

Evaluación del funcionamiento de un reactor de pirólisis destinado al procesamiento de llantas
residuales de tipo vehicular

Andrés David Méndez Zambrano, Oscar Danilo Ruiz Romero

Trabajo de grado para optar al título de ingenieros mecánicos

Director

PhD. Yesid Javier Rueda Ordóñez

Codirector

Pablo Antonio Nieto Rangel

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Faculta de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Primeramente, a mi madre, Sonia Zambrano Luna quien con su infinito amor me ha guiado y fortalecido en cada etapa de la vida, a mis hermanos, Oldrin Ferney y Karen Julieth quienes han sido mi mayor inspiración y ejemplo a seguir. Y a Simba, mi primera mascota, cuyo silencioso pero incondicional apoyo me acompañó en mis noches largas de estudios.

A quienes la vida puso en mi camino no solo como compañeros, sino como hermanos de lucha. A Oscar, Luis, Isaac, Felipe, David y Andrés, por cada risa compartida, cada desafío superado y cada momento que hizo este viaje inolvidable. Mi más sincero cariño, admiración y gratitud por su amistad incondicional.

Andrés David Méndez Zambrano.

Yo dedico todo este esfuerzo a mi madre Claudia Romero y mi Padre Oscar Ruiz, que, gracias a su amor incondicional, estuvieron presentes a lo largo de este proceso y nunca dejaron de trabajar en función de mi bienestar.

Otorgo mi más sincero agradecimiento a mis hermanos Martin Ruiz, Brajan Ruiz y Andrés Ruiz que han sido la compañía más fiel a lo largo de este proceso y que siempre me tendieron la mano en momentos de incertidumbre.

Reconozco y valoro a cada persona que estuvo a mi lado en este viaje, amigos, profesores y compañeros que me enseñaron a crecer como persona.

Llevo en mi corazón, a mis dos queridas mascotas Betty y Kiki que con su presencia siempre alegraron mis días en momentos donde solo ellas estaban presentes.

Y por último me agradezco a mí mismo por haber logrado superar este reto con creces, por siempre dar todo el esfuerzo posible y nunca rendirme antes la más mínima adversidad, hoy miro para atrás y me veo con orgullo al saber que hice todo lo que estuvo en mi alcance para destacar en todos los ámbitos gracias.

Oscar Danilo Ruiz Romero.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director de tesis, Dr. Yesid Javier Rueda Ordóñez, por su invaluable orientación, apoyo y dedicación a lo largo de todo el proceso. Su guía fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a Henry Cruz y César Velasco, técnicos adscritos a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su inestimable apoyo y asesoría durante la construcción del proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos los recursos, el espacio y las herramientas necesarias para nuestro crecimiento académico. A todos los profesores y profesionales que, con su conocimiento y experiencia, contribuyeron de manera significativa a la realización de este proyecto, nuestro más profundo agradecimiento.

A nuestro codirector, Ing. Pablo Nieto, por su valiosa orientación, guía y colaboración en el desarrollo de esta investigación.

De igual manera, expresamos nuestra gratitud al Ing. Edinson Lizarazo por sus enseñanzas, disposición y constante apoyo en la realización de pruebas y actividades de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
Introducción	15
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2. Marco teórico	18
2.1 Pirólisis como proceso de degradación térmica	18
2.1.1 Pirólisis lenta	19
2.1.2 Pirólisis rápida	19
2.2 Tipos de reactores de pirólisis	21
2.2.1 Reactores de lecho fijo	21
2.2.2 Reactores de lecho móvil	21
2.2.3 Reactores de lecho fluidizado	21
2.2.4 Reactores semi discontinuos	22
2.2.5 Reactores continuos	22
3. Cálculos y análisis del diseño preliminar	23
3.1 Caracterización de la muestra	23
3.1.1 Prueba de humedad	23
3.1.2 Prueba de material volátil	24
3.1.3 Prueba de cenizas	26
3.2 Requerimiento de energía	27
3.2.1 Energía de calentamiento	28
3.2.2 Energía de pirólisis	30

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS	5
3.2.3 Energía requerida	31
3.3 Análisis calórico de alternativas.....	31
3.3.1 Gas propano	32
3.3.2 Bagazo de caña.....	33
3.4 Energía presente en el proceso	33
3.4.1 Energía sensible	34
3.4.2 Energía de descomposición.....	37
3.4.3 Energía de pirólisis.....	39
3.4.4 Energía de pérdidas	40
3.5 Mecanismos de transferencia de calor.....	40
3.5.1 Calor por conducción	40
3.5.2 Calor por convección	40
3.5.3 Calor por radiación.....	44
3.5.4 Modelo de resistencias térmicas	45
4. Diseño conceptual	47
4.1 Requerimientos de la máquina	47
4.2 Generación de alternativas	47
4.2.1 Suministros de energía	48
4.2.2 Reactor	51
4.3 Evaluación de alternativas.....	55
4.3.1 Suministro de energía.....	55
4.3.2 Reactor	56
4.4 Dimensionamiento del sistema.....	56
4.4.1 Dimensionamiento del reactor	56
4.4.2 Dimensionamiento de las flautas de gas	58
4.4.3 Dimensionamiento de la carcasa.....	59

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS	6
5. Diseño en detalle.....	60
5.1 Suministro de energía.....	60
5.1.1 Análisis del fenómeno de combustión	60
5.1.2 Cálculo del consumo de combustible.....	63
5.1.3 Relación aire-combustible.....	63
5.1.4 Selección de material	64
5.1.5 Calculo diámetro del inyector de gas	64
5.1.6 Sistema de distribución de gas	65
5.2 Reactor.....	66
5.2.1 Análisis de transferencia de calor	66
5.2.2 Análisis por convección	69
5.2.3 Análisis de radiación.....	73
5.2.4 Análisis y selección de materiales	85
5.3 Selección elementos de la junta tapa/reactor.....	86
5.4 Selección elementos estructurales	95
6. Sistema de seguridad.....	101
6.1 Cálculo de aislamiento térmico	101
6.2 Sistema de encendido	102
6.2.1 Accionamiento manual	103
6.2.2 Accionamiento automático	103
7 Lista de materiales	105
7.1 Suministro de energía.....	105
7.2 Reactor.....	106
7.3 Panel de control	107
8 Proceso de construcción.....	108
8.1 Construcción de elementos base.....	109

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS	7
8.2 Pruebas y construcción de flautas de gas	111
8.3 Desarrollo de elementos estructurales	117
8.4 Implementación del sistema de seguridad (aislamiento y control)	118
8.5 Implementación y ajuste del sistema de condensación	120
9 Puesta en marcha y resultados	122
9.1 Apreciaciones a partir de la puesta en marcha	122
9.2 Cálculo energético de los elementos	124
9.3 Cálculo del desempeño del reactor.....	128
10 Conclusiones	130
11 Recomendaciones.....	131
Referencias.....	132
Apéndices.....	135

Lista de Tablas

Tabla 1. Pruebas de humedad realizadas.	24
Tabla 2. Registro de pruebas de volátiles.	26
Tabla 3. Resumen de pruebas de cenizas.....	27
Tabla 4. Componentes de los neumáticos de un automóvil con su respectiva participación y calor específico.....	36
Tabla 5. Matriz de selección de suministro de energía.....	55
Tabla 6. Matriz de selección del reactor.	56
Tabla 7. Pruebas de masa y volumen de muestras de neumático fuera de uso a pirolizar.....	57
Tabla 8. Resultados iniciales proceso de iteración	75
Tabla 9. Variación de las variables principales con la temperatura de llama	76
Tabla 10. Valores finales cilindros concéntricos sin tapas	76
Tabla 11. Tabla resumen de factores de visión para el análisis de cilíndricos concéntricos con tapas.....	82
Tabla 12. Resumen de los valores de radiosidad	83
Tabla 13. Resumen de los valores de calor	84
Tabla 14. Iteraciones de propiedades hasta obtener una temperatura de llama calculada igual a la asumida inicialmente.....	84
Tabla 15. Resultados finales recalculados	84
Tabla 16. Resultados análisis estático del bastidor	100
Tabla 17. Caudal ventiladores.....	124
Tabla 18. Resumen de composición de compuestos de pirólisis.	129

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Características de algunos procesos de pirolisis.....	20
Figura 2. Muestra del caucho después de la prueba de humedad. Autoría: Propia.	24
Figura 3. Muestras en crisoles después de prueba de material volátil. Autoría: Propia	25
Figura 4. Recolección de cenizas de los crisoles después de la prueba Autoría: Propia	26
Figura 5. Representación de la tabla realizada en Excel para el cálculo de la energía de activación para los primeros 10 segundos. Autoría: Propia.	29
Figura 6. Registro del comportamiento del calor de descomposición a partir del instante donde ocurren las primeras variaciones. Autoría: Propia	30
Figura 7. Representación de la nula variación del calor de pirólisis debido a delta de masa constante. Autoría: Propia.....	31
Figura 8. Gráfica de termogravimetría de la llanta para tamaño de partícula de 0.5mm a diferentes gradientes de calentamiento. Autoría: Ochoa A, Mahecha D. Pag 53.	35
Figura 9. Representación del modelo de placas verticales.....	42
Figura 10. Variación de la razón de transferencia de calor a partir del radio crítico para un cilindro	46
Figura 11. Quemador de bagazo de caña Autoría: Proyecto de grado UIS.	49
Figura 12. Quemador de gas propano ubicado al interior del reactor.....	50
Figura 13. Quemador de gas propano exterior al reactor.....	51
Figura 14. Representación de alternativa de reactor tubular extraíble. Autoría: Propia.....	52
Figura 15. Alternativa de cilindro fijo como reactor fijo.	53
Figura 16. Reactor cónico extraíble.	54
Figura 17. Representación sistema distribución de gas	66
Figura 18. Esquema de resistencias térmicas del proceso	67
Figura 19. Proceso de iteración, cálculo de temperatura de llama.....	69
Figura 20. Configuración geométrica	71
Figura 21. Esquema representativo análisis de radiación 1	74
Figura 22. Representación de calor por radiación 1.....	74
Figura 23. Superficies en interacción.....	77
Figura 24. Gráficas de factores de visión para cilindro concéntricos de longitud finita. Autoría: Cengel.....	78

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS	10
Figura 25. Gráfica de factor de visión entre dos discos paralelos coaxiales.....	80
Figura 26. Ilustración de junta	86
Figura 27. Ilustración de junta en sección.....	86
Figura 28. Parámetro pi	88
Figura 29. Parámetro qi	89
Figura 30. Configuración de la junta en tensión	90
Figura 31. Dimensiones tornillos estándar nacional unificado	91
Figura 32. Representación empaque	92
Figura 33. Especificación y resistencia de la SAE pernos de acero	94
Figura 34. Estructura soporte del sistema	95
Figura 35. Masa cascaron.....	96
Figura 36. Masa reactor	97
Figura 37. Masa tapa reactor.....	98
Figura 38. Esfuerzos de tensión y flexión.....	99
Figura 39. Deformación máxima del bastidor	99
Figura 40. Factor de seguridad mínimo	100
Figura 41. Código de Arduino para accionamiento de chispa	104
Figura 42. Reactor de acero inoxidable 304	109
Figura 43. Camisa externa del reactor de acero al carbono HR.....	109
Figura 44. Brida del reactor	110
Figura 45. Brida del cascarón	110
Figura 46. Primera configuración para la salida de los gases de combustión.....	111
Figura 47. Configuración final para la salida de los gases de combustión.	111
Figura 48. Configuración de bridas.....	111
Figura 49. Prototipo de flautas.....	113
Figura 50. Flautas finales con sus correspondientes bujías	114
Figura 51. Sistema flexible de distribución de gas	115
Figura 52. Configuración de agujeros favoreciendo el paso del aire por convección natural. .	116
Figura 53. Prueba de calentamiento en vacío del reactor #2	117
Figura 54. Prueba de calentamiento en vacío del reactor #1	117
Figura 55. Bastidor construido.....	118
Figura 56. Implementación del sistema de aislamiento	119
Figura 57. Sistema completo.....	121

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS	11
Figura 58. Aceite pirolítico	123
Figura 59. Quema de gases no condensables.....	123
Figura 60. Ficha técnica bomba de la torre de enfriamiento.....	125
Figura 61. Ficha técnica ventilador de la torre de enfriamiento	125
Figura 62. Motor del turbocompresor.	126
Figura 63. Segundo ventilador utilizado.	126
Figura 64. Ventilador centrífugo ubicado a la salida del condensador.....	127
Figura 65. Ficha técnica módulo de bujías.	128

Lista de Apéndices

Apéndice A. Dirección de tabla de tabla de Excel con cálculos del proceso

Apéndice B. Planos CAD

Resumen

Título: Evaluación del funcionamiento de un reactor de pirólisis destinado al procesamiento de llantas residuales de tipo vehicular*

Autor(es): Andrés David Méndez Zambrano, Oscar Danilo Ruiz Romero**

Palabras Clave: Pirólisis, reactor, llantas residuales, evaluación

Descripción: El problema global relacionado con la gestión de residuos sólidos se ha convertido en un desafío cada vez más complejo debido a la naturaleza no biodegradable de muchos de estos materiales. Entre ellos, los neumáticos fuera de uso representan una preocupación ambiental significativa, ya que su acumulación genera impactos negativos en el entorno y dificulta su disposición final. En este contexto, la búsqueda de soluciones tecnológicas eficientes ha impulsado el desarrollo e implementación de métodos avanzados de degradación térmica, como la pirólisis, que permiten transformar estos residuos en productos de valor agregado y reducir su impacto ambiental. El presente documento presenta el diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor de pirólisis de lecho fijo, destinado al procesamiento de caucho residual derivado de llantas vehiculares. Este reactor está equipado con un sistema de generación de energía integrado y cuenta con capacidad operativa de 10 kg/h por lotes, funcionando dentro de un rango de temperatura que oscila entre los 450 y 650°C.

El diseño de este sistema es el resultado de un proceso de evaluación y selección de alternativas, en el cual se emplearon matrices de selección basadas en criterios técnicos y operativos y es fundamentado en los cálculos de requerimiento calórico del proceso y la interacción de los distintos mecanismos de transferencia de calor involucrados en la degradación térmica del caucho. Asimismo, tras la construcción, ensamblaje y puesta en marcha del reactor, se realiza una evaluación de la eficiencia energética del proceso, obteniendo un valor de 56.76%, lo que evidencia el potencial de la pirólisis como una solución viable y sostenible para la gestión de residuos sólidos.

* EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. PhD Ingeniería química. Codirector: Pablo Antonio Nieto Rangel. Ingeniero Mecánico

Abstract

Title: Evaluation of the operation of a pyrolysis reactor intended for the processing of vehicle-type waste tires*

Author (s): Andrés David Méndez Zambrano, Oscar Danilo Ruiz Romero**

Key Words: pyrolysis, reactor, waste tires, evaluation.

Description: The global problem related to solid waste management has become an increasingly complex challenge due to the non-biodegradable nature of many of these materials. Among them, end-of-life tires represent a significant environmental concern, as their accumulation generates negative impacts on the environment and complicates their final disposal. In this context, the search for efficient technological solutions has driven the development and implementation of advanced thermal degradation methods, such as pyrolysis, which allow these wastes to be transformed into value-added products while reducing their environmental impact.

This document presents the design, construction, and commissioning of a fixed-bed pyrolysis reactor intended for processing residual rubber derived from vehicle tires. This reactor is equipped with an integrated energy generation system and has an operational capacity of 10 kg/h per batch, functioning within a temperature range of 450 to 650°C.

The design of this system is the result of an evaluation and alternative selection process, in which selection matrices based on technical and operational criteria were used. It is based on the calculations of the heat requirements of the process and the interaction of the various heat transfer mechanisms involved in the thermal degradation of rubber. Likewise, after the construction, assembly, and commissioning of the reactor, an evaluation of the energy efficiency of the process is carried out, obtaining a value of 56.76%, which highlights the potential of pyrolysis as a viable and sustainable solution for solid waste management.

* EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF A PYROLYSIS REACTOR

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. PhD Ingeniería química. Codirector: Pablo Antonio Nieto Rangel. Ingeniero Mecánico

Introducción

La industria automotriz es una de las más importantes a nivel mundial ya que genera un aporte valioso a las economías nacionales debido a que es la responsable de la producción de automóviles, autopartes, llantas, entre algunos otros sectores y es así como se convierte en una de las mayores productoras de empleos a nivel mundial según un reporte de National Geographic (2019). Según la empresa EcoGreen, se trata además de la tercer mayor productora de residuos, entre los cuales se encuentran los residuos sólidos urbanos, neumáticos, aceites y entre algunos otros, en donde al menos hasta el año 2014 se depositaban alrededor de diez millones de toneladas de residuos plásticos al año en los rellenos sanitarios del planeta.

Según una de las más grandes productoras de neumáticos a nivel mundial (Michelin, s.f.), los neumáticos son desechos que una vez cumplen su vida útil la cual es no mayor a 10 años deben recibir un tratamiento especial debido a que su acumulación genera la liberación de sustancias químicas al aire, suelo y agua, generando alteraciones en el ecosistema. Por otra parte, la quema de estos materiales libera nubes de humo negro tóxico en el aire compuestas por dióxido de carbono, azufre, compuestos clorados entre otros elementos lo que hace que esta alternativa de disposición final sea inviable. Así mismo, el almacenamiento de estos neumáticos genera un alto costo, ya que requieren de estar en condiciones óptimas de temperatura y humedad que no faciliten la propagación de plagas e insectos, además, este proceso resulta siendo ineficiente, ya que solo el 10% de estos materiales se puede reciclar en usos como drenajes, céspedes artificiales, rellenos para construcciones, entre otras, esto según lo presentado por el reporte del gobierno argentino (Mendoza. 2021).

Es por ello que se plantea la siguiente hipótesis de investigación; el desarrollo de un reactor de pirólisis es una alternativa energéticamente viable que permitiría el aprovechamiento de las

llantas que cumplieron su vida útil con el fin de obtener aceites, grasas lubricantes y en general productos petroquímicos de alto valor añadido, trabajando en beneficio del uso de los residuos sólidos, fomentando la ciencia e investigación, favoreciendo la implementación de nuevas prácticas que le permitan al ser humano el aprovechamiento de sus residuos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el funcionamiento y desempeño de un reactor de pirólisis que procese 10kg/h de caucho residual proveniente de llantas vehiculares para su posterior implementación en una planta a escala piloto.

1.2 Objetivos Especificos

Desarrollar un reactor con capacidad de 10kg/h de caucho residual que permita llevar a cabo el proceso de pirólisis destinado al procesamiento de llantas vehiculares y que opere bajo un rango de temperaturas entre los 400 y 650 grados Celsius.

Implementar un sistema de calentamiento para garantizar el suministro de energía requerida para llevar a cabo el proceso de pirólisis con base en los parámetros de diseño y operación.

Determinar el desempeño del reactor de pirólisis a través del análisis de los parámetros de funcionamiento relacionados al consumo y eficiencia energética.

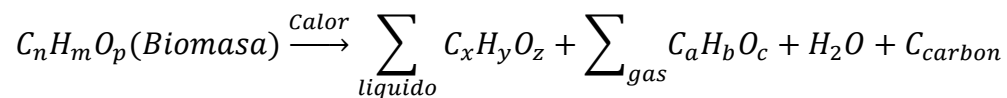
2. Marco teórico

Esta sección presenta como propósito presentar conceptos y principios fundamentales relacionados con la pirólisis aplicado en neumáticos. El principal objetivo es proporcionar herramientas conceptuales que permitan la comprensión de fundamentos científicos que permitan llevar a cabo el diseño y construcción de una planta de pirólisis.

2.1 Pirólisis como proceso de degradación térmica

La pirólisis corresponde a un proceso de descomposición química de compuestos orgánicos con la característica de ocurrir en ausencia de oxígeno y entre unas temperaturas que oscilan los 450 y 650°C, siendo el objetivo de este proceso el rompimiento de las cadenas largas de hidrocarburos en pequeñas cadenas. Durante este proceso se genera un gas de síntesis de los productos volátiles que posteriormente es condensado y un residuo sólido enriquecido de carbono como lo presenta (Tecam, s.f.).

El proceso de pirólisis se puede representar a modo de reacción genérica como:



Una de las características que definen los productos finales de este proceso es la velocidad de calentamiento, separándose en dos tipos de pirólisis, la pirólisis lenta y pirólisis rápida o flash.⁵

Los productos de la pirólisis se clasifican en tres tipos:

- Sólidos: Se obtiene principalmente carbono que puede contener oxígeno e hidrógeno, el PCI de estos productos sólidos es aproximadamente de 32 MJ/kg que es ligeramente superior al PCI de la biomasa original y de su fracción líquida (Basu, 2010).

- Líquidos: El bio-oil (también llamado alquitrán, bioaceite o biocrudo) es un líquido negro y viscoso que contiene hasta un 20% de agua. Su composición principal incluye compuestos fenólicos homólogos y una mezcla compleja de hidrocarburos con altos niveles de oxígeno y agua su PCI se encuentra alrededor de los 13-18MJ/kg en base húmeda.

Según Nkosi, et al. (2020) el poder calorífico del aceite pirolítico obtenido de llantas residuales es de alrededor de 44MJ/Kg, sin embargo, Williams, 2020. este poder calorífico es de 40,81MJ/Kg.⁷

- La biomasa original tiene un poder calorífico inferior (PCI) de 19.5 a 21 MJ/kg (base seca), mientras que el *bio-oil* tiene un PCI menor, de 13 a 18 MJ/kg (base húmeda).

Para el caso de los neumáticos fuera de uso, según Merchan. (2014) las llantas tienen un poder calorífico de 37-38KJ/Kg.⁸

- Gas: La pirólisis de biomasa genera gases condensables (que se enfrían y contribuyen al *bio-oil*) y gases no condensables (como CO₂, CO, metano y etileno). Estos últimos incluyen gases primarios (PCI de 11 MJ/Nm³) y gases secundarios, formados por craqueo severo, con un PCI de 20 MJ/Nm³.

2.1.1 Pirólisis lenta

La pirólisis se caracteriza por desarrollarse a una temperatura de proceso más baja, una velocidad de calentamiento más baja y tiempos de residencia en el reactor más largos, favoreciendo la producción de carbón, según (PUCP. 2012).

2.1.2 Pirólisis rápida

La pirólisis rápida o flash se conoce de esta manera por el rápido calentamiento de la biomasa y el corto tiempo de residencia de la misma, en donde los procesos de transferencia de

calor son importantes al igual que la cinética para que se lleven a cabo correctamente los fenómenos de cambio de fase. En este proceso la biomasa se descompone para generar principalmente vapores, aerosoles y una pequeña cantidad de coque. El producto líquido finalmente condensado tiene un color marrón particularmente oscuro que se denomina como bioaceite con un valor calórico inferior al diesel (Wang. 2024).

Para el correcto desarrollo de este proceso es importante garantizar las siguientes características: (a) someter las partículas de biomasa a una temperatura óptima para que reaccionen y (b) minimizar su exposición a temperaturas intermedias y bajas que estimulen la formación de coque. Para ello *Bridgwater* realiza algunas recomendaciones como; priorizar el uso de pequeñas partículas como las que son usadas en el lecho fluidizado y garantizar una transferencia de calor rápida a la superficie de contacto con las partículas (Wang. 2024).

Pyrolysis Process	Residence Time	Heating Rate	Final Temperature (°C)	Products
Carbonization	Days	Very low	400	Charcoal
Conventional	5–30 min	Low	600	Char, bio-oil, gas
Fast	<2 s	Very high	~500	Bio-oil
Flash	<1 s	High	<650	Bio-oil, chemicals, gas
Ultra-rapid	<0.5 s	Very high	~1000	Chemicals, gas
Vacuum	2–30 s	Medium	400	Bio-oil
Hydropyrolysis	<10 s	High	<500	Bio-oil
Methano-pyrolysis	<10 s	High	>700	Chemicals

Figura 1. Características de algunos procesos de pirólisis

Autoría: *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Pag 72.

2.2 Tipos de reactores de pirólisis

2.2.1 Reactores de lecho fijo

Los reactores de lecho fijo son recipientes que son calentados a través de su zona inferior lo cual genera un perfil térmico a lo largo de sus paredes, entre las características de este tipo de reactores se destaca su calentamiento indirecto en la mayoría de los casos, evitando la fluidización en el lecho, su fácil diseño y funcionamiento y son empleados ya que no poseen limitación en cuanto al tamaño de partículas con el que operan.

Por otra parte, se denominan reactores de lecho fijo a aquellos en donde se tienen rangos de flujo o velocidades bajas que ocasionan que las partículas se apilen en la parte baja del lecho, lo que provoca que la transferencia de calor entre ellas sea no uniforme, facilitando la formación de alquitrán (Wang. 2024).

