 39b se muestra el resultado obtenido tras la aplicación de la herramienta de mallado. Como parte de este proceso, es necesario identificar la geometría en la que se especificarán las condiciones de contorno, proporcionando los datos necesarios para resolver las ecuaciones fundamentales que gobiernan el fenómeno físico en cuestión. En la Figura 40 se muestra la nomenclatura utilizada para identificar las condiciones de frontera que se aplicarán. Al terminar de asignar los nombres, se procede a la siguiente etapa de simulación. En esta fase se definen las condiciones de frontera del modelo, se elige el algoritmo de solución adecuado según el caso, se determinan los materiales a utilizar (como el tipo de fluido) y se especifican las condiciones de las zonas de análisis.

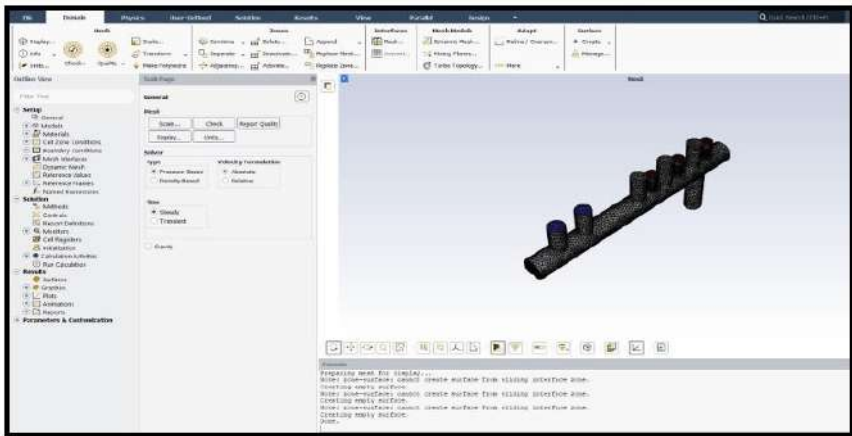


Figura 40. Interfaz de fluent.

En la Figura 41 se presenta el entorno de simulación, el cual implica un escenario multifásico que tiene más de una sustancia. Para abordar este análisis, es necesario activar el modelo de multifase y la ecuación de energía, dado el intercambio térmico dentro del volumen de control de estudio. En cuanto al modelo de turbulencia se seleccionó el modelo k-E que ofrece resultados con una baja carga computacional, y se activó el modelo de especies, el cual, junto al modelo de especies para calcular las interacciones entre las sustancias. El fenómeno en estudio implica dos geometrías que rotarán en relación con un sistema

de referencia, como es el caso de los tornillos sin fin, los cuales estarán rotando a una velocidad de 63 rpm. Para las entradas de biomasa y transportador de calor, se utilizó una condición de frontera de entrada con flujo másico, normal a la superficie seleccionada como condición de frontera. Para las salidas, se estableció una condición de presión de salida, considerando que no se encontraban presurizadas y tenían una presión manométrica de cero.

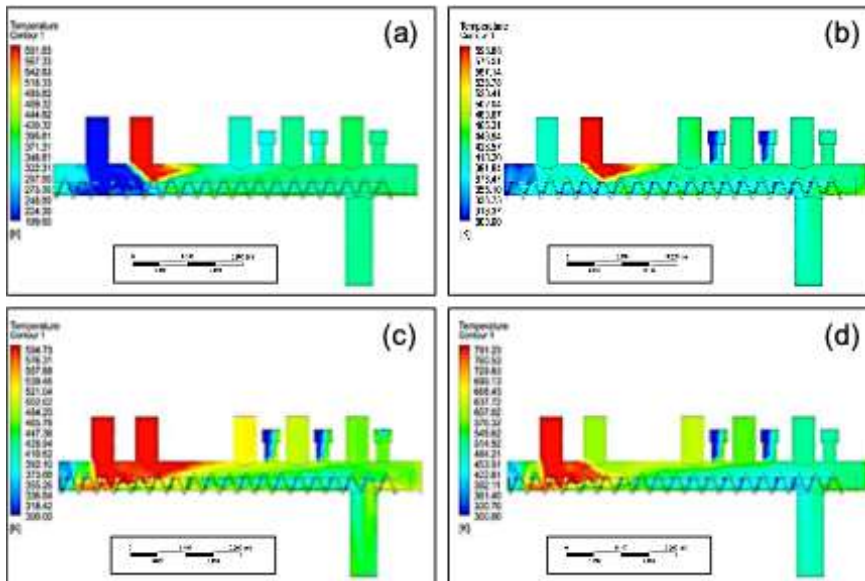


Figura 41. Mapa de contorno de la temperatura a lo largo del sistema de transporte: (a) Temperatura de entrada de la biomasa = 200 K, (b) Temperatura de entrada de la biomasa = 400 K, (c) Temperatura de entrada de la biomasa = 600 K y (d) Temperatura de entrada de la biomasa = 800 K.

Otra condición de frontera necesaria para el desarrollo del análisis es la de paredes, dado que especifica zonas donde estarán contenidas las sustancias de análisis y la interacción que tendrán estas con las paredes. En este estudio, se optó por no incluir la geometría de los tornillos sin fin para simplificar el análisis y reducir los tiempos de cálculo. La condición de pared se definió como móvil en relación con la rotación especificada, con la temperatura constante de 300 K para ayudar en el cálculo de intercambio de calor entre superficies. Para otras pare-

des dentro del volumen de control que no participan en el intercambio de calor con el entorno, esta condición no fue necesaria. Cuando dos mallas que tienen una diferente condición entran en contacto, es necesario añadir una condición de frontera de interfase para permitir la interacción entre una superficie que se encuentra en rotación con otra que no, y calcular los efectos mutuos. ANSYS FLUENT detecta automáticamente estas superficies distintas de contacto y asigna la condición de frontera correspondiente.

Como paso preliminar al cálculo final, se deben escoger los métodos de solución que utilizarán. Por lo general, se seleccionan métodos de segundo orden o superiores para tener una mayor estabilidad en la obtención de los resultados. Para esta simulación se especificó un número de 200 iteraciones, las cuales se consideraron suficientes para verificar la convergencia de las soluciones en un rango aceptable y estable. Para tener una idea del efecto que tiene la temperatura de entrada de la biomasa, se varió esta de 200 K a 800 K, manteniendo constante la temperatura de entrada del portador de calor en 600 K y un flujo másico de entrada de 0.0014 kg/s. A partir de esto, se analizó el comportamiento de la velocidad, la fracción volumétrica de la biomasa y el perfil de temperatura en función de estos cambios. En la Figura 42 se muestra el perfil de temperatura obtenido, el cual concuerda con las expectativas iniciales y las consideraciones realizadas.

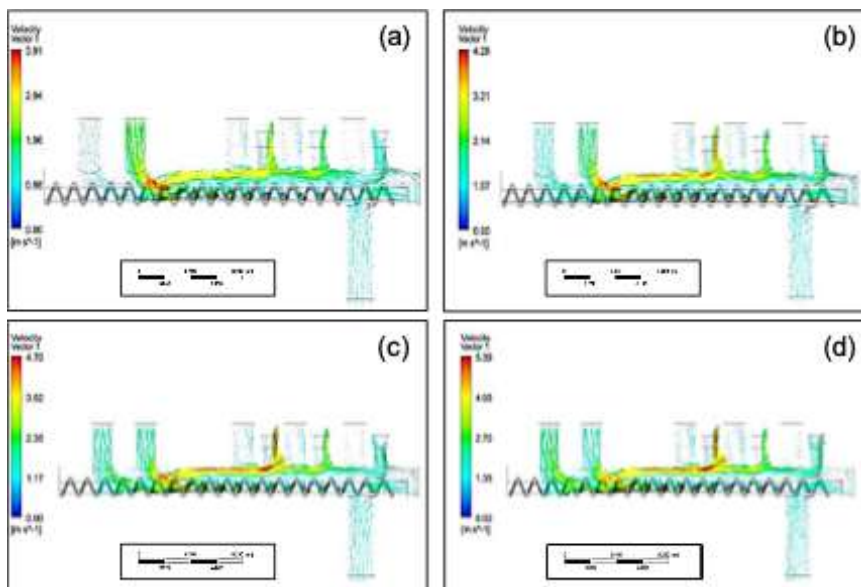


Figura 42. Mapa de contorno de la velocidad a lo largo del sistema de transporte: (a) Temperatura de entrada de la biomasa = 200 K, (b) Temperatura de entrada de la biomasa = 400 K, (c) Temperatura de entrada de la biomasa = 600 K y (d) Temperatura de entrada de la biomasa = 800 K.