2.2.2 Reactores de lecho móvil

Los reactores de lecho móvil son aquellos donde la biomasa a descomponer se mantiene en constante movimiento por medio de mecanismos accionados como tornillos sin fin o de manera natural debido a la gravedad, esto permite una mejor uniformidad de temperatura, permitiendo así una mayor tasa de degradación de biomasa, este tipo de lechos son particularmente utilizados cuando se trabaja con una biomasa de tamaño irregular.

Algunas características de este tipo de reactores son la reducción de la formación de coque debido a su uniformidad de temperatura y permite un mayor control del proceso (Speight. 2016)

2.2.3 Reactores de lecho fluidizado

Los reactores de lecho fluidizado son aquellos en donde el agente inerte o catalizador se logra fluidizar con la biomasa aumentando la transferencia de calor producto del contacto entre los gases inertes y el material sólido (Speight. 2016). Dentro de las características de este tipo de

reactores se encuentra un mejor control de la temperatura y además permite una distribución uniforme del catalizador permitiendo un mayor rendimiento respecto a los demás tipos de lecho (Parr. s.f.).

2.2.4 Reactores semi discontinuos

Este tipo de reactores semi discontinuos son recipientes donde algunos de los reactivos se agregan inicialmente y el resto se agrega de manera gradual durante el proceso de reacción. Este tipo de reactores son mayormente utilizados en reacciones que involucran sistemas gas-líquido o líquido-líquido y permiten un mayor control sobre la velocidad de reacción y la selectividad, sin embargo, la operación compleja y el rendimiento variable hace que estos reactores se encuentren en constante mantenimiento (Parr. s.f.).

2.2.5 Reactores continuos

Este tipo de reactores son recipientes que permiten una alimentación constante de reactivos, así mismo los productos se eliminan gradualmente. Son destacados por ser altamente eficientes, consistentes y escalables, ya que operan en estado estacionario y logran una alta conversión y productividad, son mayormente utilizados en la producción a gran escala. Sin embargo, los mayores desafíos que enfrentan estos reactores son sus altos costos, serias afectaciones debido a perturbaciones y fluctuaciones y su compleja operación (Martin, E. Durán G. 2014).

3. Cálculos y análisis del diseño preliminar

En esta etapa se realizan los cálculos previos que tienen como fin iniciar el proceso de generación de alternativas, para ello, se realiza una caracterización de los neumáticos a pirolizar, acto seguido se determinan las dimensiones mínimas del reactor, posteriormente, se analiza el requerimiento de energía para llevar a cabo el proceso de degradación térmica y finalmente el análisis calorífico de dos posibles alternativas.

3.1 Caracterización de la muestra

Se realiza un análisis próximo a una serie de muestras con el fin de conocer algunas propiedades de la materia como lo son la humedad, el contenido de material volátil y las cenizas, todo esto haciendo uso de la mufla y bajo las normas ISO 1171 de 2010, 11722 del 2013 y 562 del 2010, que rigen cada uno de estos experimentos.

3.1.1 Prueba de humedad

El contenido de humedad se obtiene por medio del calentamiento de 9 muestras de entre 1 y 2 gramos en diferentes momentos, las cuales se depositan en cajas de Petri y se introducen al horno precalentado a una temperatura de $100^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ por un tiempo mínimo de 3 horas, posteriormente estas muestras se retiran del horno y se disponen en un contenedor desecador por un tiempo de 10 minutos para posteriormente pesar los contenedores y la diferencia de masa corresponde a la humedad.



Figura 2. Muestra del caucho después de la prueba de humedad.

Autoría: Propia.

A partir de estas pruebas se obtuvo un porcentaje de humedad en peso de 1.309%, el cual se contrasta con el valor obtenido por Sánchez (2013) que corresponde a 0.92%.

Tabla 1. Pruebas de humedad realizadas.

		PRUEBAS HUMEDAD							
FECHA	No. Prueba	Probeta	Peso probeta	Peso biomasa inicial	Peso prob + biomasa	Peso prob+bio d.mufla	HUMEDAD	% Humedad en peso	PROMEDIO
Nov-14	1	1	45.8716	1.5995	47.4711	47.4516	0.0195	1.219130978	1.346429816
		2	42.3315	1.6273	43.9588	43.9356	0.0232	1.42567443	
		3	38.1193	1.6135	39.7328	39.7103	0.0225	1.394484041	
14-Nov	2	1	19.3557	1.4504	20.8061	20.7858	0.0203	1.3996139	1.290797574
		2	17.2616	1.6631	18.9247	18.9043	0.0204	1.226624977	
		3	18.1323	1.95	20.0823	20.058	0.0243	1.246153846	
11/18/2024	3	1	45.8718	1.875	47.7468	47.721	0.0258	1.376	1.292312279
		2	37.1285	1.6213	38.7498	38.7286	0.0212	1.307592673	
		3	43.3512	1.7849	45.1361	45.1148	0.0213	1.193344165	
PROMEDIO TOTAL								1.309846557	

3.1.2 Prueba de material volátil

Se realizan las pruebas de material volátil a partir de las muestras que previamente han sido secadas, para ello, se dispone las muestras de llanta en crisoles con tapa los cuales se introducen al horno precalentado a $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ por un tiempo de 7 minutos, una vez finalizada la prueba,

son retirados y preservados sobre un material refractario para su enfriamiento y posteriormente pesaje.



Figura 3. Muestras en crisoles después de prueba de material volátil.

Autoría: Propia

Según un estudio desarrollado por Müfide et al (2012), el porcentaje de material volátil corresponde al 65.45% de la muestra, y el valor obtenido por las pruebas realizadas corresponde a 64.82%, comparando estos dos valores se tiene que el porcentaje de error corresponde a 0.96%. Por otra parte, la desviación estándar de los porcentajes de material volátil de cada prueba es de 0.3743

Tabla 2. Registro de pruebas de volátiles.

PRUEBAS VOLÁTILES									
FECHA	No. Prueba	Probeta	Probeta + tapa	Peso biomasa inicial	Peso prob + biomasa	Peso total d.mufla	Masa Volatil	%Volátiles	Volatiles Prom
Nov-14	1	1	38.9336	1.0172	39.9508	39.2907	0.6601	64.8938262	64.95958503
		2	35.5032	1.0006	36.5038	35.8521	0.6517	65.1309214	
		3	37.7049	1.0206	38.7255	38.0636	0.6619	64.8540074	
14-Nov	2	1	37.3614	1.1101	38.4715	37.7512	0.7203	64.8860463	64.90927078
		2	42.1052	1.0489	43.1541	42.4716	0.6825	65.0681667	
		3	34.0346	1.1727	35.2073	34.4477	0.7596	64.7735994	
18-Nov	3	1	43.2656	1.0281	44.2937	43.6228	0.6709	65.256298	64.59380493
		2	43.5173	1.345	44.8623	44.0015	0.8608	64	
		3	35.7567	1.2203	36.977	36.1896	0.7874	64.5251168	
PROMEDIO TOTAL								64.82088691	

3.1.3 Prueba de cenizas

Finalmente, se realizan las pruebas de cenizas a partir de las muestras a las que previamente se le han realizado las pruebas de material volátil, para ello inicialmente se quitan las tapas de los crisoles y se introducen al horno previamente calentado a $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por un tiempo mínimo de 3 horas, una vez terminada la prueba se retiran y se conservan sobre un material refractario para su enfriamiento y posterior pesaje. A partir de los valores obtenidos, se realiza la diferencia respecto al valor de masa inicialmente ingresado al horno y se obtiene el valor de cenizas y su porcentaje en peso de la muestra inicial.



Figura 4. Recolección de cenizas de los crisoles después de la prueba

Autoría: Propia

Según un estudio desarrollado por Müfide et al (2012), el porcentaje de cenizas corresponde al 3.8% de la muestra, y el valor obtenido por las pruebas realizadas corresponde a 3.49%. Comparando los valores de porcentaje de ceniza en peso, se obtiene una desviación estándar de 0.1921 y, por último, el porcentaje de error entre el valor teórico y experimental de 8.14%.

Tabla 3. Resumen de pruebas de cenizas

FECHA	PRUEBAS CENIZAS								PROMEDIO
	No. Prueba	Probeta	Peso probeta	Peso biomasa inicial	Peso prob + biomasa	Peso salida mufla	CENIZAS	%CENIZAS en peso	
Nov-14	1	1	38.6306	0.6601	39.2907	39.2672	0.0235	3.560066657	3.61305381
		2	35.2004	0.6517	35.8521	35.8278	0.0243	3.728709529	
		3	37.4017	0.6619	38.0636	38.0401	0.0235	3.550385255	
11/14/2024	2	1	37.0309	0.7203	37.7512	37.728	0.0232	3.220880189	3.35021919
		2	41.7891	0.6825	42.4716	42.447	0.0246	3.604395604	
		3	33.6881	0.7596	34.4477	34.4232	0.0245	3.22538178	
11/18/2024	3	1	42.9519	0.6709	43.6228	43.5978	0.025	3.726337755	3.50810124
		2	43.1407	0.8608	44.0015	43.9725	0.029	3.368959108	
		3	35.4022	0.7874	36.1896	36.1626	0.027	3.429006858	
PROMEDIO TOTAL								3.49045808	

3.2 Requerimiento de energía

Para el cálculo de la energía requerida para llevar a cabo correctamente el proceso de degradación térmica se discretiza el proceso en las dos (2) grandes etapas que atraviesa la biomasa al interior del reactor. De esta manera se obtiene el valor de la energía a suministrar. Estas etapas consisten en el secado y la descomposición térmica de la biomasa.

3.2.1 Energía de calentamiento

3.2.1.1 Calor sensible. Antes de obtener el calor sensible, es necesario determinar la capacidad calorífica de los neumáticos NFU, el cual se analiza como un promedio de los compuestos que lo componen y su porcentaje de participación haciendo uso de la ecuación (2).

$$Cp_{NFU_inf} = ((1.88 * 0.4 + 1.9 * 0.6) * 0.6) + (1.9 * 0.2) + (0.45 * 0.1) \\ + (1.1 * 0.05) + (1.5 * 0.05) = 1.7 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$Cp_{NFU_sup} = ((2 * 0.4 + 2.15 * 0.6) * 0.6) + (2.2 * 0.2) + (0.5 * 0.1) \\ + (1.5 * 0.05) + (2 * 0.05) = 1.9 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

Cp: Capacidad calorífica específica [kJ/kgK]; [1.7 – 1.9]

Comprando el valor obtenido mediante estos cálculos con el valor encontrado en la tabla 2, es posible determinar que los valores se acercan al valor real de la capacidad calorífica específica de los neumáticos NFU. Desarrollando la ecuación (1) y asumiendo como máximo el valor de Cp de neumáticos fuera uso, se obtiene que:

$$Q_{sensible} = 10 * 1.9 * (180 - 25)$$

$$Q_{sensible} = 2945 [kJ]$$

3.2.1.2 Calor de descomposición. El cálculo de este calor de descomposición se obtuvo por medio de Excel para 3600 segundos ya que este reactor va a operar por una hora, a continuación, se presenta a modo de ejemplo el análisis para los primeros 10 segundos.

Tiempo t[s]	n=#pruebas	Alpha iterativo		Alpha calculado		Temperatura [K]		Masa		Calor descomposición	
		alpha = X _n	Y _n	Y _{n+1}	T(t)	m(t) [kg]	1/T[t]	Q[kJ]			
0	0	0	0	4,35E-18	453,15	10	0,00221	0,000000000			
0,5	1	0,00013889	4,35E-18	8,75299E-18	453,2298611	9,99907	0,00221	1,717013889			
1	2	0,00027778	8,753E-18	1,32044E-17	453,3097222	9,99814	0,00221	1,717013889			
1,5	3	0,000416667	1,32E-17	1,77065E-17	453,3895833	9,99721	0,00221	1,717013889			
2	4	0,000555556	1,771E-17	2,22599E-17	453,4694444	9,99628	0,00221	1,717013889			
2,5	5	0,000694444	2,226E-17	2,6865E-17	453,5493056	9,99535	0,0022	1,717013889			
3	6	0,000833333	2,687E-17	3,15225E-17	453,6291667	9,99442	0,0022	1,717013889			
3,5	7	0,000972222	3,152E-17	3,6233E-17	453,7090278	9,99349	0,0022	1,717013889			
4	8	0,001111111	3,623E-17	4,0997E-17	453,7888889	9,99256	0,0022	1,717013889			
4,5	9	0,00125	4,1E-17	4,58152E-17	453,86875	9,99163	0,0022	1,717013889			
5	10	0,001388889	4,582E-17	5,06881E-17	453,9486111	9,99069	0,0022	1,717013889			
5,5	11	0,001527778	5,069E-17	5,56163E-17	454,0284722	9,98976	0,0022	1,717013889			
6	12	0,001666667	5,562E-17	6,06004E-17	454,1083333	9,98883	0,0022	1,717013889			
6,5	13	0,001805556	6,06E-17	6,56411E-17	454,1881944	9,9879	0,0022	1,717013889			
7	14	0,001944444	6,564E-17	7,07389E-17	454,2680556	9,98697	0,0022	1,717013889			
7,5	15	0,002083333	7,074E-17	7,58945E-17	454,3479167	9,98604	0,0022	1,717013889			
8	16	0,002222222	7,589E-17	8,11086E-17	454,4277778	9,98511	0,0022	1,717013889			
8,5	17	0,002361111	8,111E-17	8,63817E-17	454,5076389	9,98418	0,0022	1,717013889			
9	18	0,0025	8,638E-17	9,17146E-17	454,5875	9,98325	0,0022	1,717013889			
9,5	19	0,002638889	9,171E-17	9,71078E-17	454,6673611	9,98232	0,0022	1,717013889			
10	20	0,002777778	9,711E-17	1,02562E-16	454,7472222	9,98139	0,0022	1,717013889			
10,5	21	0,002916667	1,026E-16	1,08078E-16	454,8270833	9,98046	0,0022	1,717013889			
11	22	0,003055556	1,081E-16	1,13656E-16	454,9069444	9,97953	0,0022	1,717013889			

Figura 5. Representación de la tabla realizada en Excel para el cálculo de la energía de activación para los primeros 10 segundos.

Autoría: Propia.

Cabe resaltar que el calor de descomposición se mantiene constante desde el instante 0 hasta aproximadamente el minuto 12, en donde se tiene una temperatura de 567.19 K, a partir de allí el valor comienza a descender en una pequeña tasa. A continuación, se ilustra una pequeña muestra de ello.

Tiempo t[s]	#n pruebas	Alpha iterativo a=X _r	Y _n	calculado Y _{n+1}	Temperatura T(t)	Masa [Kg]	1/T [K]	Calor de descomposición
712,5	1425	0,197916667	2,2061E-10	2,22263E-10	566,9520833	8,67396	0,00176	1,717013889
713	1426	0,198055556	2,2226E-10	2,23922E-10	567,0319444	8,67303	0,00176	1,717013889
713,5	1427	0,198194444	2,2392E-10	2,25594E-10	567,1118056	8,6721	0,00176	1,717013889
714	1428	0,198333333	2,2559E-10	2,27277E-10	567,1916667	8,67117	0,00176	1,717013888
714,5	1429	0,198472222	2,2728E-10	2,28973E-10	567,2715278	8,67024	0,00176	1,717013888
715	1430	0,198611111	2,2897E-10	2,3068E-10	567,3513889	8,66931	0,00176	1,717013888
715,5	1431	0,19875	2,3068E-10	2,324E-10	567,43125	8,66838	0,00176	1,717013888
716	1432	0,198888889	2,324E-10	2,34133E-10	567,5111111	8,66744	0,00176	1,717013888
716,5	1433	0,199027778	2,3413E-10	2,35877E-10	567,5909722	8,66651	0,00176	1,717013888
717	1434	0,199166667	2,3588E-10	2,37635E-10	567,6708333	8,66558	0,00176	1,717013888
717,5	1435	0,199305556	2,3763E-10	2,39404E-10	567,7506944	8,66465	0,00176	1,717013888
718	1436	0,199444444	2,394E-10	2,41187E-10	567,8305556	8,66372	0,00176	1,717013888
718,5	1437	0,199583333	2,4119E-10	2,42982E-10	567,9104167	8,66279	0,00176	1,717013888
719	1438	0,199722222	2,4298E-10	2,4479E-10	567,9902778	8,66186	0,00176	1,717013888
719,5	1439	0,199861111	2,4479E-10	2,46611E-10	568,0701389	8,66093	0,00176	1,717013888
720	1440	0,2	2,4661E-10	2,48445E-10	568,15	8,66	0,00176	1,717013888
720,5	1441	0,200138889	2,4845E-10	2,50292E-10	568,2298611	8,65907	0,00176	1,717013888
721	1442	0,200277778	2,5029E-10	2,52152E-10	568,3097222	8,65814	0,00176	1,717013888
721,5	1443	0,200416667	2,5215E-10	2,54026E-10	568,3895833	8,65721	0,00176	1,717013888
722	1444	0,200555556	2,5403E-10	2,55913E-10	568,4694444	8,65628	0,00176	1,717013888
722,5	1445	0,200694444	2,5591E-10	2,57814E-10	568,5493056	8,65535	0,00176	1,717013888
723	1446	0,200833333	2,5781E-10	2,59728E-10	568,6291667	8,65442	0,00176	1,717013888
723,5	1447	0,200972222	2,5973E-10	2,61655E-10	568,7090278	8,65349	0,00176	1,717013888
724	1448	0,201111111	2,6166E-10	2,63597E-10	568,7888889	8,65256	0,00176	1,717013888

Figura 6. Registro del comportamiento del calor de descomposición a partir del instante donde ocurren las primeras variaciones.

Autoría: Propia

Nota: La tabla completa de Excel se encuentra como apéndice A.

Finalmente, se suman los pequeños valores de energía en cada instante analizado y se obtiene como resultado un calor de descomposición de **11527.854 [kJ]**.

3.2.2 Energía de pirólisis

Para el cálculo de la energía liberada o absorbida por parte del proceso de pirólisis se hace uso de la ecuación (8) de calor de pirólisis a partir de los parámetros indicados en el ítem 2.3.3 se obtiene que el calor de pirólisis tiene un valor de:

$$Q_{pirólisis} = 10[Kg] * 6 \left[\frac{MJ}{Kg} \right] = 60000 [kJ]$$

Para este caso, se discretiza de igual manera que en la energía de activación para cada diferencial de masa que reacciona, sin embargo, como se observa en la figura 9, el calor de pirólisis en cada instante es el mismo debido a que el diferencial de masa que reacciona no varía.

Tiempo t[s]	n=#pruebas	Alpha iterativo		Alpha calculado		Temperatura [K]		Masa		Calor activación		$\Delta Q_{PIRÓLISIS}$ Q[Kj]
		alpha = X_n	Y_n	Y_n+1	T(t)	m(t) [kg]	1/T[t]	Q[kj]				
0	0	0	0	4,35E-18	453,15	10	0,00221	0,000000000	0			
0,5	1	0,00013889	4,35E-18	8,75299E-18	453,2298611	9,99907	0,00221	1,717013889	5,5833333			
1	2	0,00027778	8,753E-18	1,32044E-17	453,3097222	9,99814	0,00221	1,717013889	5,5833333			
1,5	3	0,000416667	1,32E-17	1,77065E-17	453,3895833	9,99721	0,00221	1,717013889	5,5833333			
2	4	0,000555556	1,771E-17	2,22599E-17	453,4694444	9,99628	0,00221	1,717013889	5,5833333			
2,5	5	0,000694444	2,226E-17	2,6865E-17	453,5493056	9,99535	0,0022	1,717013889	5,5833333			
3	6	0,000833333	2,687E-17	3,15225E-17	453,6291667	9,99442	0,0022	1,717013889	5,5833333			
3,5	7	0,000972222	3,152E-17	3,6233E-17	453,7090278	9,99349	0,0022	1,717013889	5,5833333			
4	8	0,001111111	3,623E-17	4,0997E-17	453,7888889	9,99256	0,0022	1,717013889	5,5833333			
4,5	9	0,00125	4,1E-17	4,58152E-17	453,86875	9,99163	0,0022	1,717013889	5,5833333			
5	10	0,001388889	4,582E-17	5,06881E-17	453,9486111	9,99069	0,0022	1,717013889	5,5833333			
5,5	11	0,001527778	5,069E-17	5,56163E-17	454,0284722	9,98976	0,0022	1,717013889	5,5833333			
6	12	0,001666667	5,562E-17	6,06004E-17	454,1083333	9,98883	0,0022	1,717013889	5,5833333			
6,5	13	0,001805556	6,06E-17	6,56411E-17	454,1881944	9,9879	0,0022	1,717013889	5,5833333			
7	14	0,001944444	6,564E-17	7,07389E-17	454,2680556	9,98697	0,0022	1,717013889	5,5833333			
7,5	15	0,002083333	7,074E-17	7,58945E-17	454,3479167	9,98604	0,0022	1,717013889	5,5833333			
8	16	0,002222222	7,589E-17	8,11086E-17	454,4277778	9,98511	0,0022	1,717013889	5,5833333			
8,5	17	0,002361111	8,111E-17	8,63817E-17	454,5076389	9,98418	0,0022	1,717013889	5,5833333			
9	18	0,0025	8,638E-17	9,17146E-17	454,5875	9,98325	0,0022	1,717013889	5,5833333			
9,5	19	0,002638889	9,171E-17	9,71078E-17	454,6673611	9,98232	0,0022	1,717013889	5,5833333			
10	20	0,002777778	9,711E-17	1,02562E-16	454,7472222	9,98139	0,0022	1,717013889	5,5833333			

Figura 7. Representación de la nula variación del calor de pirólisis debido a delta de masa constante.

Autoría: Propia

3.2.3 Energía requerida

Para este caso se suman los valores de calor de calentamiento y pirólisis y por efectos de las pérdidas asociadas al proceso se agrega un 10% dando como resultado del siguiente valor de energía requerida.

$$Q_{total} = Q_{activación} + Q_{pirólisis} + 0.1(Q_{activación} + Q_{pirólisis}) \quad (24)$$

$$Q_{total} = 74472.8536 + 0.1(74472.8536)$$

$$Q_{total} = 81920.14[kJ] = 77690.68 \left[\frac{BTU}{h} \right] = 22.756 [kW]$$

3.3 Análisis calórico de alternativas

A continuación, se realiza el análisis calórico de dos posibles alternativas de combustible para el suministro de energía del reactor.

3.3.1 Gas propano

Para el análisis calórico del gas propano se establece inicialmente el poder calorífico superior que corresponde a la cantidad total de calor liberado cuando se quema una unidad de combustible incluyendo la energía contenida en el valor de agua producido durante la combustión.

Este valor según el ministerio de minas y energía corresponde a 93.6 [MJ/m³] o 50.35 [MJ/kg].

Además, planteando la posibilidad de movilizar el reactor para realizar diversidad de pruebas, se analiza la cantidad de pruebas mínimas a realizar haciendo uso del tanque de gas más comercial que corresponde a la pipeta de 40 libras (este valor corresponde a la masa de gas contenida en el recipiente). Para ello, se calcula del volumen de líquido que cabe en dicha pipeta, a partir de las siguientes consideraciones y de la ecuación 22.

- Densidad del propano: 493 kg/m³
- Masa del gas contenido en el recipiente: 40Lb = 18.144 Kg

$$Volumen = \frac{Masa}{Densidad} \quad (25)$$

De este modo, se obtiene que el cilindro de 40 Lb posee un volumen de 0.0368 m³ de propano en estado líquido.

Finalmente, puesto que, al liberar el propano del cilindro, el gas se expande y que el factor de expansión del propano líquido a gas es aproximadamente 270 veces según la literatura, el volumen de gas corresponde a 9.936 m³.

Dando como resultado que un cilindro de gas de 40 Libras aporta una capacidad de calorífica de 930.0096[MJ].

Para el cálculo de la cantidad de pruebas mínimas a realizar haciendo uso de este cilindro de 40 Libras, y considerando una eficiencia de combustión del 90% se obtiene que este número de pruebas corresponde a 10. De igual manera, para el caso del cilindro de menor capacidad comercial se realizaron los correspondientes cálculos, obteniendo como resultado una cantidad de pruebas de 2.

3.3.2 Bagazo de caña

El bagazo de caña corresponde a la materia prima requerida para operar el quemador ciclónico el cual se encuentra en el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica. Este quemador fue construido como proyecto de grado por unos estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica y fue utilizado hasta el año 2022 como un instrumento para el desarrollo del componente práctico de la asignatura de combustión industrial por el profesor Diego Luis Franco Jácome, es por esta razón que se evalúa esta alternativa de biomasa para la generación de energía. En primer lugar, según la literatura el poder calorífico del bagazo de caña depende de su contenido de humedad, composición, entre algunos otros factores, y su valor oscila entre los 17572.8 y 18828 kJ/Kg.

De esta manera se obtiene que, para la realización de una prueba con el uso de esta biomasa, se requeriría alrededor de 4.351 kg de bagazo de caña. Finalmente, realizando la comparativa con la cantidad de pruebas a realizar bajo un suministro de gas, se obtiene que se requerirían 43.51 kg para 10 pruebas y 8.702 kg para 2 pruebas.

3.4 Energía presente en el proceso

La energía que interviene en el proceso de pirólisis se rige por los tres grandes procesos que atraviesa la biomasa al interior del reactor. Estos tres procesos corresponden al secado, descomposición y la degradación térmica de la biomasa.¹²

En primer lugar, la biomasa aumenta su temperatura hasta el punto en donde la humedad presente en la muestra se evapora, es allí donde se observa una primera pérdida de masa, acto seguido inicia el proceso de descomposición en donde las partículas excitadas e inician el proceso de rompimiento de las grandes cadenas de hidrocarburos en pequeñas redes, manteniendo su estado sólido en todo momento. Finalmente, la energía de degradación es la responsable de la transformación del cambio de fase del material.¹³

A continuación, se describen cada una de estas energías y así mismo se analiza una energía extra para efectos del diseño.

3.4.1 Energía sensible

Es la requerida para eliminar la humedad presente en la biomasa, es decir, es la energía necesaria para generar un aumento en su temperatura sin alterar su estado sólido inicial. Para ello se considera el calentamiento de la muestra desde la temperatura inicial, la cual se considera como la temperatura ambiente, en este caso alrededor de 25°C, hasta una temperatura aproximada de 180°C, punto en el cual se observa la primera pérdida de masa considerable, que se trata del punto en donde la muestra ha perdido en mayor medida su humedad, como se muestra en el análisis termogravimétrico de la figura 2.

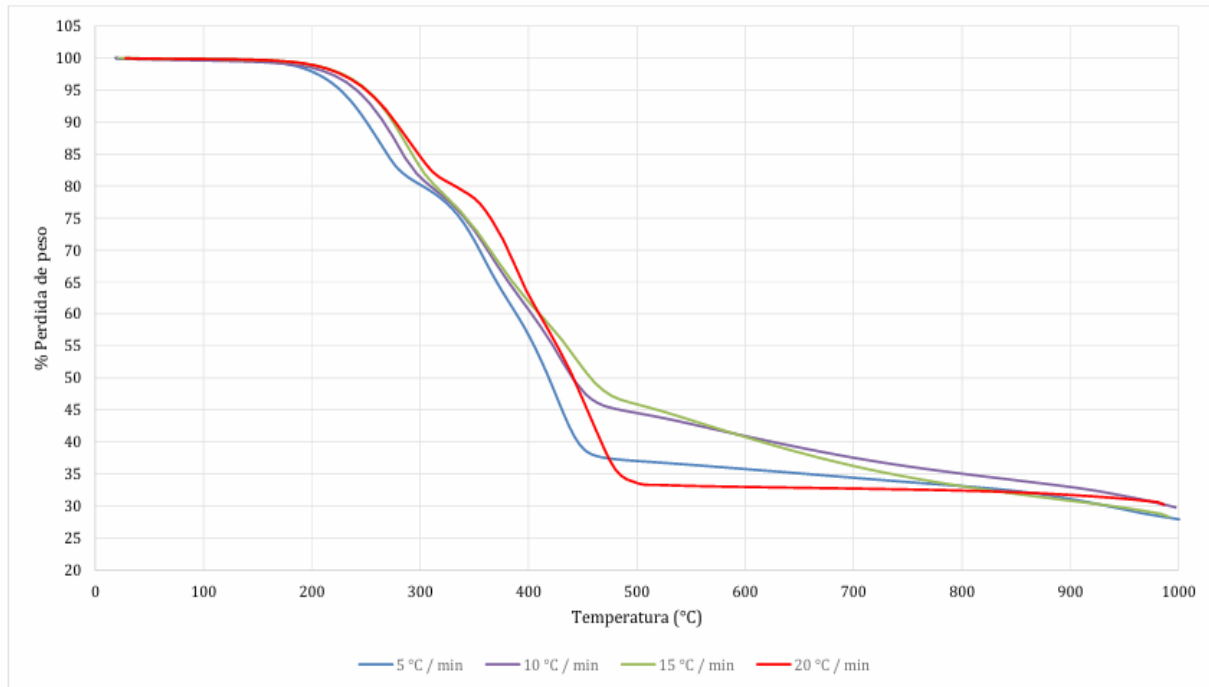


Figura 8. Gráfica de termogravimetría de la llanta para tamaño de partícula de 0.5mm a diferentes gradientes de calentamiento.

Autoría: Ochoa A, Mahecha D. Pag 53.

Esta energía térmica se obtiene por medio del análisis termodinámico, de manera específica para los neumáticos fuera de uso (NFU) como se menciona a continuación.

$$Q_{sensible} = m * Cp_{NFU} * (T_{@humedad\ 0_{NFU}} - T_{i_{NFU}}) \quad (1)$$

En donde:

m : Cantidad de biomasa [Kg]; 10

Cp_{NFU} : Capacidad calorífica específica de neumáticos fuera de uso [kJ/kg]

$T_{@humedad\ 0_{NFU}}$: Temperatura a la cual que la humedad es aproximadamente cero;

180°C

$T_{i_{NFU}}$: Temperatura ambiente de la ciudad; 25°C

Para el cálculo de la capacidad calorífica de los neumáticos fuera de uso se puede obtener un valor aproximado por medio del análisis de la composición, la cual se muestra en la tabla 1.

Para ello, la composición aproximada de los neumáticos de un automóvil es la siguiente según el centro de estudios y experimentación de obras.

Tabla 4. Componentes de los neumáticos de un automóvil con su respectiva participación y calor específico

Componente	Porcentaje	Calor específico [Kj/Kg*K]
Caucho (natural + sintético SBR y BR)	40-60%	Nat: 1.88 – 2.00 SBR: 1.9-2.10; BR: 1.9 – 2.2
Negro de humo	20-30%	1.90 – 2.20
Acero (Refuerzos)	10-15%	0.45 – 0.50
Textiles	5-10%	1.10 – 1.50
Aditivos químicos	5-10%	1.50 – 2.00

De esta manera se tiene que:

$$C_{p_{NFU}} = [(Caucho_{nat} * 40\% + Caucho_{sint} * 60\%) * \%Participación] + (Negro_h * \%Participación) + (Acero * \%Participación) + (Textiles * \%Participación) + (Aditiv * \%Participación) \quad (2)$$

Por otra parte, modelando los neumáticos NFU como caucho vulcanizado blando (*Rubber vulcanized soft*), según el manual de transferencia de calor se tiene un valor de 2.01[kJ/Kg*K].

Tabla 5. Propiedades termo físicas de materiales pág 122.

TABLE 2.35 Thermophysical Properties of Miscellaneous Materials (*Continued*)

Description/composition	T (K)	Density ρ (kg/m ³)	Thermal conductivity k (W/m·K)	Specific heat c_p (J/kg·K)
<i>Other materials (continued)</i>				
Rock				
Granite, Barre	300	2630	2.79	775
Limestone, Salem	300	2320	2.15	810
Marble, Halston	300	2680	2.80	830
Quartzite, Sioux	300	2640	5.38	1105
Sandstone, Berea	300	2150	2.90	745
Rubber, vulcanized				
Soft	300	1100	0.012	2010
Hard	300	1190	0.013	—

3.4.2 Energía de descomposición

La energía de descomposición corresponde a la energía necesaria para excitar las partículas e iniciar el proceso de rompimiento de las grandes cadenas de hidrocarburos en pequeñas redes.

$$Q_{descomposicion} = \frac{dm}{dt} * Cp_{prom} * \left(\frac{\Delta T_{real\ pirólisis}}{dt} - \frac{\Delta T_{@humedad\ 0}}{dt} \right) \quad (3)$$

Para el desarrollo de la energía de descomposición se recurre a la ecuación de Arrhenius y al método de Euler para resolver la ecuación diferencial, esta ecuación relaciona la constante de la velocidad de una reacción k con la temperatura T y la energía de activación E_a como se muestra a continuación.

$$k = A * e^{-E_a/(RT)} \quad (4)$$

En donde:

k ; Constante de la velocidad de una reacción

A ; factor preexponencial

E_a ; energía de activación

R ; constante de los gases (8.314 J/mol*K)

T ; temperatura absoluta en Kelvin.

Por otro lado, se formula la ecuación diferencial del proceso de pirólisis bajo un modelo cinético de primer orden, en donde la tasa de conversión α , que corresponde a la masa, se puede describir como:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha) \quad (5)$$

A partir de la relación de las ecuaciones (4) y (5) se obtiene la ecuación diferencial la cual se soluciona por medio del método de Euler, la cual se inicia a continuación.

$$\frac{d\alpha}{dt} = A * e^{-\frac{E_a}{RT}} * (1 - \alpha) \quad (6)$$

Finalmente, se aplica el método de Euler para llegar a la aproximación de la ecuación diferencial ordinaria como:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \Delta t * \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{t_n} \quad (7)$$

Para el desarrollo de estas ecuaciones y modelo matemático se realizan unas consideraciones iniciales mencionada a continuación.

- El valor de ' α ' varía en un intervalo de [0-1]
- Se discretiza el proceso en 3600 segundos, esto debido al requerimiento del reactor de cantidad de masa a degradar por hora.
- Se analiza la variación de masa cada 0.5 segundos.
- Se toman algunos valores de la literatura tales como:
 - Energía de activación: 245219 [J/mol]

- Factor preexponencial: $5.80E+14$ [m^{-1}]
- Capacidad calorífica específica promedio del caucho: 2.15 [$kJ/Kg \cdot K$]
- Se aproxima el valor del ΔH de la llanta al ΔH del caucho, el cual varía entre $[3-6]$ [MJ/Kg]

Nota: Estos valores fueron tomados de la tabla 14, página 60 de la tesis de grado que tiene por nombre Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas realizado por Ochoa A y Mahecha D.

3.4.3 Energía de pirólisis

Esta energía está relacionada con la energía liberada o absorbida durante la reacción y se calcula de dos posibles maneras. En primer lugar, se obtiene la energía de activación E_a y se relaciona esta energía con un delta de entalpías (ΔH) propio de la cantidad de biomasa que ha sufrido un cambio de fase, dando como resultado un valor aproximado de esta energía de pirólisis.

En segundo lugar, se calcula directamente el calor liberado o absorbido por medio de la relación entre el delta de entalpías y la cantidad de sustancia que ha reaccionado.

$$Q_{pirólisis} = n * \Delta H \quad (8)$$

En donde:

n: corresponde a la cantidad de masa que reacciona

ΔH : Delta de entalpía

Para el cálculo de esta energía se modelan los neumáticos como caucho con el fin de hacer uso de los valores experimentales encontrados en la literatura para el calor de pirólisis, el cual corresponde a valores entre 5.5 y 6 [MJ/Kg]. Con el fin de contrarrestar la aproximación anteriormente mencionada se trabaja con el valor mayor, obteniendo así el calor de pirólisis.

3.4.4 Energía de pérdidas

La energía de pérdidas corresponde a la energía que no genera un aporte al proceso de degradación y por el contrario es disipada hacia ambiente producto de la emisividad en el caso de las pérdidas por radiación y las pérdidas por convección natural.

Esta energía es considerada para efectos del diseño a partir de una estimación en porcentaje en función de la energía total parcialmente requerida que corresponde a la sumatoria de la energía de calentamiento y de pirólisis.

3.5 Mecanismos de transferencia de calor

Para llevar a cabo el proceso de degradación térmica es necesario analizar los fenómenos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación que permiten el modelamiento del sistema.

3.5.1 Calor por conducción

Este proceso ocurre debido a la diferencia de temperaturas entre dos superficies, y se calcula matemáticamente mediante la ecuación de Fourier, la cual se describe a continuación.

$$Q = -kA * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (9)$$

Por medio de esta ecuación y conociendo algunos parámetros como las dimensiones del cuerpo, el calibre de lámina, la conductividad de los neumáticos y los materiales aislantes es posible determinar las temperaturas superficiales al interior y exterior del sistema.

3.5.2 Calor por convección

El calor por convección se da por medio de la interacción entre una superficie y un fluido, que se encuentran a una diferente temperatura, para este caso en especial, se trata de una

convección natural y se comporta como un recinto cerrado que contempla dos cilindros concéntricos verticales que son modelados como dos placas verticales paralelas. Para calcular el calor por convección se acude a la ley de enfriamiento de Newton.

$$Q_{convección} = h_{conv} * A_s * (T_s - T_{\infty}) \quad (10)$$

Donde:

h_{conv} ; es el coeficiente de transferencia de calor por convección

A_s ; es el área superficial del cuerpo o sistema a evaluar

T_s ; es la temperatura superficial del cuerpo o sistema a evaluar

T_{∞} ; es la temperatura de los alrededores con la que interactúa el cuerpo o sistema

El coeficiente de transferencia de calor h_{conv} se calcula por medio de:

$$h_{conv} = \frac{Nu * K_{gases}}{D_H} \quad (11)$$

Nu ; es el número de Nusselt

K_{gases} ; es la conductividad térmica de los gases de combustión

D_H ; es el diámetro hidráulico de nuestra configuración geométrica

$$D_H = D_{ext} - D_{imt} \quad (12)$$

Según ELsherbiny et al. [84, 85] la equivalencia del número de Nusselt para configuraciones en donde $5 < \frac{H}{L} < 40$ se halla como el máximo de las siguientes ecuaciones

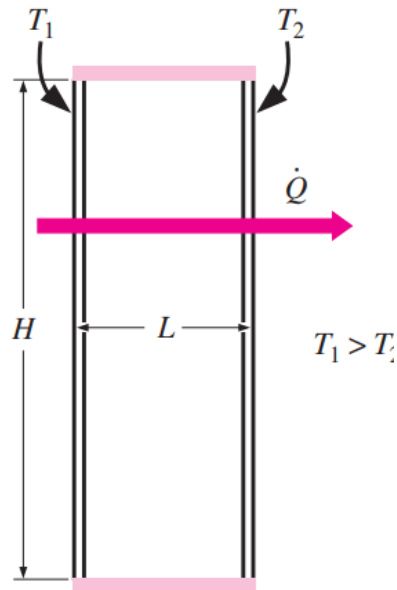


Figura 9. Representación del modelo de placas verticales.

$$Nu = [Nu_{ct}, Nu_l, Nu_t]_{max} \quad (13)$$

Donde:

$$Nu_{ct} = \left[1 + \left\{ \frac{0,104 Ra^{0,293}}{1 + \left(\frac{6310}{Ra}\right)^{1,36}} \right\}^3 \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_l = 0,242 \left(\frac{Ra L}{H} \right)^{0,273}$$

$$Nu_t = 0,0605 Ra^{\frac{1}{3}}$$

En donde:

Ra; es el numero de Rayleigh y es determinado a partir de:

$$\frac{g\beta(T_2-T_1)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (14)$$

L_c^3 ; es el espaciamiento entre las caras de los cilindros

H ; es la altura del reactor

β ; es el coeficiente de expansión termica $\beta = \frac{1}{T}$

ν^2 ; es la viscosidad cinemática

Pr ; es el número de Prandtl

g ; es la aceleración debida a la gravedad

2.4.2.1 Propiedades termodinámicas

Las propiedades termodinámicas de los gases de combustión se calculan como la aportación de las propiedades individuales de los 3 principales gases producto de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^n (\chi_i * \gamma_i) \quad (15)$$

Donde:

χ_i ; es la fracción molar del gas

γ_i ; es la propiedad evaluada para el gas

Discretizando la ecuación (15), se obtiene que las propiedades a calcular son el número de Prandtl (Pr), la conductividad de los gases de combustión (K_{gases}):

- Pr se calcula de la siguiente manera

$$Pr = \left(\chi_{N_2} * Pr_{N_2@T_{propiedades}} \right) + \left(\chi_{H_2O} * Pr_{H_2O@T_{propiedades}} \right) \\ + \left(\chi_{CO_2} * Pr_{CO_2@T_{propiedades}} \right)$$

- K se calcula de la siguiente manera

$$K_{gases} = \left(\chi_{N_2} * K_{N_2@T_{propiedades}} \right) + \left(\chi_{H_2O} * K_{H_2O@T_{propiedades}} \right) \\ + \left(\chi_{CO_2} * K_{CO_2@T_{propiedades}} \right)$$

3.5.3 Calor por radiación

La tasa de transferencia de calor por radiación es un mecanismo de transferencia de energía por medio de ondas electromagnéticas, esta se puede dar sin un medio que transporte la energía de un cuerpo a otro, para nuestro análisis, este mecanismo se hace relevante debido a las altas temperaturas manejadas al interior de la “cámara de combustión” en donde los gases calientes y las superficies se encuentran por encima de los 1000K

Para el cálculo de la tasa transferencia de calor por radiación para cada superficie evaluada en un cuerpo está dada por la siguiente expresión:

$$Q_{superficie} = A_i * \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (16)$$

Para la resolución de esta ecuación es necesario analizar los factores de visión de las superficies involucradas, las cuales cumplen algunas propiedades como la relación de reciprocidad, la regla de la suma, la regla de superposición y la regla de simetría, las cuales se mencionan a continuación.

- Relación de reciprocidad

$$F_{j \rightarrow i} = F_{i \rightarrow j} \text{ cuando } A_i = A_j \quad (17)$$

- Regla de la suma

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (18)$$

- Regla de la superposición

$$F_{1 \rightarrow (2,3)} = F_{1 \rightarrow 2} + F_{1 \rightarrow 3} \quad (19)$$

- Regla de la simetría: Para j y k simétricas respecto a i, entonces:

$$F_{i \rightarrow j} = F_{i \rightarrow k} \quad (20)$$

En cuanto a la temperatura de la superficie se obtiene mediante la relación entre la radiosidad (J), la emisividad de la superficie y los factores de visión de la misma, denotada a continuación:

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} * \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (21)$$

3.5.4 Modelo de resistencias térmicas

El modelo de resistencias térmicas consiste en expresar el calor en función de un delta de temperaturas y sus respectivas resistencias térmicas de tipo conductivo, convectivo y radiactivo, lo que permite analizar el sistema como un todo para posteriormente encontrar las temperaturas intermedias si se desea. A continuación, se presenta la ecuación que rige este modelamiento.

$$Q = \frac{\Delta T}{\Sigma R} \quad (22)$$

Este modelo es utilizado en algunos casos donde se tienen coberturas de diferentes materiales independientemente de su geometría. Por otro lado, permite también el análisis de espesores de material aislante a partir de las características propias de su geometría, para este caso en particular donde se tienen cilindros el libro de transferencia de calor y masa de Yunus A. Çengel lo denomina el radio crítico de aislamiento y establece una relación entre este parámetro y la variación de la transferencia de calor como se muestra a continuación.

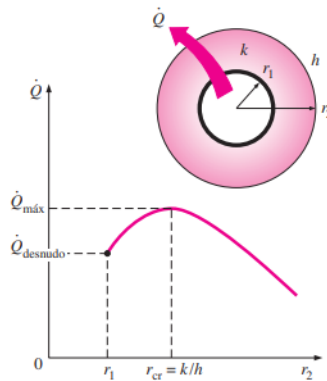


FIGURA 3-31

Variación de la razón de transferencia de calor con el radio externo del aislamiento r_2 cuando $r_1 < r_{cr}$.

*Figura 10. Variación de la razón de transferencia de calor a partir del radio crítico para un cilindro.
Autoría: Transferencia de calor y masa Yunus A. Çengel.*

La siguiente ecuación expresa el radio crítico de aislamiento en función de la conductividad del material a utilizar y el coeficiente de transferencia de calor por convección del medio.

$$r_{cr,cilindro} = \frac{k}{h} \quad (23)$$

Para este caso en particular donde se desea que la tasa de transferencia de calor hacia el ambiente sea la mínima, es necesario que el espesor del material aislante sea mayor o igual al resultado de la diferencia entre el radio crítico obtenido y radio de la carcasa.

4. Diseño conceptual

En este apartado se realiza la generación y evaluación de alternativas para cada uno de los subsistemas presentes a partir de una serie de requerimientos establecidos para de esta manera proceder con el dimensionamiento de este.

4.1 Requerimientos de la máquina

Para llevar a cabo el desarrollo de este reactor de pirólisis se estipulan algunos requerimientos, que permitan cumplir con cada uno de los objetivos inicialmente planteados, los cuales se presentan a continuación:

Requerimientos		
Funcionales	Restricciones	No funcionales
Implementación de elementos de medición de temperatura	Fuente de energía	Tamaño - peso
Tamaño de la partícula de biomasa de 2 mm	Leyes ambientales	Seguridad
Capacidad de 10kg/h por lote	Costos	Mantenimiento

4.2 Generación de alternativas

A continuación, se plantean una serie de alternativas para el sistema de suministro de energía y reactor de pirólisis, las cuales posteriormente son evaluadas por medio de un método de análisis multicriterio el cual consiste en un realizar una ponderación cuantitativa en función de los requerimientos establecidos.

4.2.1 Suministros de energía

A partir de los cálculos realizados anteriormente se estipulan 3 alternativas que permitan suplir el requerimiento energético del reactor para llevar a cabo el proceso de pirólisis.

4.2.1.1 Quemador de bagazo de caña. Esta alternativa corresponde a un proyecto de grado anteriormente realizado por estudiantes de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y se encuentra en el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica. Para hacer uso de este dispositivo se deben tener en cuenta algunas consideraciones

- Su diseño inicial fue pensado para la adaptación de un piloto de gas natural en la parte inferior que permitiera la quema de la biomasa.
- Realizar una adaptación del agujero inferior en donde se realiza el montaje del piloto ya que tiene un juego exagerado.
- El bagazo de caña debe estar granulado con un tamaño de partícula de 0.5 milímetros.
- El dispositivo debe operarse de manera horizontal ya que el bastidor es considerablemente pequeño, generando que el piloto no pueda ingresar en caso de querer operarse de manera vertical
- Realizar modificaciones de dimensión al tornillo sin fin encargado empujar la biomasa de la salida de la tolva hacia el cuerpo del quemador
- Modificar el diseño del agitador que se encuentra al interior de la tolva puesto que este no se encuentra correctamente apoyado en rodamientos
- Realizar la fijación de ductos al cuerpo del quemador que evite la pérdida de biomasa
- Rectificar la superficie de material refractario al interior del cuerpo del quemador
- Implementar una capa de material aislante en la superficie externa del quemador
- Implementar elementos de medición de temperatura en puntos estratégicos.



Figura 11. Quemador de bagazo de caña

Autoría: Proyecto de grado UIS.

4.2.1.2 Quemador de gas propano al interior del cuerpo externo. Esta alternativa consiste en un sistema de 4 tubos ubicados en el cuerpo externo que recubre el reactor con una disposición de 90° entre sí por los cuales fluye gas propano en su interior. Estos ductos transmiten la energía al reactor de manera directa a través de pequeñas flamas que se forman en pequeños orificios a lo largo de la longitud de los tubos.

Una característica de estos tubos es la presencia de pilotos independientes ubicados en la parte inferior del cuerpo que rodea al reactor, facilitando su recambio ante posibles fallas y/o desgaste. Esta alternativa se asemeja a los hornos de pizzería, los cuales permiten alcanzar altas temperaturas en pequeños intervalos de tiempo.

Por otra parte, esta alternativa permitiría realizar un calentamiento directo y uniforme del reactor, evitando así en menor medida la presencia de zonas frías que provoquen que la biomasa sufra el fenómeno de carbonización

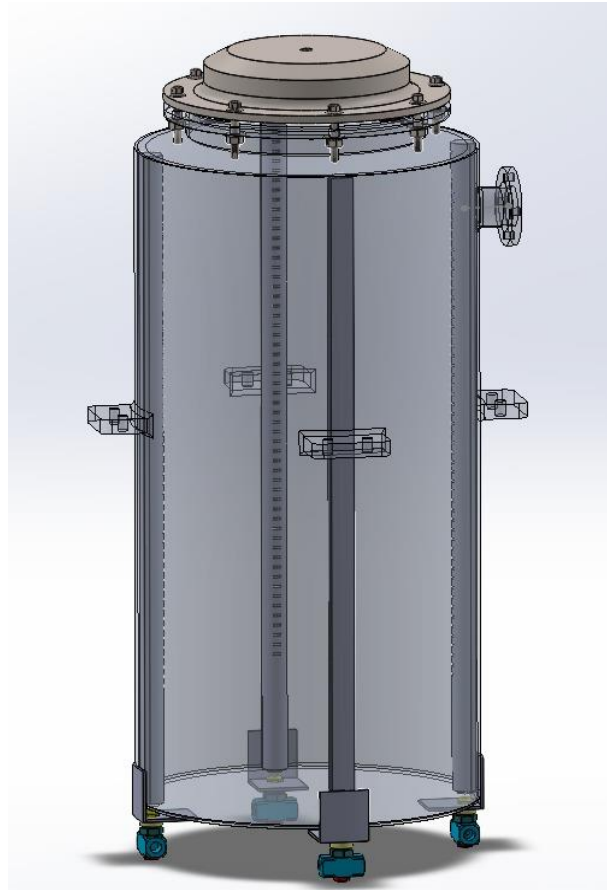


Figura 12. Quemador de gas propano ubicado al interior del reactor

4.2.1.3 Quemador de gas propano externo al reactor. Esta alternativa corresponde a un quemador de gas propano que se encuentra conectado a un tanque de gas de 40 Libras, el cual incorpora un turbo capaz de enviar un flujo de gases caliente hacia el interior de cuerpo externo del reactor. La interacción de energía se daría de manera directa entre los gases calientes y la superficie inferior del reactor.