En la Figura 42 se observa cómo varía la velocidad de la biomasa con el aumento de la temperatura de entrada. Se puede observar que el incremento en la temperatura es proporcional a la velocidad máxima alcanzada por la biomasa en la región de contacto con el transportador de calor. Esta correlación podría deberse a modificaciones en las propiedades de la biomasa como resultado de la interacción con la otra sustancia. En la Tabla 7 se pueden observar las diferentes velocidades de salida del reactor para su análisis.

Tabla 7. Valores de las variables de análisis en la simulación CFD.

Temperatura (K)	Velocidad (m/s)
200	0.86
400	0.97
600	1.08
800	1.15

En la Figura 43 se observa el comportamiento descrito en los mapas de contorno de temperatura, es decir, a medida que aumenta la temperatura de entrada de biomasa, la velocidad de salida de la sustancia también aumenta, proporcionalmente.

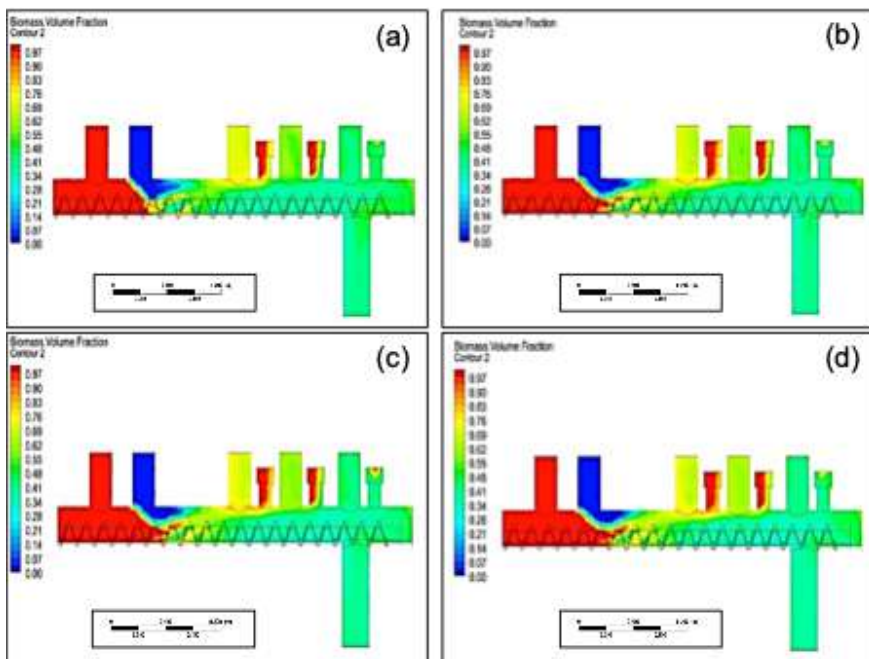


Figura 43. Mapa de contorno de la fracción volumétrica a lo largo del sistema de transporte: (a) Temperatura de entrada de la biomasa = 200 K, (b) Temperatura de entrada de la biomasa = 400 K, (c) Temperatura de entrada de la biomasa = 600 K y (d) Temperatura de entrada de la biomasa = 800 K.

4.2. Resultado final y calibración

Tras completar todas las etapas necesarias para el diseño y ajuste del reactor, se llevó a cabo la construcción del sistema siguiendo las directrices establecidas. Como resultado, se presenta la configuración final en la Figura 44.