Algunos de los problemas de esta alternativa son la presencia de zonas de menor temperatura sobre la superficie del reactor, ocasionando que la biomasa presente diferencias de temperatura, lo que podría ocasionar que ocurra el fenómeno de carbonización. Por otra parte, sería necesario adaptar un sistema de aletas al reactor, que ocasionara un flujo turbulento entre el reactor y cuerpo externo con el fin de generar una

mejor interacción de energía con la superficie, lo que implica un diseño más complejo, dando como resultado mayores gastos.



Figura 13. Quemador de gas propano exterior al reactor.

4.2.2 Reactor

Para el desarrollo del reactor se plantean 3 alternativas con base en los requerimientos de capacidad, fácil acceso de mantenimiento y recambio de piezas, presentando para cada una de estas alternativas sus pros y contras.

4.2.2.1 Tubular extraíble. Este reactor de tipo tubular consiste en una serie de tubos huecos unidos entre sí por la parte superior el cual incorpora unas pestañas sobre las cuales se soporta al cuerpo externo del reactor, algunas de las características de este reactor son, una mejor transferencia de calor entre los gases y la biomasa debido al arreglo escalonado de los tubos, además, una rápida limpieza y fácil compactación. Sin embargo, por temas de complejidad de construcción su costo sería considerablemente alto, así mismo no permitiría la adecuación de agujeros que permitiera los gases inertes atravesar la biomasa, siendo este uno de los mayores problemas.

A continuación, se presenta una figura del reactor anteriormente especificado.

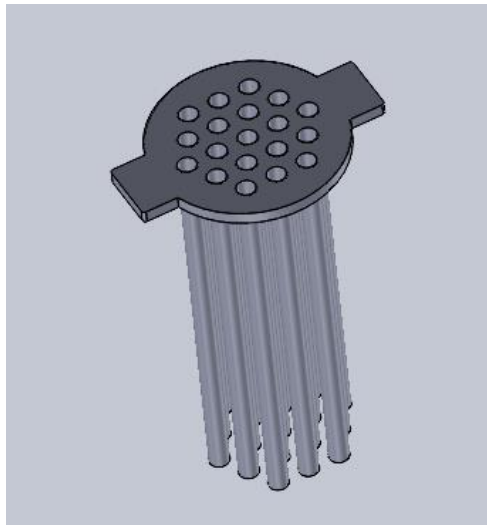


Figura 14. Representación de alternativa de reactor tubular extraíble.

Autoría: Propia

4.2.2.2 Cilindro fijo. Esta alternativa de reactor consiste en un cilindro vertical el cual va soldado en la parte inferior al cuerpo externo, este sello permanente brinda en gran medida hermeticidad al sistema y, además su estructura grande permite la compactación y limpieza de la llanta, sin embargo, presenta una serie de dificultades ya que ante daños o desgaste de la estructura sería altamente costoso retirar el cuerpo exterior para así trabajar el reactor puesto

que se encuentra soldado, por otro lado, la transferencia de calor entre la llanta podría presentar diferencias de temperatura complicando el proceso. A continuación, se presenta una ilustración de la alternativa.

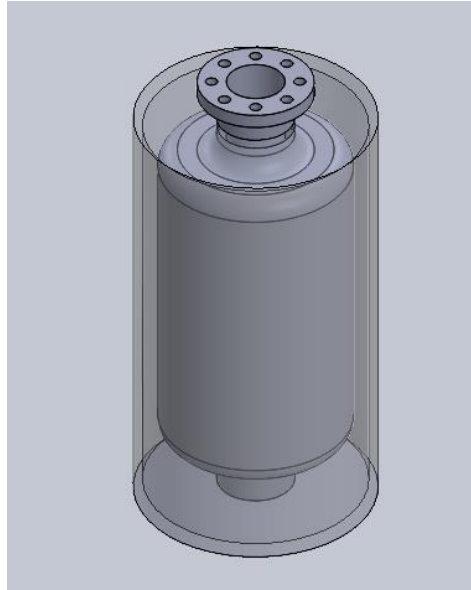


Figura 15. Alternativa de cilindro fijo como reactor fijo.

4.2.2.3 Marmita extraíble. Esta alternativa de reactor consiste en un cilindro vertical con final cónico el cual se sostiene de la parte superior por medio de una tapa tipo brida, así mismo presenta un sello entre la parte superior y la tapa y es unida por medio de pernos lo que permite un sello ante elevaciones inesperadas de presión, por otra parte, su diseño facilita en gran medida el proceso de compactación, limpieza y recambio ante procesos de desgaste. Sin embargo, para lograr una mejor transferencia de calor, es necesario que las flautas de gas estén muy cercanas al reactor. A continuación, se presenta una ilustración de la alternativa.

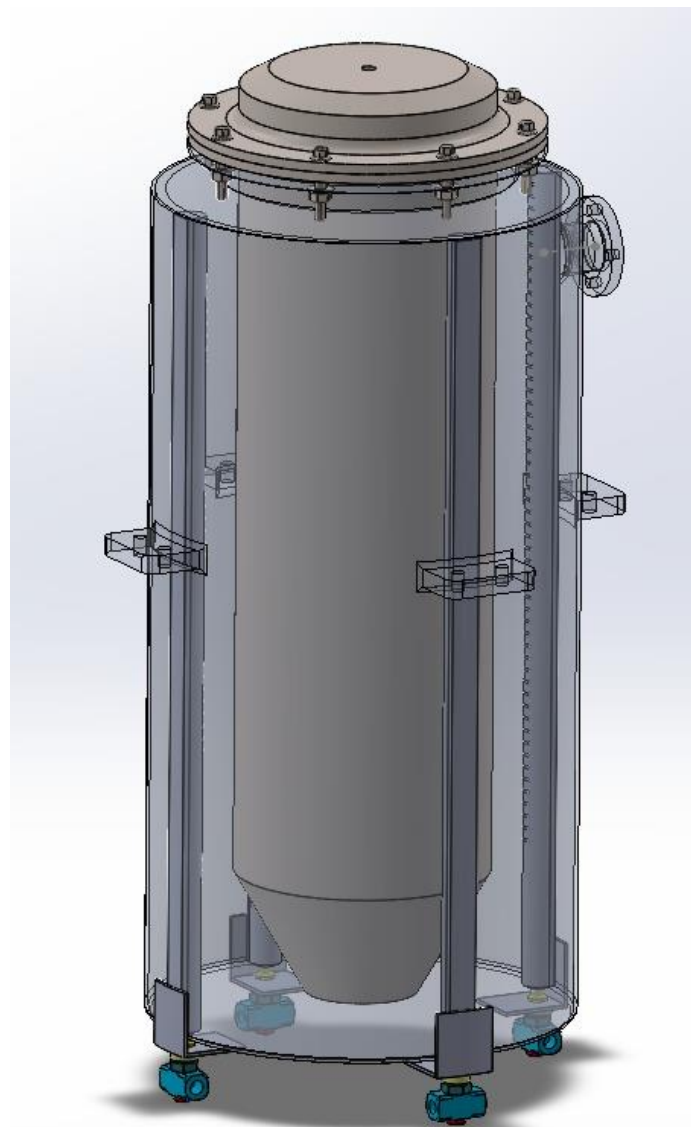


Figura 16. Reactor cónico extraíble.

4.3 Evaluación de alternativas

El proceso de evaluación consiste en calificar de 1 a 5 en grado al cumplimiento que tiene la propuesta frente a cada uno de los criterios, donde el valor de 1 indica que la propuesta no satisface el criterio y 5 se refiere a que la propuesta supera las expectativas mediante una matriz de selección. Posteriormente la calificación obtenida frente a cada criterio se multiplica por el valor de su prioridad, posteriormente se suman los resultados y se obtiene una puntuación, en donde finalmente la propuesta de mayor puntuación se selecciona como propuesta final.

4.3.1 Suministro de energía

A continuación, se presenta una tabla resumen que tiene como resultado la elección de la mejor alternativa de suministro con base en los requerimientos y restricciones.

Tabla 5. Matriz de selección de suministro de energía.

MATRIZ DE SELECCIÓN				
ENERGÍA	PRIORIDAD	Quemador de Bagazo de caña	Quemador de gas propano al interior	Quemador de gas propano al exterior
Capacidad	6	54	72	72
Control de temperatura	5	15	60	45
Seguridad	4	36	36	36
Fiabilidad	4	12	48	48
Mantenimiento	2	6	6	18
Costo	1	3	9	9
		126	231	228

De esta manera se define que la alternativa de suministro de energía que mejor se adapta frente a los requerimientos y restricciones corresponde al quemador de gas metano, ubicado al interior del cuerpo exterior que recubre al reactor, en forma de flautas.

4.3.2 Reactor

A continuación, se presenta una tabla resumen que tiene como resultado la elección de la mejor alternativa de reactor con base en los requerimientos y restricciones.

Tabla 6. Matriz de selección del reactor.

MATRIZ DE SELECCIÓN				
REACTOR	PRIORIDAD	Tubular extraíble	Cilindro fijo	Marmita extraíble
Capacidad	8	72	96	96
Hermeticidad	7	84	63	63
Uniformidad de temperatura	6	72	54	54
Seguridad	5	45	45	45
Facilidad de compactación	4	36	48	48
Mantenimiento	3	9	27	36
Costos	2	2	6	18
Tamaño-peso	1	9	3	3
		329	342	363

A partir de esta tabla se obtiene como alternativa ganadora la marmita extraíble cónica como reactor. Definiendo de esta manera dos de los subsistemas principales del dispositivo.

4.4 Dimensionamiento del sistema

4.4.1 Dimensionamiento del reactor

El dimensionamiento del reactor se da con bases en algunas consideraciones de tipo funcional y no funcional, tales como la facilidad para la realización de pruebas, la presencia de neumático a pirolizar en al menos un 90% del volumen del reactor que disminuya la presencia de oxígeno, la uniformidad de temperatura, la sencilla limpieza del reactor y facilidad para el recambio de piezas.

Los neumáticos fuera de uso (NFU) que se tomaron como referencia para la realización de estas pruebas fueron encontrados en una rencauchadora en la ciudad de Bucaramanga la cual según su dueño procesa llanta de tipo vehicular desde hace más de 20 años, allí, las llantas son trituradas según la necesidad del cliente, para este caso en especial se utilizan las de menor tamaño de partícula, una vez trituradas, se realiza un proceso de tamizado y finalmente se retiran las partículas de hierro o metales adheridos por medio de un imán.

Para ello, en primer lugar, se realizan pruebas por triplicado de muestras de llanta fuera de uso con el fin de conocer la densidad de lecho del material a pirolizar, estas pruebas dieron los siguientes resultados.

Tabla 7. Pruebas de masa y volumen de muestras de neumático fuera de uso a pirolizar.

Número de prueba		Volumen ocupado			Densidad promedio
		200 ml	400 ml	600 ml	
1	VALOR DE MASA	82 g	168g	258g	0.4200
2		80g	170g	263g	0.4211
3		82g	166g	260g	0.4194
DENSIDAD PROMEDIO					0.42017

A partir de esta información, se obtiene que el valor de densidad de lecho promedio de los NFU corresponde a 420.17 [Kg/m³]. De esta forma, conociendo además que el reactor es de 10 kg de capacidad por lote, se obtiene el valor de volumen mínimo del lecho, el cual corresponde a 0.0238 [m³].

Acto seguido, analizando las dificultades en el proceso de fabricación para geometrías complejas como cilindros cónicos, se opta por llevar a cabo el desarrollo de un reactor de geometría cilíndrica.

Puesto que la uniformidad de temperatura es uno de los desafíos para llevar a cabo un correcto proceso de pirólisis, según Kumar, A., Jones, D. D., & Hanna, M. A., el análisis y modelado de gasificadores de biomasa de lecho fluidizado y los sistemas de pirólisis establecen que una relación de esbeltez entre 2 y 4 permite una uniformidad de temperatura favorable al interior del reactor, es por ello que se establece un diámetro de 20 cm y una longitud de 80 cm, que cumpla con este parámetro de relación de esbeltez y a su vez con el cálculo del volumen mínimo requerido determinado anteriormente.

4.4.2 Dimensionamiento de las flautas de gas

Para el dimensionamiento de las flautas de gas, se consulta en algunos establecimientos dedicados a la manufactura y venta de implementos para hornos a gas en Bucaramanga, en donde se obtuvieron las siguientes recomendaciones:

- Uso de tubos de acero con diámetros entre 1" y $1\frac{1}{4}$ " de diámetro de interno
- El espaciamiento entre agujeros se da en función del diámetro del agujero con intervalos entre $10D_{agujeros}$ y $15D_{agujeros}$.
- El diámetro del agujero determina una mayor o menor distancia alcanzada por la llama

A partir de estas recomendaciones se construyen dos flautas de prueba, una para cada diámetro interno posible y mediante una serie de pruebas se determina la mejor configuración posible, la cual ocurre bajo un flauta de $1\frac{1}{4}$ " de diámetro interno con agujeros de 1,5 milímetros de diámetro y con un paso de agujeros de 12 veces el diámetro del agujero, obteniendo así una

longitud de llama de 2.5 centímetros, además, se establece una longitud de flauta igual a la longitud del reactor anteriormente determinada.

4.4.3 Dimensionamiento de la carcasa

A partir de las dimensiones del reactor y del suministro de energía, se establecen las dimensiones del cuerpo que los recubre. En primer lugar, se tiene que el reactor posee un diámetro externo de 20.6 cm, las flautas un diámetro externo de 4.2 cm y la distancia de la llama de 2.5 cm, se define que el diámetro de la carcasa del reactor debe ser superior a 34 centímetros, para este caso se construye de 35 centímetros de diámetro interno.

Para el parámetro de longitud, se analiza las siguientes condiciones; que cumpla una relación de esbeltez entre 2 y 4 como ocurre en el caso del reactor, que tenga una altura mayor al reactor la cual es de 80 cm y además, teniendo presente que el reactor debe ser levantado por una persona para su limpieza es necesario tener en cuenta las recomendaciones generales de ergonomía, las cuales indican que una persona no debe levantar un peso más de 1.8 metros desde la altura del suelo, es por ello que se define una altura para la carcasa del reactor de 85 centímetros.

5. Diseño en detalle

En este apartado se realizan los cálculos pertinentes que fundamentan el proceso de diseño para su posterior construcción, estos cálculos se realizan para cada uno de los subsistemas presentes en el equipo.

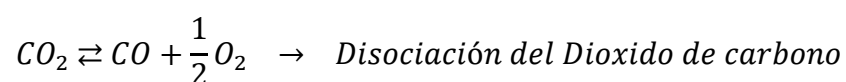
5.1 Suministro de energía

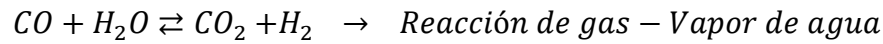
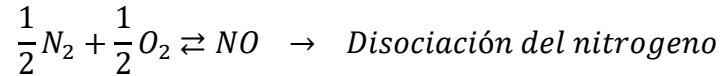
Se analiza el sistema de suministro de energía a partir de uno de sus componentes con base en la alternativa ganadora en el proceso de selección.

5.1.1 Análisis del fenómeno de combustión

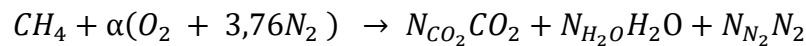
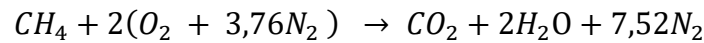
Para este proyecto se analiza el comportamiento de la combustión del metano a las condiciones de la ciudad de Bucaramanga, esto con el fin de conocer variables útiles de este proceso para el análisis de transferencia de calor, Según el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) la humedad relativa de la ciudad a lo largo de todo el año ronda entre un 60% a 80%, en cuanto a la temperatura, se tiene un promedio de 28 °C, para efectos de simplificar cálculos, se toma 25°C como la temperatura para este análisis.

En las reacciones químicas es común encontrar que los compuestos experimentan fenómenos de disociación. Esta disociación en la reacción química es el proceso mediante el cual los compuestos se separan en sus componentes más básicos, de tal forma que, permite predecir la formación de los productos y entender como los compuestos se comportan en diversas condiciones. Para este caso, las disociaciones que se consideran en la reacción del proceso de combustión son las siguientes:





El balance estequiométrico ideal para el metano utilizando aire como comburente (CH_4) tiene la siguiente forma:



La temperatura de llama adiabática teórica a la que son expulsados los gases de la combustión se calcula gracias al balance de energía, ya que la entalpia térmica de los gases de combustión se encuentra a $T = T_{adt}$.

$$[\sum N_i \bar{h}_i]_{\text{Reactivos}} = [\sum N_i \bar{h}_i]_{\text{Productos}} \quad (26)$$

Donde:

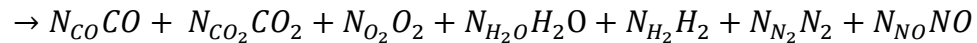
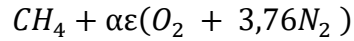
$$\bar{h}_i = \bar{h}_{f_i}^\circ + \bar{h}_i(T) - \bar{h}_i^\circ \quad (27)$$

$\bar{h}_{f_i}^\circ$ = Entalpia de formación.

$\bar{h}_i(T)$ = Entalpia de cada componente a la temperatura (T)

\bar{h}_i° = Entalpia de referencia, T=298K

Dicho esto, para nuestro análisis de combustión se asume el siguiente balance estequiométrico real.



De este balance estequiométrico se obtienen 4 ecuaciones (1 por cada elemento) y 7 incógnitas.

$$\text{Balance de carbono} \rightarrow 1 = N_{CO_2} + N_{CO}$$

$$\text{Balance de hidrogeno} \rightarrow 4 = 2 * N_{H_2O} + 2 * N_{H_2}H_2$$

$$\text{Balance de oxigeno} \rightarrow 2 * \alpha * \varepsilon = 2 * N_{CO_2} + N_{CO} + 2 * N_{O_2} + N_{H_2O} + N_{NO}$$

$$\text{Balance de nitrogeno} \rightarrow \alpha * \varepsilon = 2 * N_{N_2} + N_{NO}$$

Para completar el sistema se plantean las ecuaciones correspondientes a la constante de equilibrio de cada reacción de disociación

$$Kp_1 = \frac{N_{CO}^1 * N_{O_2}^{0,5}}{N_{CO_2}^1} * \left[\frac{1}{N_m} \right]^{0,5}$$

$$Kp_2 = \frac{N_{NO}^1}{N_{N_2}^1 * N_{O_2}^{0,5}}$$

$$Kp_3 = \frac{N_{CO_2}^1 * N_{H_2}^1}{N_{CO}^1 * N_{H_2O}^1}$$

Hay que aclarar que este análisis se realiza asumiendo un exceso de aire de un $\Phi = 0,7$ que se traduce en un 30% de exceso de aire por lo que se obtiene una temperatura de llama inicial

de $T_{llama} = 1840 K$, este valor de temperatura se usa como valor inicial para el análisis de transferencia de calor.

5.1.2 Cálculo del consumo de combustible

La cantidad de gas consumida para garantizar la entrega de la potencia calculada anteriormente, que corresponde a 24KW (6 KW por cada flauta), se realiza una estimación haciendo uso del PCI del gas natural.

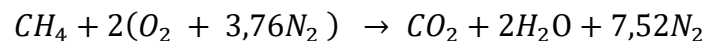
Según Prabri Basu (Pag, 340) el PCI para el gas natural (CH_4) es de aproximadamente $35,88 \frac{MJ}{m^3}$, donde 1 MJ equivale a $0,2778 [KWH/m^3]$ de modo que el consumo de combustible es:

$$\dot{V}_{metano} = \frac{Potencia}{PCI} \quad (28)$$

$$\dot{V}_{metano} = \frac{24 [KW]}{35,8 * 0,2278 [KWH/m^3]} = 2.41 m^3/h$$

5.1.3 Relación aire-combustible

Para este cálculo se obtiene la relación aire combustible del balance estequiométrico ideal, para posteriormente añadir el 30% de exceso de aire, con el fin de garantizar una combustión completa.



Para el balance estequiométrico ideal se tiene que por 1 mol de combustible se requieren

$2 * (1 \text{ mol de } O_2 + 3,76 \text{ mol de } N_2)$ de modo que se necesitan 9,52 mol de aire, añadiendo el 30% de aire en exceso, $\lambda = 9,52 + \left(1 + \frac{30}{100}\right) =$

12,37 partes de aire por 1 parte de metano

Dado que el suministro total de combustible (Metano) es de $2,41 \text{ m}^3/\text{h}$ y que la relación aire combustible es de 12.37 partes de aire por 1 parte de metano, se requiere un valor de

$$29,81 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cong 30 \text{ m}^3/\text{h}$$

5.1.4 Selección de material

Las flautas de gas soportan temperaturas de hasta 650°C a lo largo de su longitud, el acero laminado en caliente mantiene su resistencia estructural en este rango de temperaturas a un costo más bajo comparado con el acero inoxidable.

De igual manera facilita la **fabricación y mecanizado** al momento de realizar las perforaciones, soldar uniones y soportes.

A pesar de que el acero laminado en caliente puede oxidarse con el tiempo, las condiciones de operación y el ambiente en el que trabaja no contiene agentes corrosivos, por ende, su resistencia a la corrosión es suficiente para la aplicación con un mantenimiento adecuado.

5.1.5 Calculo diámetro del inyector de gas

La potencia necesaria para llevar a cabo el proceso es de 24 KW, de modo que cada flauta de gas debe suministrar 6KW

Parámetro	Valor
Potencia (P)	6 kW = 6000 W
Gas natural (PCI)	36 MJ/m ³ = 36,000 kJ/m ³
Presión de suministro	25 mbar = 2500 Pa (manométrica)

Parámetro	Valor
Coefficiente de descarga (Cd)	0.7 (orificio en pared delgada)
Densidad (ρ)	0.7 kg/m ³

El flujo volumétrico a través de un orificio se calcula por medio de:

$$\dot{V} = C_d * \frac{\pi * d^2}{4} * \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho_{metano}}} \quad (29)$$

Donde ΔP es la diferencia de presión entre el suministro y la presión atmosférica.

Despejando para el diámetro del orificio, se obtiene un valor de **1,9 mm** de diámetro para lograr el caudal previamente calculado, que es el necesario para alcanzar 6KW por cada flauta.

5.1.6 Sistema de distribución de gas

Para alimentar el sistema de manera uniforme, se opta por la construcción de un sistema flexible con mangueras especializadas para gas, en donde se tenga un punto común de distribución de gas que alimente 4 válvulas independientes que alimentan cada flauta de gas

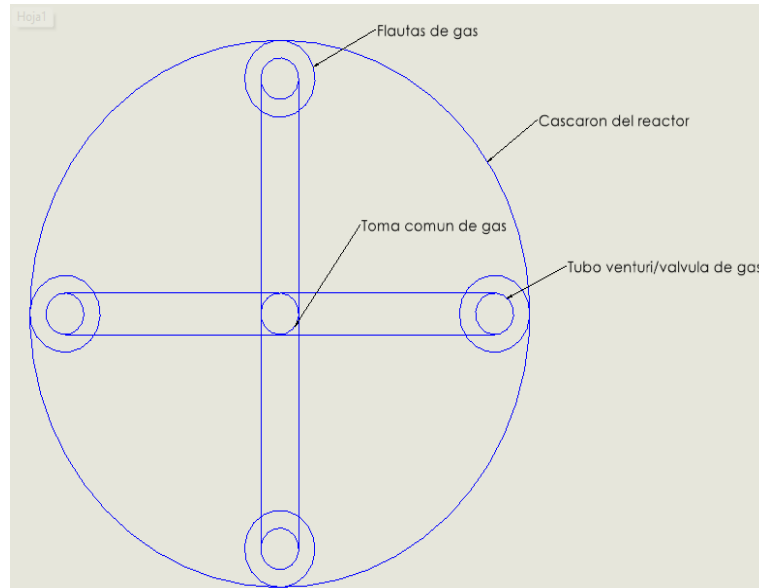


Figura 17. Representación sistema distribución de gas

5.2 Reactor

5.2.1 Análisis de transferencia de calor

El análisis de transferencia de calor se da con el fin de conocer parámetros que permitan vislumbrar el fenómeno físico que ocurre al interior de la camisa externa del reactor de manera estacionaria ya que es en este punto donde se alcanzan las mayores temperaturas que podrían resultar en fallas por parte de los materiales. Siendo así, se realizan diferentes análisis, en primer lugar, el análisis elemental que consiste en identificar por medio de resistencias térmicas las temperaturas en algunos puntos, en segundo lugar, conocer de manera aproximada la participación de los diferentes métodos de transferencia de calor durante el proceso para finalmente dar paso a la selección de materiales.