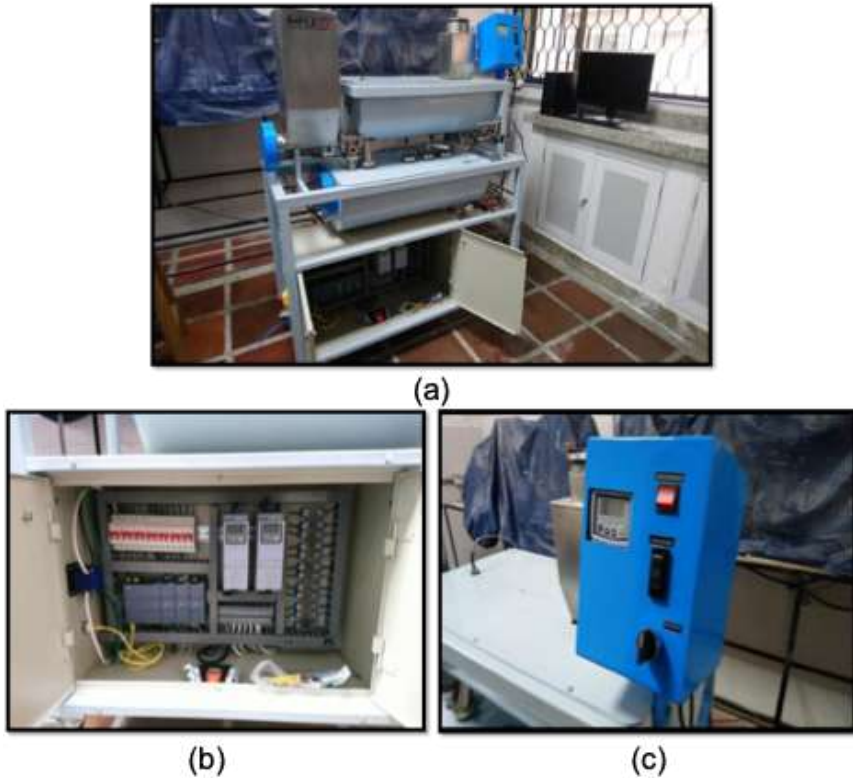


Figura 44. (a) Sistema terminado, (b) Sistema de recolección de datos y (c) Sistema de control del sistema de alimentación de biomasa.

Luego de culminar la construcción del reactor, la siguiente etapa es la programación del sistema de control que se encargará de la monitorización de datos y del control de los componentes del sistema como el sistema de calentamiento y la velocidad de tornillos dentro del sistema. Para esto fue necesario la realización de una interfaz gráfica en Labview, que operara en el entorno de Windows. En la Figura 45 se muestran las variables que pasará a controlar.

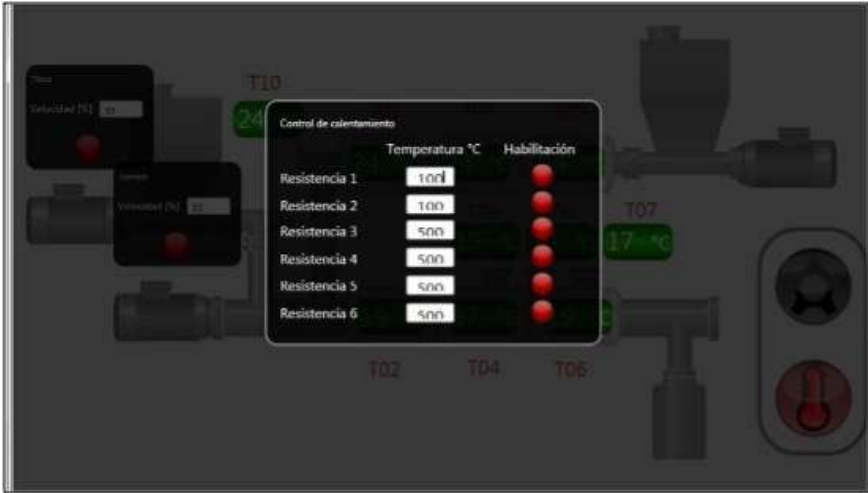


Figura 45. Interfaz gráfica del sistema de control y recolección de datos del reactor Auger.

Tras completar la fase final de construcción es necesario llevar a cabo una calibración, enfocada en el sistema portador de calor en este caso. Esta calibración permitirá realizar los ajustes necesarios para garantizar el correcto funcionamiento del reactor, además proporcionará información sobre el comportamiento de las variables analizadas. Con esto se finaliza la puesta a punto del reactor Auger.

5. Conclusiones

Se propusieron diversas configuraciones para la implementación del reactor Auger, realizando el cálculo detallado de cada componente para lograr un diseño funcional. La elección del reactor de doble tornillo sinfín se basó en sus ventajas, destacándose como una tecnología única en el ámbito del laboratorio, diferente a otros reactores encontrados en las principales universidades del mundo. Presentar un reactor mecánico con un sistema de control integral permitirá una regulación precisa de los procesos, con la expectativa de obtener datos más precisos y reducir los tiempos de residencias.

El diseño implementado para el proceso de pirólisis de biomasa incluye una tolva de entrada para la biomasa y para el portador de calor, conectadas a un motorreductor que lleva los reactivos a la misma zona de reacción. Dos tornillos sinfines alojados en una estructura en forma de omega facilitan el transporte de los reactivos, conectados a un motorreductor y con un par de engranes para la transmisión de potencia. Los productos generados en el proceso de pirólisis, como cerosos, sólidos, líquidos o gaseosos, son separados manualmente. El reactor y sus diferentes sistemas están construidos con acero inoxidable AISI 316 y funciona a una temperatura de 800 °C.