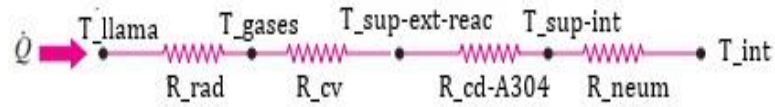


Figura 18. Esquema de resistencias térmicas del proceso

5.2.1.1 Análisis general. Este análisis inicial se realiza en el momento donde los neumáticos se han degradado, lo cual ocurre a una temperatura máxima de 650°C como lo indica la revista de pirólisis analítica y aplicada, a partir de ello, se plantea el modelo de resistencias térmicas que permita el cálculo de la temperatura en la superficie externa del reactor. Para ello, se tienen en cuenta algunas consideraciones:

- La superficie interna del reactor se encuentra a la temperatura de los neumáticos.
- Se considera la transferencia de calor únicamente a través del área superficial del cilindro, ya que la dimensión del fondo es considerablemente pequeña en comparación a la dimensión longitudinal.
- Se estima un 10% extra a la temperatura de la superficie externa del reactor con el fin de contemplar cualquier tipo de pérdidas.
- El reactor está construido con acero inoxidable 304 como material ya que posee una mayor resistencia a la corrosión, resistencia a la tensión térmica y durabilidad.
- El espesor del reactor posee 3 milímetros (calibre 12) evitando la estructura falle debido al extenso periodo con exposición a altas temperaturas.
- Energía suministrada por parte del quemador: 24 [kW]
- Conductividad del acero 304: 22.6 [W/m*K]

$$Q = \frac{T_{sup-ext} - T_i}{\frac{\ln\left(\frac{r_{int+esp}}{r_{int}}\right)}{2\pi L_{reactor} k_{acero}}} = \frac{T_{sup-ext} - (650 + 273.15)}{\frac{\ln\left(\frac{0.1025}{0.1}\right)}{2\pi * 0.8 * 22.6}} = 24000$$

$$T_{sup-ext} = \mathbf{928.3667 [K]}$$

El cálculo de esta temperatura se realiza desde el momento en el que el proceso es estacionario y se obtiene la mayor temperatura posible, es decir, en donde la temperatura de la superficie interna del reactor y en los neumáticos es 650 °C. Además, se eleva la temperatura anteriormente calculada en un 9% cuyo propósito es la consideración de un porcentaje de error para efectos del diseño.

Acto seguido, se procede con el análisis de transferencia de calor por convección y radiación, para ello se parte de la siguiente consideración la cual se corrige por medio de un proceso iterativo:

- Se asume inicialmente una temperatura de llama de 1840K que corresponde a la temperatura de llama adiabática con un exceso de aire del 30% (Metano) para después recalculer el proceso por medio de un proceso iterativo.

Mediante el siguiente diagrama de flujo, se representa el proceso de iteración que se usa para el cálculo de la temperatura de llama de los quemadores de gas natural.

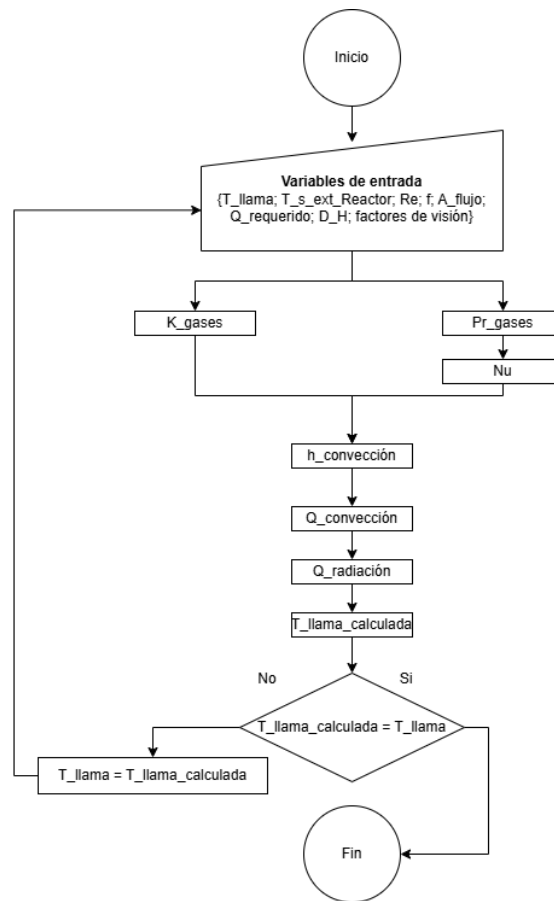


Figura 19. Proceso de iteración, cálculo de temperatura de llama

Se parte de los valores de entrada que son todas aquellas variables fijas y conocidas que no varían con la temperatura de llama, inicializados como muestra la **figura 17**, con estos valores se calcula el número de Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor y por ende la tasa de transferencia de calor por convección y con esta; se encuentra la cantidad del calor que es transferido por radiación haciendo uso de un balance general de energía.

5.2.2 Análisis por convección

Para el análisis de convección se tienen en cuenta las siguientes consideraciones

- La transferencia de calor por convección se da de manera natural

- La temperatura de los gases es asumida como el promedio de la temperatura de llama de los quemadores y la temperatura superficial del reactor por ende la temperatura para hallar las propiedades termodinámicas es $T_{propiedades} = \frac{T_{s,extreactor} + T_{llama}}{2}$.
- Debido a la composición en los productos de la combustión del metano, se toman únicamente los 3 gases con mayor aporte en base molar de la siguiente manera; Nitrógeno (73,45%), vapor de agua (13,7%) y dióxido de carbono (6,8%), despreciando así las contribuciones de los demás productos de la combustión, esto con el fin de hallar las propiedades termodinámicas de los gases de combustión ponderando las propiedades de estos gases a la temperatura requerida.
- Se modela el sistema como un recinto cerrado de placas verticales.

En cuanto a la configuración geométrica del sistema, se tienen dos cilindros concéntricos, que representan el cascaron y el reactor en donde se realiza la pirolisis, como se muestra en el siguiente esquema con sus correspondientes dimensiones (unidades en milímetros).

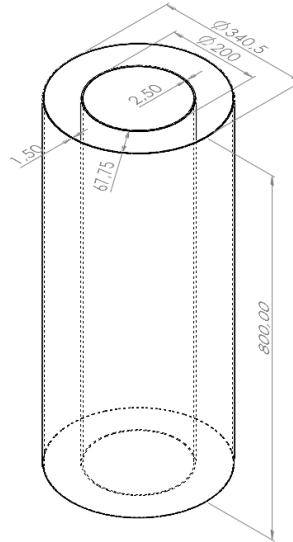


Figura 20. Configuración geométrica

Estas dimensiones son producto de los cálculos realizados en el ítem 3.2, así como también considerando algunos espesores de láminas de acero a la venta en la ciudad de Bucaramanga.

5.2.2.1 Cálculo de la tasa de transferencia de calor por convección. A partir de las anteriores consideraciones, se calcula la tasa de transferencia de calor por convección natural.

Se procede al cálculo de las propiedades bajo la consideración de la temperatura de

$$\text{las propiedades } T_{\text{propiedades}} = \frac{1021K + 1840K}{2} = 1431K$$

$$Pr_{\text{gases}} = (0,7345 * 0,6782) + (0,137 * 0,8575) + (0,068 * 0,7493)$$

$$Pr_{\text{gases}} = 0,6668$$

De igual manera como se calculó el número de Prandtl de los gases, se calcula la conductividad térmica y la viscosidad cinemática de estos mismos utilizando la ecuación (13)

$$K_{\text{gases}} = (0,7345 * 0,08935) + (0,137 * 0,16) + (0,068 * 0,09307)$$

$$K_{gases} = 0,0939 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

$$v_{gases} = (0,7345 * 2,083E - 4) + (0,137 * 3,507E - 4) + (0,068 * 1,43E - 4)$$

$$v_{gases} = 2,10E - 4 \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Se calcula el número de Rayleigh dado por la ecuación (14).

$$Ra = \frac{9,81 * \beta * (1840 - 1021) * 0,06775}{(2,10E - 4)^2} * 0,6668 \rightarrow Ra = 39620$$

Con todos los parámetros anteriores se calcula en número de Nusselt

$$Nu_{ct} = \left[1 + \left\{ \frac{0,104(39620)^{0,293}}{1 + \left(\frac{6310}{39620} \right)^{1,36}} \right\}^3 \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow Nu_{ct} = 2,202$$

$$Nu_l = 0,242 \left(\frac{39620 * 0,06775}{0,8} \right)^{0,273} \rightarrow Nu_l = 2,22$$

$$Nu_t = 0,0605(39620)^{\frac{1}{3}} \rightarrow Nu_t = 2,062$$

$$Nu = [Nu_{ct}, Nu_l, Nu_t]_{max} \rightarrow Nu = 2,22$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección se halla reemplazando en la ecuación (11).

$$h_{conv} = \frac{2,22 * 0,0939}{0,06775} \rightarrow h_{conv} = 3,077 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Teniendo el coeficiente de transferencia de calor por convección, se calcula la tasa de transferencia por convección usando la ley de enfriamiento de Newton mencionada en la ecuación (10).

$$Q_{convección} = 3,077 * 0,5152 * (1431 - 1021) \rightarrow Q_{convección} = 649,1 [W]$$

5.2.3 *Análisis de radiación*

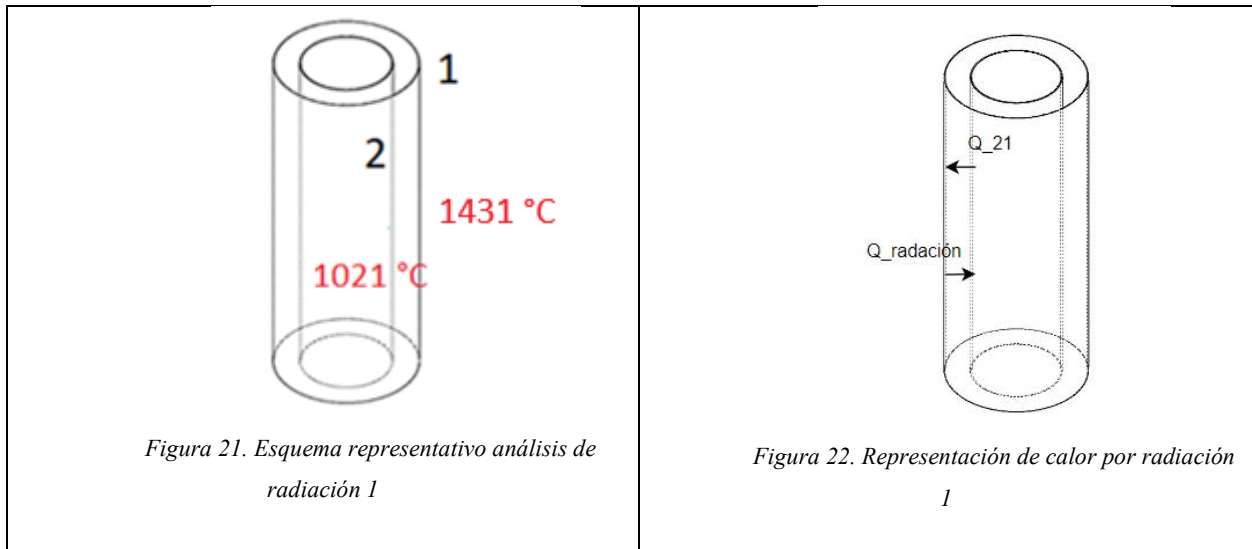
Este análisis se realiza para hallar la temperatura de llama que deben tener los gases de combustión para cumplir con la temperatura requerida al interior del reactor, cabe destacar que se modela el sistema para dos configuraciones geométricas distintas.

- Cilindros concéntricos sin tapas
- Cilindros concéntricos con tapas

Se toman las siguientes consideraciones en este análisis

- La temperatura de la carcasa exterior en su parte interior es aproximadamente similar a la temperatura de gases de combustión
- Las superficies son grises y difusas.

5.2.3.1 Análisis cilindros concéntricos sin tapas. A continuación, se diferencian cada una de las superficies y se representa el sentido del calor.



Debido a la disposición geométrica de esta configuración, los factores de visión entre ambas superficies $F_{12} = F_{21} = 1$. Y, además los factores de visión entre ellos mismos son cero.

La tasa de transferencia de calor por radiación se calcula de la resta del calor requerido y el calor por convección hallado previamente, como lo indica la ecuación (30)

$$Q_{requerido} = Q_{convección} + Q_{radiación} \quad (30)$$

$$Q_{radiación} = 24000 - 649,1 \rightarrow Q_{radiación} = \mathbf{23351 [W]}$$

Teniendo el calor que es suministrado por radiación y utilizando el método de solución de transferencia de calor entre superficies grises y difusas se halla la temperatura de llama a la que deben estar los gases de combustión que se asemeja a la temperatura que tendrá la carcasa exterior del reactor.

Caracterizando la ecuación (16) para cada superficie en estudio se tiene que:

$$Q_{radiación} = A_{superficial-1} * \sum_{j=1}^N F_{12}(J_1-J_2)$$

$$Q_{21} = A_{superficial-2} * \sum_{j=1}^N F_{21}(J_2-J_1)$$

De igual manera y para las temperaturas se hace uso de la ecuación (21).

$$\sigma T_{llama_{calculada}}^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_{AlSi304}}{\varepsilon_{AlSi304}} * \sum_{j=1}^N F_{12}(J_1-J_2)$$

$$\sigma T_{T_s,extreactor}^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} * \sum_{j=1}^N F_{21}(J_2-J_1)$$

Se tiene un sistema de ecuaciones 4x4 que se soluciona para $J_1; J_2; T_{llama_{calculada}}^4; Q_{21}$

Teniendo en cuenta que $\varepsilon_{AlSi304} = 0,3$ y en donde $A_{superficial-1}$ y $A_{superficial-2}$ son las áreas superficiales de los cilindros concéntricos $A_{superficial} = \pi * \Phi * L_{reactor}$

Tabla 8. Resultados iniciales proceso de iteración

$J_1 = 152570 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
$J_2 = 125283 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
$T_{llama_{calculada}}^1 = 1397K$
$Q_{21} = -14059 W$

Como se observa en la tabla inmediatamente anterior, se obtienen los resultados iniciales del proceso de iteración, el proceso continúa haciendo la $T_{llama} = T_{llama_{calculada}}$ y recalculando todas las variables que dependen de la temperatura de llama, este proceso se realiza hasta que ambas temperaturas sean iguales.

A continuación, se muestra a modo de ejemplo una tabla de la variación de las principales variables a medida que se llega a la temperatura de llama corregida

Tabla 9. Variación de las variables principales con la temperatura de llama

T_llama [K]	Ra	Nusselt	h_conv [W/m ² K]	Q_conv [W]	Q_rad [W]	Q_21 [K]	T_llama_2 [K]	T_gases [K]
1840	39620	3,077	2,22	649,1	23351	-14059	1397	1431
1791	40319	3,032	2,231	601,7	23398	-14087	1398	1406
1743	40908	2,986	2,239	555,1	23445	-14115	1398	1382
1694	41362	2,937	2,246	509,2	23491	-14143	1399	1358
1645	41651	2,886	2,25	464,2	23536	-14170	1399	1333
1597	41736	2,832	2,252	419,9	23580	-14197	1400	1309
1548	41574	2,773	2,249	376,5	23623	-14223	1400	1285
1499	41114	2,711	2,242	334	23666	-14248	1401	1260
1451	40294	2,643	2,23	292,5	23707	-14273	1401	1236
1402	39041	2,568	2,211	252	23748	-14298	1402	1212

De modo que, modelando la configuración geométrica como dos cilindros concéntricos sin tapas, las variables principales toman los siguientes valores

Tabla 10. Valores finales cilindros concéntricos sin tapas

T_llama asumida [K]	T_llama Calculada[K]	T_gases[K]	Q_rad [W]	Q_conv [W]	Q_21 [W]
1402	1402	1212	23748	252	-14298

5.2.3.2 Análisis de cilindros concéntricos con tapas. Para este caso, se tienen en cuenta las tapas tanto del cilindro interno como el externo, es por ello por lo cual es necesario realizar un nuevo análisis de los factores de visión.

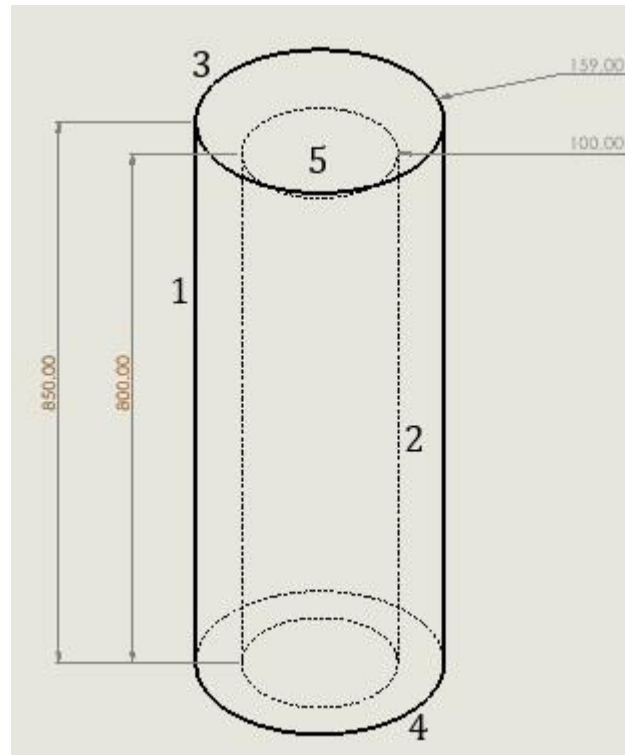


Figura 23. Superficies en interacción.

A partir de la regla de la suma se discretiza para las 5 superficies, haciendo uso de la ecuación (18). En donde:

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15} = 1$$

$$F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} = 1$$

$$F_{31} + F_{32} + F_{33} + F_{34} + F_{35} = 1$$

$$F_{41} + F_{42} + F_{43} + F_{44} + F_{45} = 1$$

$$F_{51} + F_{52} + F_{53} + F_{54} + F_{55} = 1$$

Analizando detenidamente, obtenemos que:

$$F_{22} = F_{25} = F_{33} = F_{44} = F_{45} = F_{52} = F_{54} = F_{55} = 0$$

Por otro lado, el análisis por reciprocidad indica que los factores de visión entre dos superficies son iguales si las área de dichas superficies son iguales, por lo cual tenemos que:

$$F_{23} = F_{24}$$

Al momento de desarrollar la ecuación para la superficie 1, es necesario hacer uso de la figura 13-8 del libro de transferencia de calor y masa como se muestra a continuación.

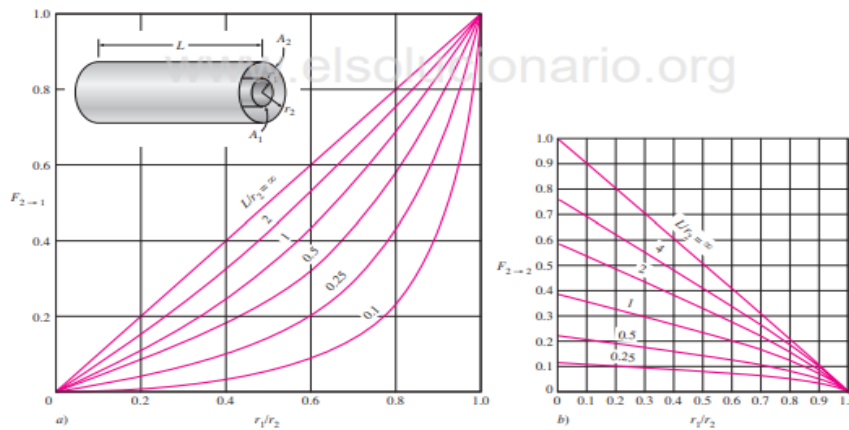


FIGURA 13-8
Factores de visión para dos cilindros concéntricos de longitud finita: a) del cilindro exterior hacia el interior; b) del cilindro exterior hacia sí mismo.

Figura 24. Gráficas de factores de visión para cilindro concéntricos de longitud finita.

Autoría: Cengel

Para ello, se obtienen las relaciones de radios y longitud-radio a partir de las dimensiones establecidas en la figura 9. Dando como resultado los siguientes valores:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{100}{159} = \mathbf{0.5874}$$

$$\frac{L}{r_1} = \frac{850}{159} = 5.346$$

A partir de la gráfica (a) de la figura 12, se obtiene que:

$$F_{12} = 0.54$$

Así mismo, haciendo uso de la gráfica (b) de la figura 12, se obtiene que:

$$F_{11} = 0.37$$

Finalmente, resolviendo la ecuación de la primer superficie, se obtiene que

$$0.56 + 0.37 + F_{13} + F_{14} + F_{15} = 1$$

Se aprecia que la ley de la reciprocidad aplica para las superficies 1 y 2, por esta razón se recurre a la ecuación (20), obteniendo así que:

$$A_2 F_{21} = A_1 F_{12} \rightarrow F_{21} = \frac{2\pi(r_1 L_1) * 0.54}{2\pi(r_2 L_2)}$$

Obteniendo como resultado:

$$F_{21} = \frac{(0.17025 * L_1) * 0.54}{(0.1 * 0.8)} = 0.9768$$

Reemplazando la ecuación para la superficie 2, se obtiene que:

$$0.9768 + 0 + 2F_{23} + 0 = 1$$

$$F_{23} = F_{24} = 0.0116$$

Acto seguido se procede a encontrar los factores de visión de la superficie 5 hacia las superficies 1 y 3, siendo la segunda de ellas por medio de la figura 14 como se muestra a continuación.

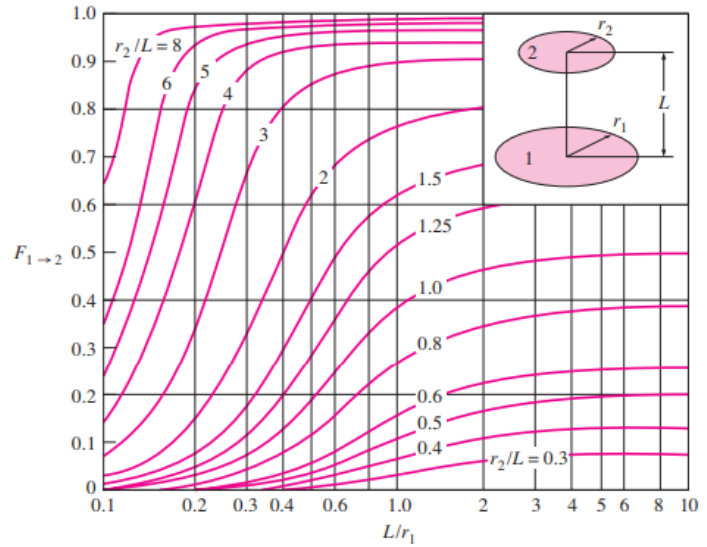


FIGURA 13-7
Factor de visión entre dos discos paralelos coaxiales.

Figura 25. Gráfica de factor de visión entre dos discos paralelos coaxiales.

$$\frac{r_3}{L_{3 \rightarrow 5}} = \frac{170.25}{50} = 3.405$$

$$\frac{L_{3 \rightarrow 5}}{r_5} = \frac{50}{100} = 0.5$$

A partir de los dos valores anteriormente mencionados, se estima que, por la gráfica, el factor de visión entre la superficie 5 y 3 corresponde a: $F_{53} = 0.86$

Resolviendo la ley de la suma para la superficie 5, encontramos que:

$$F_{51} + 0 + 0.86 + 0 + 0 = 1$$

$$F_{51} = 0.14$$

A continuación, se aplica la ley de reciprocidad para la superficie 5 y 1, obteniendo que:

$$A_5 F_{51} = A_1 F_{15}$$

$$F_{15} = \frac{A_5 F_{51}}{A_1} = \frac{\frac{\pi}{4} * 0.2^2 * 0.14}{2\pi * 0.17025 * L_1} = \mathbf{0.004837}$$

Posteriormente, se calcula por medio de la ley de reciprocidad el factor de visión

F_{32} , F_{35} y F_{42}

$$A_3 F_{32} = A_2 F_{23}$$

$$A_3 F_{35} = A_5 F_{53}$$

$$A_3 F_{35} = A_5 F_{53}$$

$$A_2 F_{24} = A_4 F_{42}$$

$$F_{32} = \frac{2\pi(r_2 L_2) * 0.0116}{\frac{\pi}{4} * 0.3405^2} = \mathbf{0.06401}$$

$$F_{35} = \frac{\frac{\pi}{4} * 0.2^2 * 0.86}{\frac{\pi}{4} * 0.3405^2} = \mathbf{0.2967}$$

$$F_{42} = \frac{2(0.1 * 0.8) * 0.0116}{\frac{1}{4}(0.3405^2 - 0.2^2)} = \mathbf{0.09772}$$

Llegado a este punto se recurren a las ecuaciones inicialmente planteadas mediante la regla de la suma para cada superficie, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$F_{13} + F_{14} = 1 - 0.37 - 0.54 - 0.004837$$

$$0.9798 + 0 + 0.01008 + 0.01008 = 1$$

$$F_{31} + F_{34} = 1 - 0.638 - 0 - 0.3441$$

$$F_{41} + F_{43} = 1 - 0.1056$$

$$0.13 + 0.87 = 1$$

Este sistema de ecuaciones se compone de 3 ecuaciones con 6 incógnitas, sin embargo, puesto que estas superficies son emisoras y reflectoras difusas se pueden obtener las otras 3 ecuaciones por medio de la ley de reciprocidad, obteniendo así un sistema de 6x6 desarrollado mediante EES.

$$A_1 F_{13} = A_3 F_{31}$$

$$A_1 F_{14} = A_4 F_{41}$$

$$A_3 F_{34} = A_4 F_{43}$$

Tabla 11. Tabla resumen de factores de visión para el análisis de cilíndricos concéntricos con tapas.