El control de temperatura en las zonas de calefacción se logra mediante un sistema dinámico de lazo cerrado, con controladores PID, termocuplas tipo K y actuadores. La máquina cuenta con 6 resistencias térmicas de 18 Ohm y 13.5 A cada una, fabricadas con cemento cerámico y alambre Kantal, aptas para altas temperaturas. El control del motorreductor se realiza con un variador de frecuencia, alcanzando una potencia máxima de 2 kW.

El reactor se destaca por ser de fácil armado y por la sencillez de las conexiones. Durante las primeras pruebas de pirólisis rápida con 15 g de cáscara de Manihot esculenta a una temperatura de 500 °C en la primera zona del reactor y 540 °C en la segunda zona, con una velo-

cidad de giro de 120 rpm, se logró una conversión total del 60%. Estas pruebas confirmaron el correcto desempeño del reactor, obteniendo los resultados esperados. El reactor Auger cumple con las condiciones necesarias para el proceso de pirólisis rápida de manera efectiva, con capacidad de maximizar el tiempo de residencia, variar la temperatura y utilizar diversos tipos de biomasa orgánica.

6. Bibliografía

- [1] A. DEMIRBAS, “Current Technologies for the Thermo-Conversion of Biomass into Fuels and Chemicals,” *Energy Sources*, vol. 26, pp. 715–730, July 2004.
- [2] A. Soroush, “Numerical simulation of biomass fast pyrolysis in fluidized bed and auger reactors,” Master’s thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 2014.
- [J. S. Levine, ed., *Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1991.
- [3] J. N. Brown, Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology. Master of Science, Iowa State University, Digital Repository, Ames, 2009.
- [4] D. A. Laird, R. C. Brown, J. E. Amonette, and J. Lehmann, “Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar,” *Bio-fuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 3, pp. 547–562, Sept. 2009.
- [5] L. Lin, S. J. Khang, and T. C. Keener, “Coal desulfurization by mild pyrolysis in a dual-auger coal feeder,” *Fuel Processing Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 15 – 29, 1997.
- [6] D. Camp, “Mild coal gasification screw pyrolyzer development and design,” U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, Aug. 1990.
- [7] J. Brown and R. Brown, “Process optimization of an auger pyrolyzer with heat carrier using response surface methodology,” *Bioresource Technology*, vol. 103, pp. 405–414, Jan. 2012.
- [8] A. Funke, R. Grandl, M. Ernst, and N. Dahmen, “Modelling and

- improvement of heat transfer coefficient in auger type reactors for fast pyrolysis application,” *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 130, pp. 67–75, Aug. 2018.
- [9] R. A. G. Castellanos, M. Y. Lavín, and L. D. C. Lorenzo, “Metodología de la Investigación Científica para las Ciencias Técnicas,” *Universidad de Matanzass*, p. 59, 2013.
- [10] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. México, D.F: McGraw-Hill, 5a ed., 2010. OCLC: 632220067.
- [11] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley’s mechanical engineering design*. McGraw-Hill series in mechanical engineering, New York: McGraw-Hill, 9th ed ed., 2011.
- [12] G. Torres Charry, “El estudio de casos y su aplicación en el curso introducción a la ingeniería mecánica en la universidad tecnológica de Pereira,” *Universidad Tecnológica de Pereira*, vol. 1, 04 2010.
- [13] “Energías renovables, Hidroeléctrica, en *Waste magazine*.”
- [14] J. Roberts and L. Petit, *Estudio de Energía Eólica y de la Instalación de un Parque Eólico en la Región Sudeste de la Provincia de Bs. As.* PhD thesis, *Universidad Nacional de Mar del Plata*, 12 2008.
- [15] B. Moratilla, “La energía eólica,” *Anales de mecánica y electricidad*, ISSN 0003-2506, Vol. 83, Fasc. 1, 2006, pags. 7-15, 01 2006.
- [16] M. Realff, “Biorenewable resources: Engineering new products from agriculture, by robert c. brown,” *Journal of Industrial Ecology - J IND ECOL*, vol. 7, pp. 227–228, 06 2003.
- [17] M. J. A. Tijmensen, A. P. C. Faaij, C. N. Hamelinck, and M. R. M. van Hardeveld, “Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 23, pp. 129–152, Aug. 2002.