Factor de visión $i \downarrow ; j \rightarrow$	1	2	3	4	5
1	0.37	0.54	0.045	0.04016	0.004837
2	0.9768	0	0.0116	0.0116	0
3	0.4493	0.06401	0	0.1899	0.2967
4	0.6123	0.09772	0.29	0	0
5	0.14	0	0.86	0	0

A partir de estos factores se obtienen los valores de radiosidad para cada superficie gris y difusa mediante la ecuación (21) como se menciona a continuación:

$$\sigma T_{llama_recal}^4 = J_1 + \frac{1 - \varepsilon_{304}}{\varepsilon_{304}} * (F_{12}(J_1 - J_2) + F_{13}(J_1 - J_3) + F_{14}(J_1 - J_4) + F_{15}(J_1 - J_5))$$

$$\sigma T_{superficial}^4 = J_2 + \frac{1 - \varepsilon_{304}}{\varepsilon_{304}} * (F_{21}(J_2 - J_1) + F_{23}(J_2 - J_3) + F_{24}(J_2 - J_4) + F_{25}(J_2 - J_5))$$

$$\sigma T_{gases}^4 = J_3 + \frac{1 - \varepsilon_{304}}{\varepsilon_{304}} * (F_{31}(J_3 - J_1) + F_{32}(J_3 - J_2) + F_{34}(J_3 - J_4) + F_{35}(J_3 - J_5))$$

$$\sigma T_{gases}^4 = J_4 + \frac{1 - \varepsilon_{304}}{\varepsilon_{304}} * (F_{41}(J_4 - J_1) + F_{42}(J_4 - J_2) + F_{43}(J_4 - J_3) + F_{45}(J_4 - J_5))$$

$$\sigma T_{superficial}^4 = J_5 + \frac{1 - \varepsilon_{304}}{\varepsilon_{304}} * (F_{51}(J_5 - J_1) + F_{52}(J_5 - J_2) + F_{53}(J_5 - J_3) + F_{54}(J_5 - J_4))$$

Para la solución de este sistema de ecuaciones de 5x5 se utiliza el software EES, a partir del cual se obtienen los siguientes valores.

Tabla 12. Resumen de los valores de radiosidad

J_1 [W/m ²]	J_2 [W/m ²]	J_3 [W/m ²]	J_4 [W/m ²]	J_5 [W/m ²]
192840	152748	138579	157874	64741

Finalmente se obtienen los calores reflectivos por cada superficie, así como también el calor de radiación a partir de la ecuación (16), para posteriormente recalcular.

$$Q_{rad(1)} = A_{s_1} * (F_{12}(J_1 - J_2) + F_{13}(J_1 - J_3) + F_{14}(J_1 - J_4) + F_{15}(J_1 - J_5))$$

$$Q_{2} = A_{s_2} * (F_{21}(J_2 - J_1) + F_{23}(J_2 - J_3) + F_{24}(J_2 - J_4) + F_{25}(J_2 - J_5))$$

$$Q_{_3} = A_{s_3} * (F_{31}(J_3-J_1) + F_{32}(J_3-J_2) + F_{34}(J_3-J_4) + F_{35}(J_3-J_5))$$

$$Q_{_4} = A_{s_4} * (F_{41}(J_4-J_1) + F_{42}(J_4-J_2) + F_{43}(J_4-J_3) + F_{45}(J_4-J_5))$$

$$Q_{_5} = A_{s_5} * (F_{51}(J_5-J_1) + F_{52}(J_5-J_2) + F_{53}(J_5-J_3) + F_{54}(J_5-J_4))$$

Obteniendo como resultado los siguientes valores:

Tabla 13. Resumen de los valores de calor

$Q_{rad(1)}$ [W]	Q_2 [W]	Q_3 [W]	Q_4 [W]	Q_5 [W]
23745	20221	641.3	884	44.65

A partir del calor obtenido por radiación y a partir del balance de energía se encontró que el calor suministrado por la radiación y la convección corresponde a 24.000 [W], se recalcula el valor de las propiedades, el coeficiente de transferencia de calor por convección, el calor por convección y la temperatura de llama, a continuación, se muestra una tabla con las iteraciones de estas propiedades.

Tabla 14. Iteraciones de propiedades hasta obtener una temperatura de llama calculada igual a la asumida inicialmente.

T_llama [K]	h_conv [W/m ²]	Q_conv [W]	Q_rad [W]	Q_2[W]	Q_3[W]	Q_4[W]	Q_5[W]	T_llama Calculada [K]
1402	2.582	254.6	23745	20221	641.3	884	44.65	1455
1430	2.626	278	23722	20346	506.2	805	41.5	1456
1450	2.656	295	23075	20438	406.9	747	39.19	1456
1456	2.665	300.1	23699.9	20466	376.6	729.3	38.48	1456

Obteniendo como resultado final, los siguientes valores:

Tabla 15. Resultados finales recalculados

T_llama [K]	h_conv [W/m ²]	Q_conv [W]	Q_rad [W]	Q_2[W]	Q_3 [W]	Q_4 [W]	Q_5 [W]	T_llama Calculada [K]
1456	2.665	300.1	23699.9	20466	376.6	729.3	38.48	1456

5.2.4 Análisis y selección de materiales

A partir del análisis del comportamiento del sistema se establecen los materiales con sus correspondientes espesores con base en los parámetros de resistencia a altas temperaturas por largos periodos de tiempo, resistencia a la oxidación y corrosión, resistencia mecánica y expansión térmica.

5.2.4.1 Reactor. Para el caso del reactor, se establecen las siguientes condiciones operacionales:

- Existe un contacto directo por la superficie externa con las llamas de las flautas de gas
- Requiere de un espesor de lámina que le permita tener una expansión térmica y resistencia mecánica alta producto del contacto directo con las llamas de las flautas de gas y un tiempo de operación superior a una hora.
- Se requiere un material que posea una alta resistencia a la corrosión y oxidación producto de la exposición a altas temperaturas por largos periodos de tiempo y así mismo, el contacto directo por la superficie interna con productos derivados de hidrocarburos.

Un material que posee estas características es el acero inoxidable, para el caso de la ciudad de Bucaramanga, el acero inoxidable mayormente comercial es el 304, para la selección de su calibre, se consulta con el proveedor con base en las condiciones operacionales anteriormente mencionadas y el calibre 12 es el recomendado, con un espesor de lámina de 3 milímetros.

5.2.4.2 Cascaron del reactor. Las condiciones operacionales de la carcasa son similares a las del reactor, con la diferencia de no encontrarse en contacto directo con productos derivados de hidrocarburos y su temperatura es producto de la radiación reflejada en mayor medida por parte del reactor, es por ello que el proveedor sugiere mantener el mismo espesor de lámina que el reactor y optar por un acero rolado en caliente.

5.3 SELECCIÓN ELEMENTOS DE LA JUNTA TAPA/REACTOR

El análisis de presiones en el sistema se realiza con el objetivo de determinar el material y las dimensiones de los tornillos que sujetan la junta, a pesar de que el movimiento de los gases finaliza en un recipiente que se encuentra a una presión estándar, la junta se diseña para soportar una presión de trabajo de 50 psi, con el fin de evitar complicaciones con aumentos de presión no previstos.

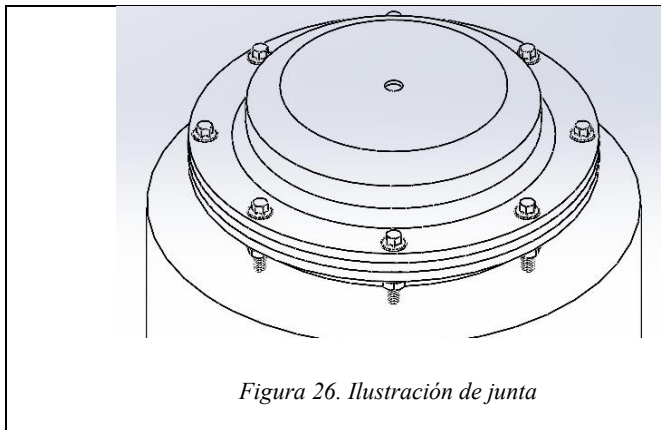


Figura 26. Ilustración de junta

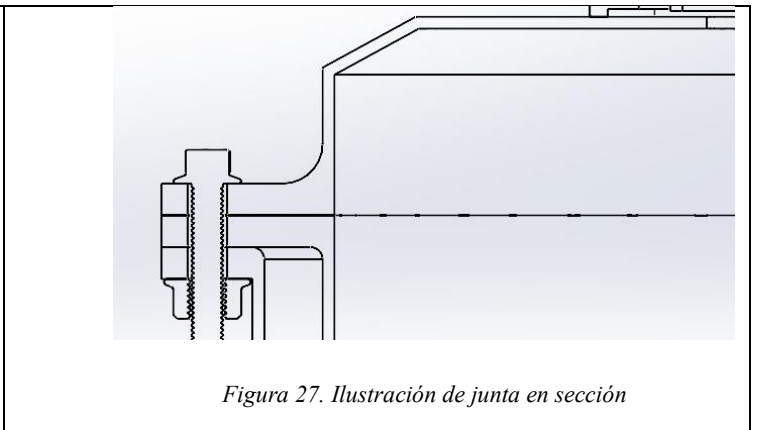


Figura 27. Ilustración de junta en sección

Como se puede observar en las figuras anteriores, se tiene una junta en la que se encuentran la tapa del reactor, la carcasa exterior del reactor, el reactor y el empaque correspondiente.

El cálculo de los factores de seguridad de separación y de tensión se calculan siguiendo la metodología de Diseño de máquinas de Norton

Primeramente, se calcula la fuerza aplicada sobre cada perno, sabiendo que el reactor tiene un diámetro $20\text{ cm} = 7.87\text{ in}$ y posee una presión de 50 psi que es asumida como criterio de diseño.

$$Carga_{Junta} = p * A_{interna-cilindro} \quad (31)$$

$$Carga = 50\text{ [psi]} * \frac{\pi * 7,87^2}{4} = 2432,25\text{ lb}$$

$$Carga_{Junta} = \frac{Carga}{\# \text{ pernos}} = \frac{2432,25}{8} = 304,03\text{ lb}$$

Se realiza el análisis sin un empaque para posteriormente incluirlo, se calcula la razón de aspecto de la junta.

$$j = \frac{d_{perno}}{l} = \frac{0,25}{0,945} = 0,26$$

Donde d_{perno} es el diámetro del perno y l es la longitud total de la sujeción, por efectos de facilitar los cálculos, se trabaja con $j = 0,25$

Se halla la relación de módulos de rigidez entre los materiales de la junta y el material del perno.

$$r_H = \frac{E_{material-1}}{E_{perno}} = \frac{30E6}{30E6} = 1$$

$$r_l = \frac{E_{material-2}}{E_{perno}} = \frac{27,5E6}{30E6} = 0,9166$$

Donde r_H representa la relación del material con el módulo de Young más alto (Acero) y r_l representa el material con el módulo de Young más bajo (Acero inoxidable 304)

La razón de espesor de la junta que relaciona los espesores de los módulos bajo y alto de los materiales.

$$t = \frac{T_L}{T_L - T_H} = \frac{0,63}{0,63 - 0,315} = 0,67$$

Debido que la junta es de materiales distintos (acero al carbono y acero inoxidable), se calculan los términos C_H y C_L usando las siguientes ecuaciones.

$$C_H = p_3 r_H^3 + p_2 r_H^2 + p_1 r_H + p_0$$

$$C_L = p_3 r_l^3 + p_2 r_l^2 + p_1 r_l + p_0$$

j	p_0	p_1	p_2	p_3
0.10	0.4389	-0.9197	0.8901	-0.3187
0.20	0.6118	-1.1715	1.0875	-0.3806
0.30	0.6932	-1.2426	1.1177	-0.3845
0.40	0.7351	-1.2612	1.1111	-0.3779
0.50	0.7580	-1.2632	1.0979	-0.3708
0.60	0.7709	-1.2600	1.0851	-0.3647
0.70	0.7773	-1.2543	1.0735	-0.3595
0.80	0.7800	-1.2503	1.0672	-0.3571
0.90	0.7797	-1.2458	1.0620	-0.3552
1.00	0.7774	-1.2413	1.0577	-0.3537
1.25	0.7667	-1.2333	1.0548	-0.3535
1.50	0.7518	-1.2264	1.0554	-0.3550
1.75	0.7350	-1.2202	1.0581	-0.3574
2.00	0.7175	-1.2133	1.0604	-0.3596

Figura 28. Parámetro p_i

Autoría: Diseño de máquinas, Norton, pg 759

Dado que la razón de aspecto es 0,25 se realiza una interpolación de los datos de la figura anterior

$$C_H = p_3 r_H^3 + p_2 r_H^2 + p_1 r_H + p_0 = (-0,38255) + 1,1026 - 1,20705 + 0,6525$$

$$C_H = 0,1654$$

$$C_L = p_3 r_l^3 + p_2 r_l^2 + p_1 r_l + p_0$$

$$C_L = (-0,38255)(0,9166)^3 - (1,1026)(0,9166)^2 + (-1,20705)(0,9166) + 0,6525$$

$$C_L = 0,1777$$

De igual manera se calcula el valor C_t haciendo uso de la siguiente ecuación

$$C_t = q_3 t^3 + q_2 t^2 + q_1 t + q_0$$

j	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
0.10	0.0079	17.040	-92.832	202.44	-209.38	82.726
0.20	0.1010	8.5465	-24.166	15.497		
0.30	0.0861	8.2344	-22.274	13.963		
0.40	0.0695	8.0297	-20.727	12.646		
0.50	0.0533	7.8676	-19.357	11.457		
0.60	0.0372	7.6705	-17.951	10.262		
0.70	0.0197	7.3030	-16.235	8.9273		
0.80	0.0029	6.9893	-14.737	7.7545		
0.90	-0.0123	6.7006	-13.363	6.6784		
1.00	-0.0265	6.4643	-12.188	5.7481		
1.25	-0.0524	5.7363	-9.3326	3.6348		
1.50	-0.0678	5.0674	-7.0322	2.0107		
1.75	-0.0763	4.5187	-5.1590	0.6861		
2.00	-0.0784	3.9617	-3.5248	-0.3956		

Figura 29. Parámetro q_i

Autoría: Diseño de máquinas, Norton, pg 761

$$C_t = (14,73)(0,67)^3 - (23,22)(0,67)^2 + (8,39)(0,67) + 0,09355$$

$$C_t = -0,2667$$

Se calcula la amplitud del factor de corrección

$$a = e^{0,0598(\ln j)^3 + 0,1385(\ln j)^2 - 0,4350(\ln j) - 2,3516} \rightarrow a = 0,1936$$

Con todos los parámetros calculados para el caso dado, se calcula el factor de rigidez de la junta sin el empaque incluido

$$C_{sin-empaque} = C_H + (t + aC_t)(C_L - C_H) \rightarrow C_{sin-empaque} = 0,1730$$

Utilizando los datos geométricos y las propiedades mecánicas de un perno, se calcula la rigidez de estos.

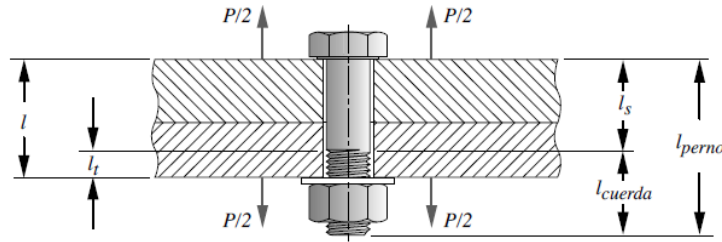


Figura 30. Configuración de la junta en tensión

Autoría: Diseño de máquinas, Norton, pg 745

De la anterior configuración se obtiene:

$$l_{cuerda} = 2d + 0,25 = 2(0,25) + 0,25 = 0,75 \text{ in}$$

$$l_s = l_{perno} - l_{cuerda} = 1,5 - 0,75 = 0,75 \text{ in}$$

$$l_t = l - l_s = 0,945 - 0,75 = 0,195 \text{ in}$$

$$K_b = \left(1 + \frac{d_{perno}}{l}\right)^{-1} * \left(\frac{A_t A_b}{A_b l_t + A_t l_s}\right) * E_b \quad (32)$$

Donde A_b es el área transversal del perno, en este caso el área para $0,25 \text{ in}$, K_b es la rigidez del perno y A_t es el área de esfuerzo de esfuerzo por tensión del perno seleccionado, estas áreas se muestran en la siguiente figura.

$$K_b = \left(1 + \frac{0,25}{0,945}\right)^{-1} * \left(\frac{0,0318 * 0,049}{0,049 * 0,195 + 0,0318 * 0,75}\right) * 30E6$$

$$K_b = 5,2899E6 \text{ [lb/in]}$$

Ahora se calcula la rigidez de la junta sin el empaque

$$K_{junta-sin-empaque} = K_b * \left(\frac{1 - C_{sin-empaque}}{C_{sin-empaque}}\right) \quad (33)$$

$$K_{\text{junta-sin-empaque}} = 5.2899E6 * \left(\frac{1 - 0,1730}{0,1730} \right)$$

$$K_{\text{junta-sin-empaque}} = 5,2899E6 [Lb/in]$$

Tabla 11-1 Dimensiones principales de las cuerdas de tornillos del estándar nacional unificado
 Datos calculados con las ecuaciones 11.1; véase la referencia 3 para mayor información

Tamaño	Cuerdas gruesas, UNC				Cuerdas finas, UNF		
	Diámetro mayor d (in)	Cuerdas por pulgada	Diámetro menor d_r (in)	Área de esfuerzo por tensión A_t (in ²)	Cuerdas por pulgada	Diámetro menor d_r (in)	Área de esfuerzo por tensión A_t (in ²)
0	0.0600	–	–	–	80	0.0438	0.0018
1	0.0730	64	0.0527	0.0026	72	0.0550	0.0028
2	0.0860	56	0.0628	0.0037	64	0.0657	0.0039
3	0.0990	48	0.0719	0.0049	56	0.0758	0.0052
4	0.1120	40	0.0795	0.0060	48	0.0849	0.0066
5	0.1250	40	0.0925	0.0080	44	0.0955	0.0083
6	0.1380	32	0.0974	0.0091	40	0.1055	0.0101
8	0.1640	32	0.1234	0.0140	36	0.1279	0.0147
10	0.1900	24	0.1359	0.0175	32	0.1494	0.0200
12	0.2160	24	0.1619	0.0242	28	0.1696	0.0258
1/4	0.2500	20	0.1850	0.0318	28	0.2036	0.0364
5/16	0.3125	18	0.2403	0.0524	24	0.2584	0.0581
3/8	0.3750	16	0.2938	0.0775	24	0.3209	0.0878
7/16	0.4375	14	0.3447	0.1063	20	0.3725	0.1187
1/2	0.5000	13	0.4001	0.1419	20	0.4350	0.1600
9/16	0.5625	12	0.4542	0.1819	18	0.4903	0.2030
5/8	0.6250	11	0.5069	0.2260	18	0.5528	0.2560
3/4	0.7500	10	0.6201	0.3345	16	0.6688	0.3730
7/8	0.8750	9	0.7307	0.4617	14	0.7822	0.5095
1	1.0000	8	0.8376	0.6057	12	0.8917	0.6630

Figura 31. Dimensiones tornillos estándar nacional unificado

Autoría: Diseño de máquinas, Norton, pg 726

Teniendo la rigidez del material sin el empaque, se calcula la rigidez del material incluyendo el empaque, para este caso se estudia un empaque de grafito debido a las altas temperaturas que se manejan, con módulo de Young $E = 1,4E6$, para esto se debe calcular el área del empaque que está en contacto con la junta y que recibe carga de esta.

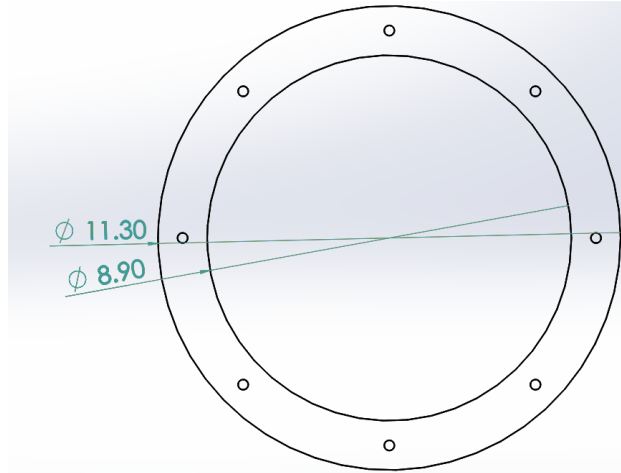


Figura 32. Representación empaque

$$A_{\text{contacto-empaque}} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2}{\# \text{ pernos}} - d_{\text{perno}}^2 \right) \quad (34)$$

$$A_{\text{contacto-empaque}} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{11,3^2 - 8,9^2}{8} - 0,25^2 \right) = 4,71 [\text{in}^2]$$

$$K_{\text{empaque}} = \frac{A_{\text{contacto-empaque}} * E_{\text{empaque}}}{t_{\text{empaque}}} \quad (35)$$

$$K_{\text{empaque}} = \frac{4,71 * 1,4E6}{0,0625}$$

El espesor t del empaque se asume de 0,0625 [in] como un valor nominal encontrado en el mercado.

$$K_{\text{empaque}} = 105,504E6 [\text{lb/in}]$$

Finalmente se encuentra la rigidez total de la junta teniendo en cuenta el empaque, seguido a esto se encuentra la nueva constante de la junta.

$$K_{\text{junta}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{junta-sin-empaque}}} + \frac{1}{K_{\text{empaque}}}} = \frac{1}{\frac{1}{5,2899E6} + \frac{1}{105,504E6}}$$

$$K_{Junta} = 5,037E6 \text{ [lb/in]}$$

$$C_{con-empaque} = \left(\frac{K_b}{K_{Junta} + K_b} \right) = \left(\frac{1,1066E6}{5,037E6 + 1,1066E6} \right)$$

$$C_{con-empaque} = 0,1801$$

Se calcula la carga correspondiente que asume el perno y el material en cada junta respectivamente.

$$P_b = C_{con-empaque} * Carga_{Junta} = 54,75 \text{ [lb]}$$

$$P_m = (1 - C_{con-empaque}) * Carga_{Junta} = 294,24 \text{ [lb]}$$

Para calcular los factores de seguridad, se asume una precarga de la junta del 75% esto para contrarrestar la fatiga producida por la deformación de las materias debido a los cambios de temperatura en las juntas.

$$F_i = f_p * S_p * A_t \tag{36}$$

Donde f_p es la precarga y S_p es el esfuerzo de prueba del perno que se encuentra en la siguiente figura dependiendo del grado del perno.