- [18] B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. Miles, and T. R. Miles, "Combustion properties of biomass," *Fuel Processing Technology*, vol. 54, pp. 17–46, Mar. 1998.
- [19] I. Olofsson, A. Nordin, and U. Söderlind, *Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels*. Umeå Universitet, 2005.
- [20] A. V. Bridgwater, ed., *Progress in thermochemical biomass conversion*. Oxford ; Malden, MA: Blackwell Science, 2001. OCLC: ocm46651762.
- [21] D. Mohan, C. Pittman, and P. Steele, "Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review," *Energy*, vol. 20, pp. 848–, 05 2006.
- [22] A. Bridgwater, *Biomass combustion science, technology and engineering: 7. Fast pyrolysis of biomass for the production of liquids*. Elsevier Inc. Chapters, Apr. 2013. Google-Books-ID: nZN1DAAAQBAJ.
- [23] A. Bridgewater, "Biomass fast pyrolysis," *Thermal Science*, vol. 8, pp. 21–50, 01 2004.
- [24] D. Mohan, C. U. Pittman, and P. H. Steele, "Pyrolysis of wood, bio- mass for bio-oil: A critical review," *Energy & Fuels*, vol. 20, pp. 848– 889, May 2006.
- [25] M. Wright, R. Brown, and A. Boateng, "Distributed processing of biomass to bio-oil for subsequent production of Fischer-Tropsch liquids," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 2, May 2008.
- [26] T. Someus, "Refertil: reducing mineral fertilizers and chemicals use in agriculture by recycling treated organic waste as compost and biochar products," *Deutsche Bundesstiftung Umwelt*, 01 2014.
- [27] E. Ariadna, G. López, C. Moreno, J. Collado, J. Alves, E. Valtierra-Pacheco, and J. Etchevers, "Biocarbon (biochar) i: Nature, history, manufacture and use in soil," *Terra Latinoamericana*, vol. 34, pp. 367–382, 09 2016.

- [28] C. Pituello, O. Francioso, G. Simonetti, A. Pisi, A. Torreggiani, A. Berti, and F. Morari, "Characterization of chemical-physical, structural and morphological properties of biochars from biowastes produced at different temperatures," *Journal of Soils and Sediments*, vol. 15, 04 2014.
- [29] A. Bridgewater, "Biomass fast pyrolysis," *Thermal Science*, vol. 8, pp. 21-50, Jan. 2004.
- [30] F. Stoessel, *Thermal Safety of Chemical Processes*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Feb. 2008.
- [31] U. P. Metals, "Stainless 316, 316L, 317, 317L," *Upmet*, vol. Stainless, vol. 15, 2019.
- [32] Plastimec, "F.T Bronce Fosforado," ficha técnica, Plastimec, Bogotá, CO, Nov. 2020.
- [33] SKF, "Retenes y soluciones en sellado skf," ficha técnica, SKF, Nov. 2008.
- [34] V. Savgorodny, *Transformación de Plásticos*. Barcelona: Editorial Gustavo Gil, Jan. 1978.
- [35] T. engineering Toolbox, "Friction and frictions coefficients," 2004. https://www.engineeringtoolbox.com/frictioncoefficientsd_778.html, Sdstset09/11/2004.
- [36] R. L. Mott, *Diseño de elemento de máquinas*. México: PRENTICE HALL MEXICO, Jan. 2004.
- [37] O. Katsuhiko, *Dinámica de sistemas*. Madrid, España: Pearson, Feb. 2010.
- [38] ICONTEC, "Código eléctrico colombiano," standard, ICONTEC, Bogotá, CO, nov. 1998.
- [39] A. Albis, E. Ortiz, I. Piñeres, C. Ariza, and A. Díaz, "Análisis de gases desprendidos de residuos industriales de yuca (manihot esculenta)," *INGE CUC*, vol. 14, p. 18, 2018.

- [40] A. Albis, A. L. Rangel, and M. R. Castilla, "Removal of methylene blue from aqueous solutions using cassava peel (*manihot esculenta*) modified with phosphoric acid," *Prospectiva*, vol. 15, p. 18, 2017.

U Universidad
del Atlántico
VISILADA MINEDUCACIÓN



Sello Editorial
**UNIVERSIDAD
DEL ATLÁNTICO**