Tabla 11-6 Especificaciones y resistencias de la SAE para pernos de acero

Número de grado de la SAE	Intervalo del tamaño del diám. ext. (in)	Resistencia de prueba mínima (kpsi)	Resistencia a la fluencia mínima (kpsi)	Resistencia a la tensión mínima (kpsi)	Material
1	0.25–1.5	33	36	60	bajo o medio carbono
2	0.25–0.75	55	57	74	bajo o medio carbono
2	0.875–1.5	33	36	60	bajo o medio carbono
4	0.25–1.5	65	100	115	medio carbono, forjado en frío
5	0.25–1.0	85	92	120	medio carbono, Q&T*
5	1.125–1.5	74	81	105	medio carbono, Q&T
5.2	0.25–1.0	85	92	120	martensita al bajo carbono, Q&T
7	0.25–1.5	105	115	133	aleación al medio carbono, Q&T
8	0.25–1.5	120	130	150	aleación al medio carbono, Q&T
8.2	0.25–1.0	120	130	150	martensita al bajo carbono, Q&T

* Templado y revenido

Figura 33. Especificación y resistencia de la SAE pernos de acero

Autoría: Diseño de máquinas, Norton, pg 744

$$F_i = 0,75 * 85E3 * 0,0318 = 2027,25 [lb]$$

De modo que la carga total de los pernos y el material de la junta incluyendo la precarga respectivamente es.

$$F_b = F_i + P_b = 2027,25 + 54,75 = 2082 [lb]$$

$$F_m = F_i - P_m = 2027,25 - 249,24 = 1778,01 [lb]$$

El esfuerzo de tensión del perno se calcula como.

$$\sigma_y = \frac{F_b}{A_t} = \frac{2082}{0,0318} = 65,5 \text{ ksi}$$

$$N_y = \frac{S_y}{\sigma_y} = \frac{92}{65,5} = 1,40$$

La carga requerida para separar la junta y el factor de seguridad a la separación son respectivamente.

$$P_o = \frac{F_i}{1 - C_{con-empaquet}} = \frac{2027,25}{1 - 0,1801} = 2472,85 [lb]$$

$$N_{separación} = \frac{P_o}{Carga_{Junta}} = \frac{2472,85}{304,03} = 8,3$$

Los valores obtenidos para el factor de seguridad son suficientes, ya que se asume una presión interior alrededor de 4 veces mayor a la presión que se esperar alcanzar en el lecho debido a la descarga de todos estos gases a presión atmosférica, Por lo cual es válido usar tornillos M6 para este caso en especial y un empaque de grafito o asbesto reforzado.

5.4 SELECCIÓN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Para la estructura que soporta todo el sistema, se trabaja con elementos estructurales unido por soldadura, se diseña una estructura simple que permite acoplar todos los elementos de una manera fácil y rápida como se muestra en la siguiente figura.

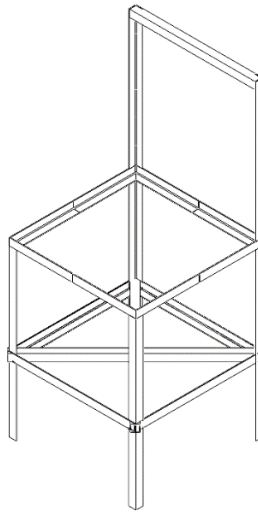


Figura 34. Estructura soporte del sistema

Se utilizan ángulos cuadrados de acero estructural ASTM A36 de 1 ¼” x 1 ¼” x 1/8” y se refuerzan en la superficie inferior por medio de un acero estructural ASTM A36 de 1 ½” x 1 ½” x 1/8” soldados con la geometría mostrada anteriormente en la figura 34.

A partir de la masa total aproximada que soportará el bastidor (masa del reactor, masa del cascaron y masa de la tapa del reactor) se simulan las condiciones a las que se encuentra sometido este.

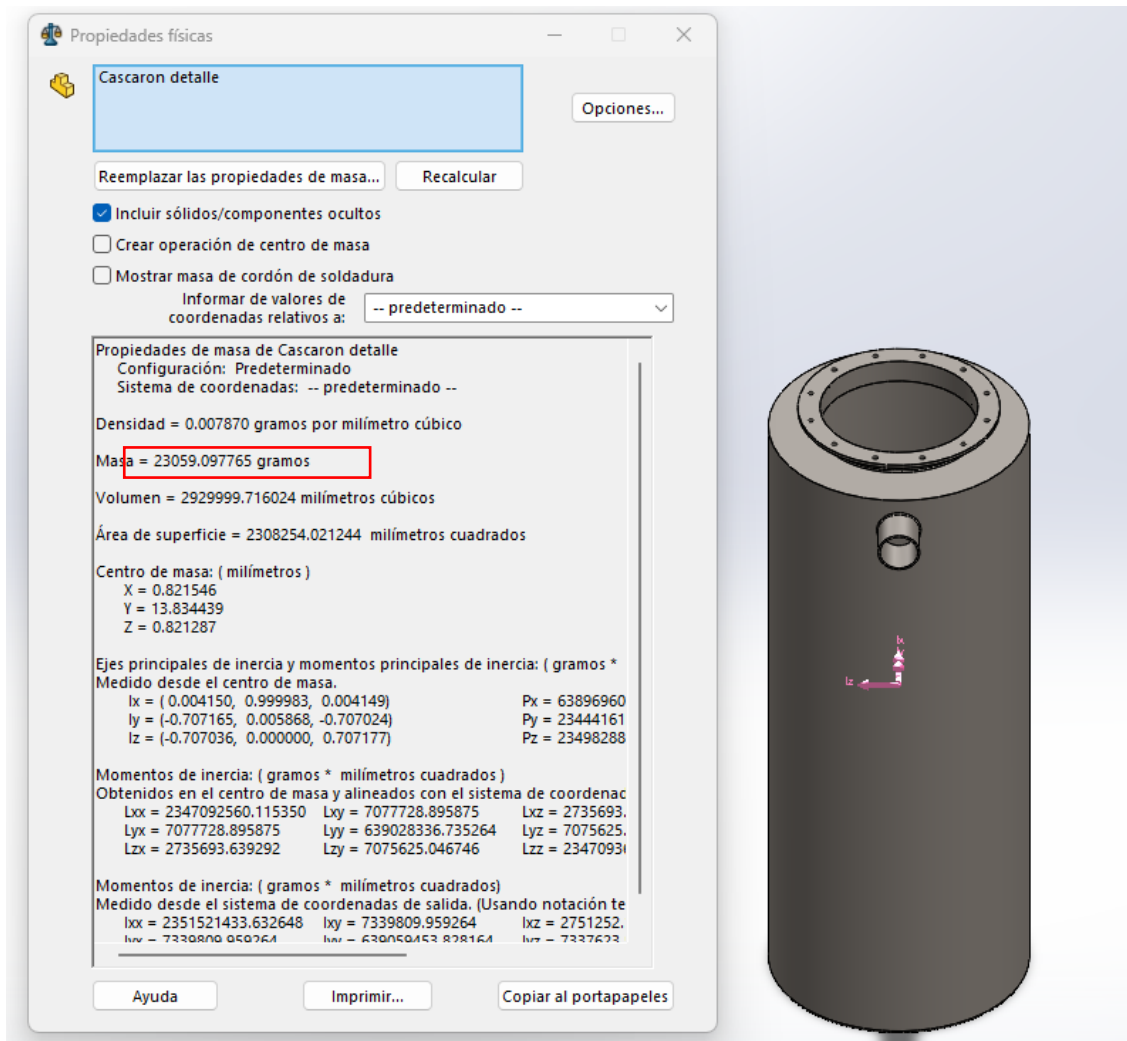


Figura 35. Masa cascaron

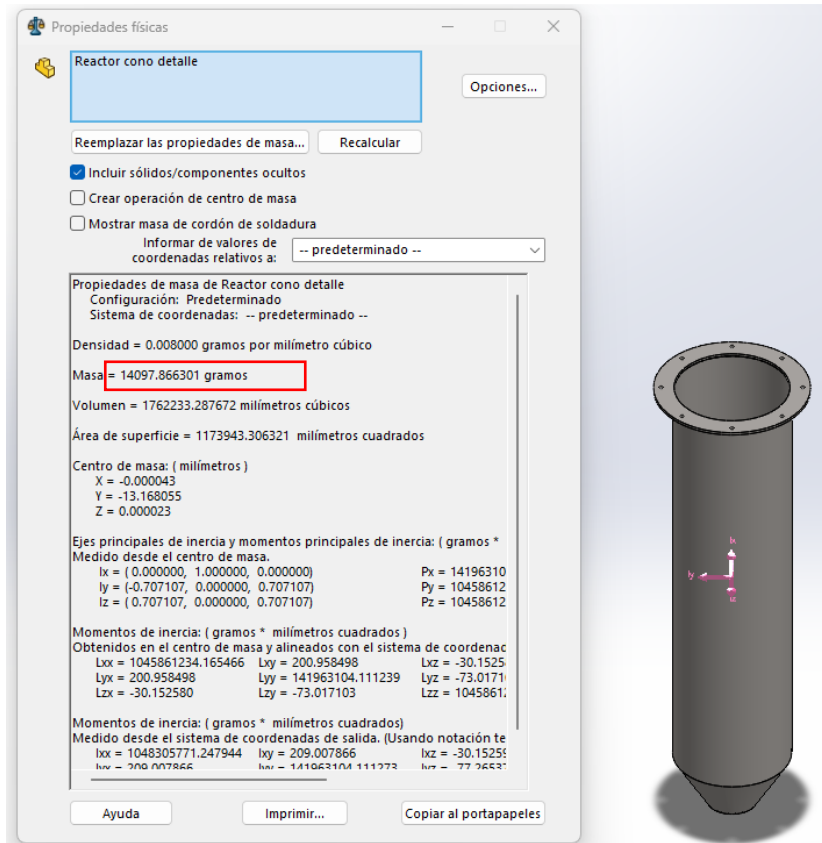


Figura 36. Masa reactor

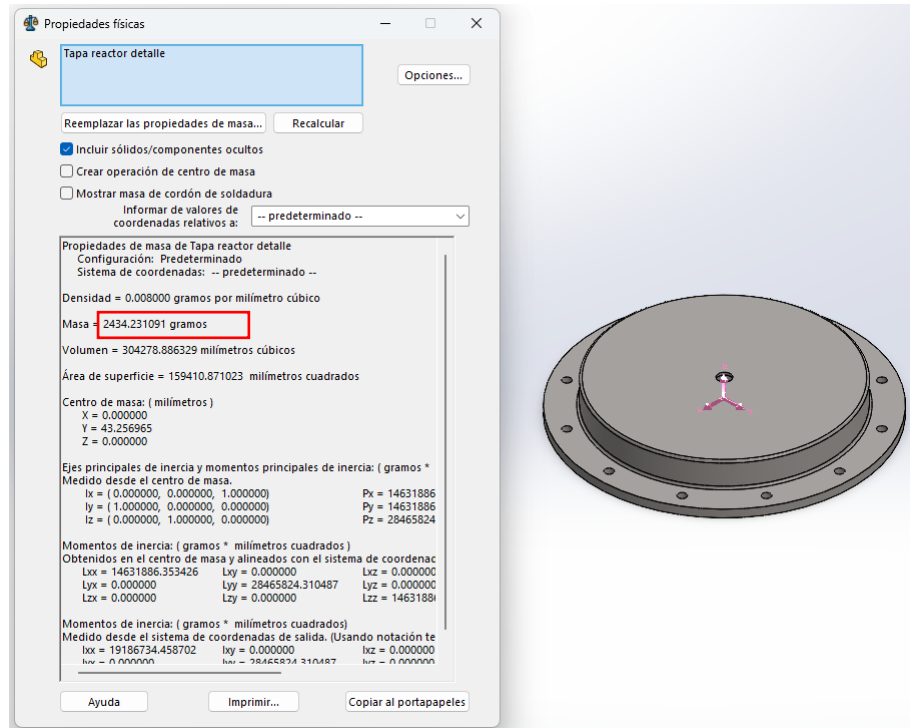


Figura 37. Masa tapa reactor

La suma de las masas de estos tres elementos da una masa total aproximado de 40Kg.

El estudio se realiza asumiendo una carga de 800N (80kg de masa) de modo que se aplica una carga dos veces mayor a la carga real que va soportar el bastidor en los miembros de la escuadra inferior que forman una X.

A continuación, se muestran los resultados de la simulación realizada en SOLIDWORKS.

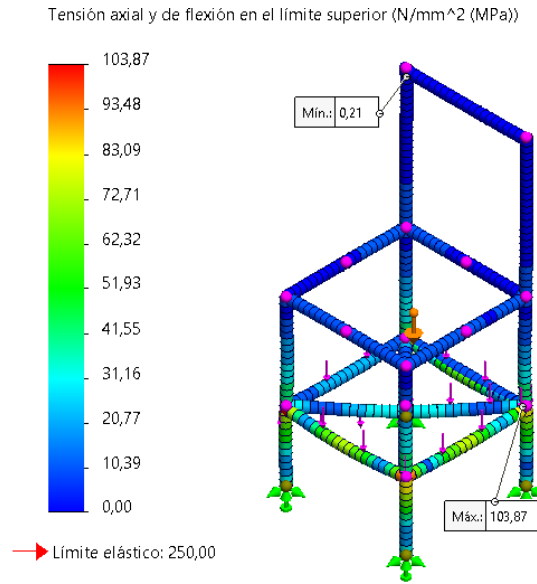


Figura 38. Esfuerzos de tensión y flexión

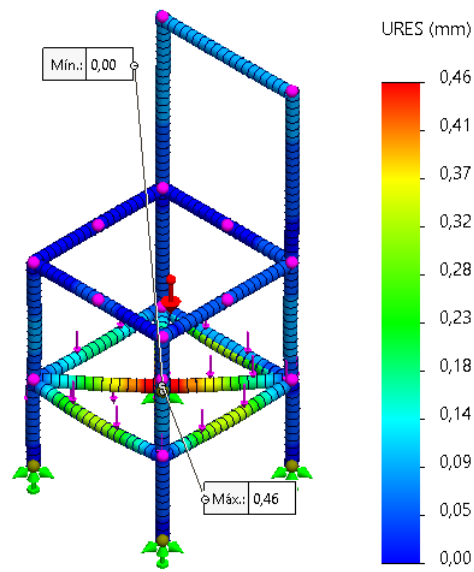


Figura 39. Deformación máxima del bastidor

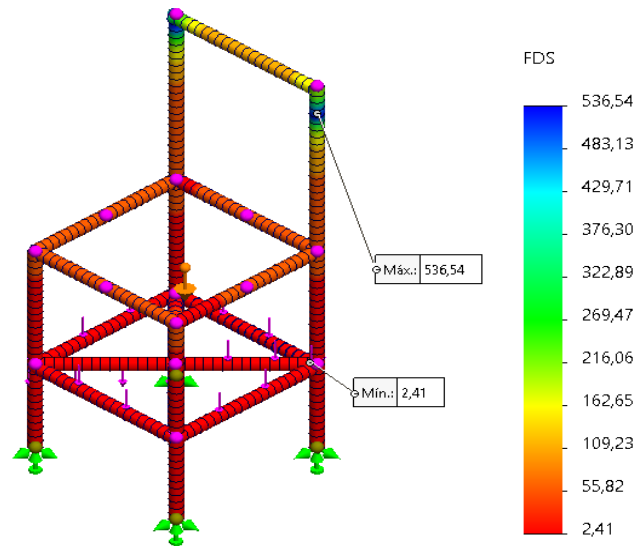


Figura 40. Factor de seguridad mínimo

Los resultados se encuentran organizados en la siguiente tabla, evidenciando que la estructura posee la suficiente resistencia y rigidez para desempeñar como soporte.

Tabla 16. Resultados análisis estático del bastidor

	Max	Min
Deformación	0,46 mm	0,0 mm
Esfuerzo	103,84 MPA	0,21 MPA
Factor de seguridad	536,84	2,41

6. Sistema de seguridad

Se realiza la implementación de un sistema que brinde una mayor seguridad al operador, así como también que favorezca la preservación del dispositivo, esto se realiza por medio de un sistema de aislamiento térmico y de control.

6.1 Cálculo de aislamiento térmico

Para este caso, es ideal que la energía térmica perdida a través de las paredes de la camisa externa del reactor hacia el ambiente sea el menor posible, así como también según la administración de salud y seguridad ocupacional de Estados Unidos y estudios de seguridad laboral se recomienda que las superficies accesibles a los trabajadores no excedan los 60°C, a partir de esta información e indagando acerca de los materiales mayormente usados para el aislamiento térmico, se realizan los cálculos pertinentes para determinar el espesor del mismo, para ello, se enlistan algunos datos y estimaciones en los análisis previos.

- Calor de salida equivalente al 10% de la energía suministrada: 7447.28536 [kJ]
- Área de transferencia de calor: 0.84917 [m²]
- Temperatura superficial interna de la carcasa = Temperatura de gases: 1227 [K]
- Temperatura externa de la superficie < 60°C
- Conductividad de la fibra de vidrio: [0.038-0.039] [W/m*°C]

En primer lugar, para realizar el cálculo pertinente del coeficiente de transferencia de calor por convección se debe calcular la temperatura de la superficie exterior del cuerpo del reactor por medio del modelo de resistencias térmicas para un cilindro. A partir del cual se obtiene que:

$$Q_{salida} = \frac{T_{sup-int} - T_{sup-ext}}{\frac{\ln\left(\frac{r_{int+esp}}{r_{int}}\right)}{2\pi Lk}} = \frac{1227 - T_{sup-ext}}{\frac{\ln\left(\frac{0.161}{0.159}\right)}{2\pi * 0.85 * 45}} = 2068.7$$

$$T_{sup-ext} = 1226.892 [K] = 953.742 [^{\circ}C]$$

Posteriormente, se calcula el espesor del aislante si se desea que la temperatura de la superficie en contacto con el ambiente sea de 60°C.

$$Q_{salida} = \frac{T_{sup-int} - T_{sup-aisl}}{\frac{\ln\left(\frac{r_{int+esp}}{r_{int}}\right)}{2\pi L k_{acero}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{aisl}}{r_{int+esp}}\right)}{2\pi L k_{f.vidrio}}} = 2068.7$$

$$953.742 - 60 = 2068.7 \left(5.2012E - 05 + \frac{\ln\left(\frac{r_{aisl}}{0.1605}\right)}{2\pi * 0.85 * 0.039} \right)$$

$$r_{aislamiento} = 0.16456[m] = 16.456[cm]$$

Finalmente, se implementa un sistema de dos láminas que permiten recubrir el material aislante y evita que el mismo se encuentre en contacto directo con el operario ya que la manipulación de la fibra de vidrio requiere de elementos de protección como guantes y tapabocas que el polvo que emana ocasiona irritación, de esta manera se aísla por completo del contacto directo.

6.2 Sistema de encendido

El sistema de encendido del dispositivo se realiza por medio de una chispa originada por una bujía la cual se ubica en la parte inferior de la flauta, más exactamente a la altura del primer agujero de la misma, este sistema permite generar la chispa de manera manual o automática, y se recomienda que el accionamiento manual se realice en el primer encendido del dispositivo y una vez se encuentre en funcionamiento se active el modo automático.

Los componentes que permiten el accionamiento manual y automático se ubican en el panel de control ubicado en la parte lateral derecha del dispositivo y se etiquetan para su correcta operación.

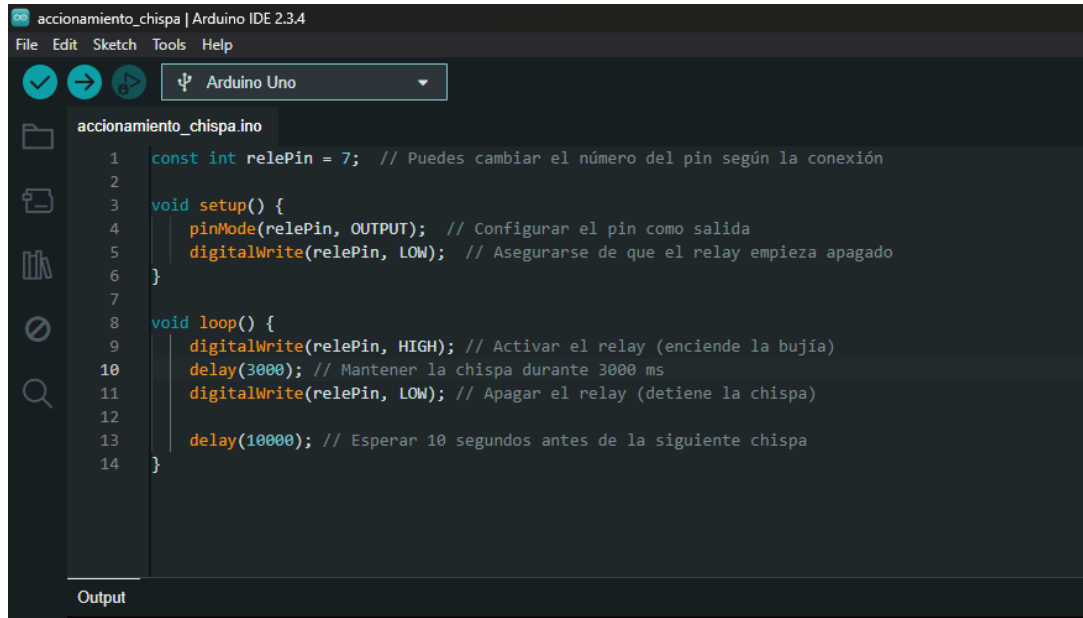
6.2.1 Accionamiento manual

El accionamiento manual se genera por medio de un botón, el cual está conectado a un relé que se encuentra normalmente abierto y se encuentra en paralelo con la tarjeta Arduino que permite el accionamiento automático. Este accionamiento se recomienda utilizar al momento de encender por primera vez el dispositivo.

Oprimir este botón permite el paso de corriente entre el módulo de las bujías y el sistema eléctrico de alimentación, lo que ocasiona el accionamiento de la descarga eléctrica entre las bujías y las flautas de gas.

6.2.2 Accionamiento automático

El encendido automático de las flautas de gas se realiza por medio del siguiente código el cual se carga en una tarjeta Arduino la cual se ubica y conecta al interior del panel de control.



```
accionamiento_chispa | Arduino IDE 2.3.4
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Uno
accionamiento_chispa.ino
1  const int relePin = 7; // Puedes cambiar el número del pin según la conexión
2
3  void setup() {
4      pinMode(relePin, OUTPUT); // Configurar el pin como salida
5      digitalWrite(relePin, LOW); // Asegurarse de que el relay empieza apagado
6  }
7
8  void loop() {
9      digitalWrite(relePin, HIGH); // Activar el relay (enciende la bujía)
10     delay(3000); // Mantener la chispa durante 3000 ms
11     digitalWrite(relePin, LOW); // Apagar el relay (detiene la chispa)
12
13     delay(10000); // Esperar 10 segundos antes de la siguiente chispa
14 }
Output
```

Figura 41. Código de Arduino para accionamiento de chispa

Por medio de este código se genera una chispa durante 3 segundos cada 10 segundos, de esta manera se asegura que las flautas de gas se encuentren encendidas en todo momento y no exista la acumulación de gas dentro de la cámara, lo que podría llevar a poner en riesgo el dispositivo y quien lo opera.

Finalmente, para accionar este modo de encendido se debe girar el switch ubicado en el panel de control hacia la posición ON y una vez la tarjeta Arduino reciba esta señal, se dará inicio al conteo de los 10 segundos para generar la chispa.

7 Lista de materiales

Se presentan los materiales requeridos para llevar a cabo la construcción del reactor de pirólisis con su correspondiente suministro de energía, así mismo, se realizó la implementación de un panel de control con el fin de visualizar algunas variables de interés y controlar factores que le brindaran una mayor seguridad al dispositivo. Estos materiales se dividen en 3 categorías, los cuales se muestran a continuación.

7.1 SUMINISTRO DE ENERGÍA

Elemento	Cantida d	Materia l	Especificacione s	Proveedo r
Quemador (Flautas)	4	Acero HR	$\Phi_{ext} = 1 \frac{5}{8}$ " L:80cm	Despunte la 28
Bujías	4	Cerámica	Cable reforzado con níquel	Thermo Resistencias
Válvulas de gas	4	Cobre	Piloto de 2.5 mm	Serviestufas
Módulo de bujías	1	Plástico	4 entradas	Serviestufas
Aros de sujeción	4	Acero	Platina de $1 \frac{1}{2}$ "	Despunte la 28
Tornillos	4	Acero	M5; L:2cm	Rey del tornillo
Tuercas	4	Acero	Hexagonal	Rey de tornillo
Tubos venturi	4	Aluminio	Long. Roscada: 5cm	Serviestufas
Manguera de distribución	4	Caucho	L: 12cm; $\Phi: \frac{1}{2}$ "	Multiacoples
Abrazadera s	4	Acero inoxidable	$\Phi:5-1$	Multiacoples

Acoples roscados simples	4	Bronce	$\Phi : \frac{1}{2}''$	Multiacoples
Espigas de pescado	4	Bronce	$\Phi : \frac{1}{2}''$	Multiacoples
Acople en X modificada	1	Bronce	$\Phi : \frac{1}{2}''$	Multiacoples
Manguera de gas	1	-	$\Phi : \frac{7}{16}''$ -24UNS L:5m	Multiacoples

7.2 REACTOR

Elemento	Cantidad	Material	Especificaciones	Proveedor
Camisa externa	1	Acero al carbono HR	Cal:12; H: 88cm; P:112.45	Indumetálicas HCM
Reactor	1	Acero Inox 304	Cal: 12; H: 80cm; P: 65.83 cm	Indumetálicas HCM
Tapa	1	Acero Inox 304	-	Escuela Ing. Mecánica UIS
Termocupla	1	Níquel-Cromo	Tipo K	Escuela Ing. Mecánica UIS
Sello	1		Anillo; d: cm; D: cm	La casa del empaque
Pernos	20	Acero	M8; L:3cm	Rey del tornillo
Tuercas	12	Acero	Hexagonal	Rey del tornillo
Bastidor	1	Acero	e:1/8''; Cal: 1 1/2''	Despuntas la 28
Thermolon	-	Polietileno metalizado	H:90 cm; P:132cm	CALYPSO

Aislamiento	-	Fibra de vidrio	H:90 cm; P:110cm	Homecenter
Carcasa de aislamiento	2	Acero HR	Cal: 22; P:70.7cm	Despupes las 28

7.3 PANEL DE CONTROL

Elemento	Cantidad	Especificaciones	Proveedor
Tablero	1	41cm x 41 cm	Escuela Ing. Mecánica UIS
Breacker	1		Thermo Resistencias
Arduino	1	Tarjeta UNO	Amazon
Tarjeta Relé	1	Conexión: NO	Amazon
Alambre	1	Cal: 14; 6 m	Thermo Resistencias
Cargador	1	5V	-
Swtich de perilla	1	ON/OFF	-
Controlador de temperatura	1	TCN4S	-
Botón de chispa	1	Metálico	Thermo Resistencias

8 Proceso de construcción

La construcción se lleva a cabo por medio de las siguientes grandes etapas:

- Etapa 1: Construcción de elementos base
 - Fase 1: Rollado y soldado de láminas
 - Fase 2: Implementación de bridas
 - Fase 3: Salida de los gases de combustión
 - Fase 4: Alineación y ajuste de sellos
- Etapa 2: Pruebas que concluyen en el sistema de gas
 - Fase 1: Pruebas con diferentes diámetros de tubos, diámetros de agujeros y paso de agujeros.
 - Fase 2: Construcción de las flautas
 - Fase 3: Implementación del sistema de redistribución de gas
 - Fase 4: Pruebas del comportamiento del sistema de flautas de gas en un sistema cerrado
 - Fase 5: Implementación de un sistema de aire forzado
 - Fase 6: Verificación y pruebas finales
- Etapa 3: Desarrollo de elementos estructurales
 - Fase 1: Revisión del modelo en el software SolidWorks
 - Fase 2: Construcción del bastidor
- Etapa 4: Implementación del sistema de seguridad (aislamiento y control)
 - Fase 1: Adecuación del sistema de aislamiento
 - Fase 2: Implementación del sistema de encendido automático y manual
 - Fase 3: Adecuación del sistema de recopilación de datos de temperatura

- Etapa 5: Implementación y ajuste del sistema de condensación
 - Fase 1: Adecuación del reactor al sistema de condensación

8.1 Construcción de elementos base

Fase 1: Se realiza la compra una lámina de acero inoxidable 304 calibre 12 la cual es rollada con las dimensiones anteriormente definidas, además, se realizó el corte con láser de la tapa inferior en otro trozo de lámina y se transportaron hacia la Universidad Industrial de Santander en donde el técnico Henry Cruz encargado del taller de estudiantes 103 de la escuela de ingeniería mecánica, realiza el trabajo de soldadura, una vez se obtiene el reactor construido se realiza el mismo proceso para la construcción de la carcasa del reactor con una lámina calibre 12 de acero al carbono (*hot rolled*) y en este caso se aplicó una soldadura tipo mig.



Figura 42. Reactor de acero inoxidable 304



Figura 43. Camisa externa del reactor de acero al carbono HR.

Fase 2: Para la implementación del sistema de bridas se utiliza material de un proyecto de grado que se encontraba almacenado y sin uso en el laboratorio de combustión 314 de la escuela

de ingeniería mecánica, que consiste en un condensador en acero inoxidable que poseía dimensiones similares al diámetro del reactor, se realizó el corte de dichas bridas para posteriormente ser soldadas al reactor y al anillo superior de la camisa externa del reactor.

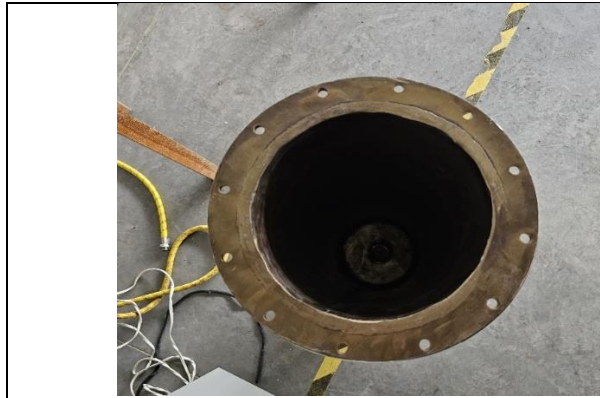


Figura 44. Brida del reactor



Figura 45. Brida del cascarón

Fase 3: La salida de los gases se realizó por medio de unas aberturas a la parte superior de la carcasa del reactor, así como también un par de aberturas al anillo. En primer lugar, se establece una configuración donde las aberturas se daban de manera continua en donde se pudo apreciar que los gases de combustión no fluían hacia las salidas, lo cual ocasionaba que las flautas de gas se comenzaran ahogar producto de la deficiencia de oxígeno, haciendo necesario girar el anillo obteniendo así 4 salidas para los gases de combustión y con esta configuración se obtuvo un mejor comportamiento de salida de los gases, siendo esta la configuración final.

Las dimensiones de estos agujeros se obtienen por medio del cálculo de los flujos máxicos totales generados por las flautas de gas, calculados en el ítem 5.1, de igual manera, estimando un área a partir de los agujeros realizados en la parte inferior del cuerpo externo del reactor y el área y cantidad de agujeros de los quemadores.



Figura 46. Primera configuración para la salida de los gases de combustión.



Figura 47. Configuración final para la salida de los gases de combustión.

Fase 4: El proceso de alineación y ajuste de sellos se realizó por medio de forjado de las bridas respecto la tapa del reactor, ya que se debe garantizar la hermeticidad del proceso para posteriormente montar la tapa en el torno para su proceso de rectificado.



Figura 48. Configuración de bridas

8.2 Pruebas y construcción de flautas de gas

A partir de la información recopilada en los establecimientos dedicados a la manufactura y venta de implementos para hornos de gas en Bucaramanga, se realiza la compra de tubos de 1 ½” y 1 5/8” de diámetro externo y para cada tubo se realizan agujeros con una broca de 1.5 mm y paso entre agujeros de 15 veces el diámetro del agujero con ayuda de un taladro de árbol en el

taller 102 de la escuela de ingeniería mecánica en la Universidad Industrial de Santander bajo la supervisión de técnico Cesar. Acto seguido, se repasaron los huecos con una broca de 2mm, lo que redujo el paso entre agujeros a 11.25 veces el diámetro del agujero y finalmente se repasaron una última vez con una broca de 2.5 mm lo que redujo el paso entre agujeros a 9 veces el diámetro del agujero, de estas pruebas se obtuvieron los siguientes resultados.

- Para tubería de 1 ½”
 - Φ agujero de 1.5 mm y paso entre agujeros de 15Φ aguj: Los agujeros de la parte superior no alcanzaban a recibir la mezcla aire-gas por lo tanto no encendían
 - Φ agujero de 2 mm y paso entre agujeros de 11.25Φ aguj: Llama con excesiva curvatura en el extremo y longitud de llama de 3cm.
 - Φ agujero de 2.5 mm y paso entre agujeros de 9Φ aguj: Longitud de llama máxima de 1.5 cm con deficiencia de oxígeno en el extremo ya que se robaban oxígeno entre agujeros.

- Para tubería de 1 5/8”
 - Φ agujero de 1.5 mm y paso entre agujeros de 15Φ aguj: Desde los agujeros del centro de la flauta presentaba problemas y los agujeros de la parte superior no alcanzaban a recibir la mezcla aire-gas por lo tanto no encendían.
 - Φ agujero de 2 mm y paso entre agujeros de 11.25Φ aguj: Llama controlada, con ligera curvatura en el extremo y longitud de llama de 2.5cm.
 - Φ agujero de 2.5 mm y paso entre agujeros de 9Φ aguj: Longitud de llama máxima de 1.8 cm con deficiencia de oxígeno en el extremo ya que se robaban oxígeno entre agujeros.

A partir de estas pruebas se decidió proceder con la elaboración de las flautas de gas con tubería de 1 5/8" de diámetro externo, longitud de 80cm, diámetro de agujero de 2 milímetros y paso entre agujeros de 11.25 veces el diámetro del agujero.



Figura 49. Prototipo de flautas

Fase 2: Para la construcción de las flautas se cortaron 4 tubos de 80 centímetros de longitud de 1 5/8" de diámetro externo por medio de una sierra, acto seguido se procedió a soldar un tramo de 4.5 cm de longitud de un angula de 1x1x1/8" en la parte inferior de las flautas, al cual se le realizan dos agujeros por medio de un taladro mecánico con una broca de 1/4", finalmente se realiza la perforación de los agujeros con las medidas anteriormente determinadas en el ítem 3.2.2 para ajustar las bujías por medio de tornillos, haciéndolas encajar en los agujeros realizados al ángulo, cabe resaltar que la medida de la altura del perfil lo determinó la bujía, ya que esta se ubica en el primer agujero de la flauta.



Figura 50. Flautas finales con sus correspondientes bujías

Fase 3: El sistema de distribución de gas se realizó por medio de un sistema flexible de gas que se compone de mangueras, válvulas, uniones roscadas y tubos Venturi. Para ello, se ajustaron los tubos Venturi a las flautas por medio de una unión roscada soldada en la parte inferior de la flauta de esta manera la flauta ingresa al cascarón del reactor y se ubica concéntrica con el agujero ubicado en el fondo del tanque, en este punto se ingresa el tubo Venturi de manera roscada por fuera de la carcasa del reactor y se ajustan las flautas para que queden con los agujeros en dirección del reactor.

Acto seguido, se ajustan las válvulas de gas por medio de la ventilas y se aseguran con tornillos finalmente, se conectan las mangueras una unión roscada en común ubicada el centro de las conexiones y se conecta la manguera de abastecimiento por la parte inferior.



Figura 51. Sistema flexible de distribución de gas

Fase 4: A partir de la realización de pruebas del sistema en un recinto cerrado se pudo apreciar un comportamiento inusual de las flautas en comparación al obtenido en las pruebas realizadas en un recinto abierto, por lo cual fue necesario realizar unas aperturas a la carcasa del reactor por la superficie interior, esto permitiría una mayor entrada de aire al sistema, lo que favoreció en gran medida la estabilidad de las llamas ya que permitió que una tercera flauta encendiera y se mantuviese funcional, sin embargo, fue necesario la implementación de un sistema de aire forzado para lograr el encendido de la cuarta flauta.

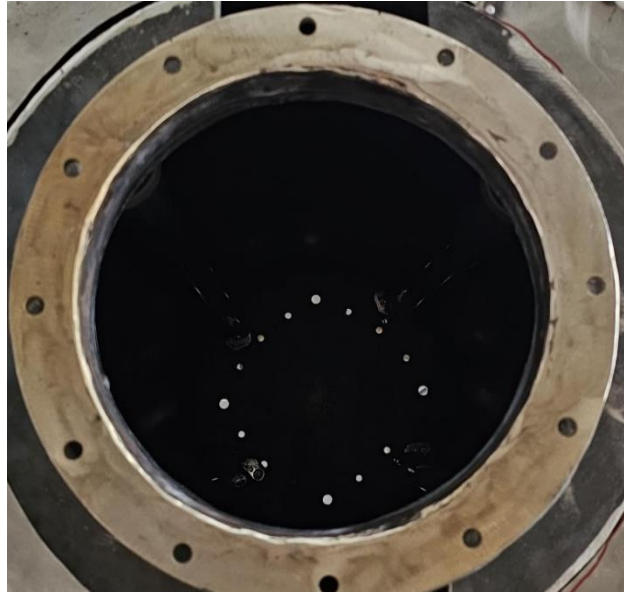


Figura 52. Configuración de agujeros favoreciendo el paso del aire por convección natural.

Fase 5: La implementación del sistema de aire forzado consta de dos ventiladores conectados en paralelo a partir de los cuales se transporta el flujo de aire por medio de mangueras e ingresa a la carcasa del reactor por medio de unos acoples roscados ubicadas en la parte inferior, justo a 2 centímetros de distancia de cada flauta.

Fase 6: Una vez logrado el encendido de las flautas y mantener estable el proceso de calentamiento, se realizaron pruebas que permitieron conocer parámetros como la temperatura máxima alcanzada, el tiempo que tarda en regularse dicha temperatura y la velocidad de calentamiento, para de esta manera dar paso a la implementación del sistema de aislamiento.



Figura 53. Prueba de calentamiento en vacío del reactor #2



Figura 54. Prueba de calentamiento en vacío del reactor #1

8.3 Desarrollo de elementos estructurales

Fase 1: Para la implementación del bastidor se realizó en primer lugar el diseño en el SolidWorks, para dos tipos de ángulos, el primero de ellos a partir de ángulos de 1 ¼”, y se obtuvo un factor de seguridad de 1.87 para un peso aproximado de 80 kilogramos, acto seguido se realizó la simulación para un bastidor llevado a cabo con perfiles de ángulo de 1 ½”, para lo cual se obtuvo un factor de seguridad de 2.41, sin embargo, puesto que el peso de la estructura está soportado sobre la superficie inferior, se optó finalmente por utilizar ángulo de 1 ¼” para los elementos que no iban a soportar mayores cargas y reforzar la superficie inferior con ángulo de 1 ½”, siguiendo los parámetros de diseño recomendados para factores de seguridad mayores o igual 2.

Fase 2: La construcción del bastidor se realizó en el taller 103 de metalistería por medio de perfiles unidos con soldadura, la base se encuentra a una altura de 30cm desde el piso y sus cuadrados son de 50 x 50 cm.



Figura 55. Bastidor construido

8.4 Implementación del sistema de seguridad (aislamiento y control)

Fase 1: Para la adecuación del sistema de aislamiento se implementó una capa de dos materiales diferentes, en primer lugar, una capa de lana de vidrio con un espesor de 8 centímetros, acto seguido se implementó una capa de material aislante thermolon de 7 centímetros para finalmente aislar el sistema por medio de dos tramos de lámina de acero calibre 22 unidos por tornillos M8x3, esto permitió evitar el contacto directo del operario con el material aislante que produce irritación.



Figura 56. Implementación del sistema de aislamiento

Fase 2: El sistema de encendido se realizó por medio de un sistema manual y un sistema automático, la finalidad de estos dos sistemas es mantener en todo momento el sistema de flautas de gas encendidas evitando la acumulación de gas en la recámara lo que podría llegar a poner en riesgo el dispositivo y quién lo opera.

El sistema manual consiste en un botón que sobresale en el sistema de control ubicado en la parte lateral derecha del dispositivo, y el propósito es generar el primer encendido del dispositivo, una vez las flautas se gas se encuentren en funcionamiento, se activa el sistema automático por medio del cambio de posición de un switch ON/OFF, de esta manera se genera una chispa que se genera por 3 segundos cada 10 segundos.

Fase 3: El sistema de recolección de datos de temperatura se realizó por medio de una termocupla tipo K conectada a un controlador de temperatura ubicado en el panel de control, a partir de este sistema se puede conocer la temperatura de los gases de pirólisis que salen del reactor e ingresan al condensador, asegurándose que la temperatura del proceso se encuentre entre los 400 y 650°C donde ocurre el proceso de pirólisis.

8.5 Implementación y ajuste del sistema de condensación

Fase 1: La adecuación del sistema de condensación se realizó por medio de un sistema flexible de mangueras, en donde se inducen los gases de pirólisis al intercambiador de calor de casco y tubos enfriado por agua por medio de la parte superior, allí, los gases pasan a través de los de los tubos y se induce un flujo de agua a menor temperatura a contra flujo, generando la condensación de los gases de pirólisis para su posterior almacenamiento en un recoge lodos ubicados en la parte inferior del condensador.

El agua utilizada para la condensación de estos gases de pirólisis se introduce a una torre de enfriamiento, para su posterior reutilización por medio del sistema cerrado de enfriamiento.

Este sistema de condensación ya se encontraba construido en el laboratorio de sistemas térmicos de la universidad industrial de Santander, por lo cual se recomienda para futuros proyectos el diseño de un sistema de condensación específicamente para este dispositivo a partir del análisis de flujos másicos que aumente la eficiencia y evite la salida de gases condensables.



Figura 57. Sistema completo

9 Puesta en marcha y resultados

9.1 Apreciaciones a partir de la puesta en marcha

A partir de las pruebas realizadas se pudieron realizar las siguientes apreciaciones:

- Reactor
 - Durante el proceso transitorio, el cual tuvo una duración de 25 minutos se obtuvo la degradación térmica de 750 gramos del total de los neumáticos fuera de uso, resaltando la zona superior del reactor y la más cercana a las paredes, obteniendo así 500 ml de producto pirolítico.
 - Se evidenció un comportamiento óptimo por parte del reactor y su estructura, soportando las altas temperatura sin sufrir ningún tipo de deformación o problemas de tipo estructural como grietas, fisuras o abolladuras, de igual manera se garantizó la hermeticidad durante el proceso evitando la combustión de los neumáticos fuera de uso debido a la presencia de oxígeno al interior del reactor.
 - A partir de la prueba realizada, se realiza una proyección de condensado, para lo cual se obtiene entre 5.83 y 6 litros de aceite pirolítico a partir de la degradación de 10 kilogramos de los neumáticos fuera de uso (NFU) lo que equivale a un rendimiento del líquido entre 48 y 49.5%. Por otra parte, los gases no condensables quemados son el equivalente entre 14.5 y 18% de la cantidad en masa degradada.
 - Si el proceso se realizara de manera lineal, el tiempo para llevar a cabo el proceso de pirólisis para los 10 kilogramos de masa sería de 5.55 horas, esto debido al gradiente de temperatura al interior del reactor entre la masa de los NFU en contacto directo con la superficie y la que se encontraba en el centro del reactor.

- Se observa un gradiente térmico de manera radial y longitud, en donde se aprecian 3 zonas de temperatura de manera longitudinal, en la parte superior una zona de mayor temperatura debido a la acumulación de gases de combustión producto de la ubicación de las salidas, una zona de temperatura intermedia en el centro del reactor y una zona de menor temperatura en la zona baja del reactor. De manera radial las zonas de mayor temperatura corresponden a las más cercanas de la superficie y las de menor temperatura hacia el centro del reactor.
- Suministro de energía
 - El suministro de energía permitió llevar a cabo el proceso de calentamiento y degradación térmica de los neumáticos fuera de uso, en donde la temperatura más alta alcanzada fue alrededor de 640°C en un lapso de 25 minutos de operación, esta temperatura se logró en los NFU más cercanos a la superficie del reactor, esto se puede evidenciar en la obtención de líquido pirolítico y la quema de los gases no condensables, como se aprecia en las figuras 58 y 59.



Figura 58. Aceite pirolítico



Figura 59. Quema de gases no condensables

- Se pudo observar un mal comportamiento del cuarto quemador, lo que se puede deber a una deficiencia del aire secundario suministrado o una variación en la

presión de suministro en la toma de gas entre los laboratorios de sistemas térmicos de la escuela de ingeniería mecánica 117 y el laboratorio de combustión 314, dificultando la combustión del cuarto quemador.

Se realiza una comprobación de los caudales entregados por los ventiladores y se puede observar que dada las velocidades y las áreas de estos, los caudales entregados son suficientes para suplir la demanda de aire en los quemadores como se observa en la siguiente tabla

Tabla 17. Caudal ventiladores

	Velocidad promedio m/s	Área de flujo m ²	Caudal m ³ /h	Caudal necesario
Ventilador 1	18	3,1415E-4	36,36	30 m³/h
Ventilador 2	21	7,9173E-4	59,85	

9.2 Cálculo energético de los elementos

El consumo energético de los subsistemas se calcula a partir del consumo de cada elemento conectado para llevar a cabo el funcionamiento del dispositivo y se calcula a partir de las fichas técnicas de las mismas.

En primer lugar, la bomba y el ventilador requeridas para el funcionamiento de la torre de enfriamiento tuvieron un consumo energético de:



Figura 60. Ficha técnica bomba de la torre de enfriamiento.



Figura 61. Ficha técnica ventilador de la torre de enfriamiento

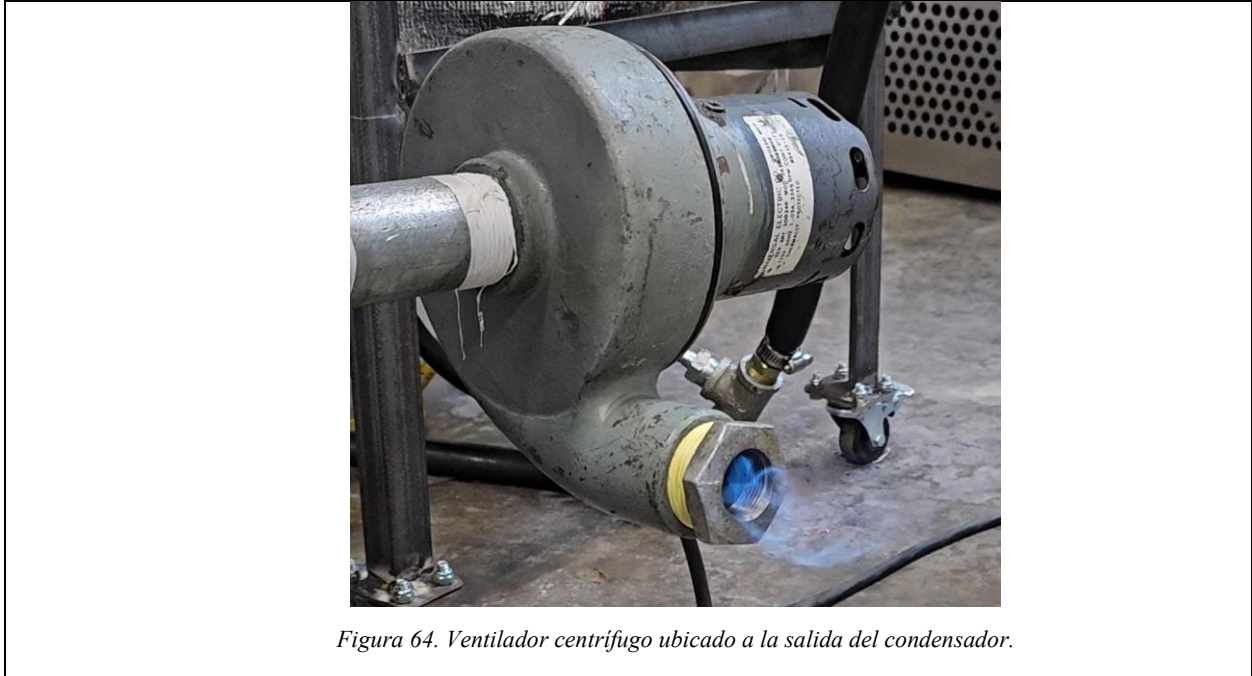
$$P_{\text{eléctrica_bomba}} = \frac{P_{\text{nominal}}}{\eta} \quad (37)$$

$$P_{\text{eléctrica_bomba}} = \frac{1.0 * 3450}{0.611} = 5646.48 \text{ [W]}$$

$$P_{\text{eléctrica_ventilador}} = 102 \text{ [W]}$$

Para un tiempo de 5.55 horas, la energía consumida es de 31.904 [kWh].

Así mismo, para los ventiladores (3) conectados para el sistema de suministro secundario y salida de los gases no condensables.



En cuanto a la potencia del último ventilador, se tiene que esta se calcula por medio de:

$$P_{el\acute{e}ctrica_ventilador} = V * I * \cos\varphi \quad (##)$$

$$P_{el\acute{e}ctrica_ventilador} = 115 * 1.03 * 0.85 = 100.6825 [W]$$

Para un tiempo de 5.55 horas la energí consumida es de 0.55879 [kWh]

Finalmente, el módulo de las bujías cuya ficha técnica es la siguiente consume una potencia eléctrica de:



Figura 65. Ficha técnica módulo de bujías.

$$P_{\text{eléctrica}_{\text{módulo-bujías}}} = S * FP \quad (38)$$

El consumo de potencia aparente corresponde a 0.6-8.5VA, por lo cual existe un intervalo de valores de potencia real, así mismo, se debe asumir un factor de potencia (FP) que para este tipo de módulos es de 0.9 aproximadamente ya que maneja cargas inductivas pequeñas.

Por lo cual se tiene que la potencia eléctrica del ventilador corresponde a valores entre 0.54 y 7.65 [W], para efectos prácticos se estima el valor mayor y además se estima que no está conectado las 5.55 horas del proceso, sino, un tiempo estimado de 1.28 horas. Obteniendo así un consumo energético de 9.792 [Wh].

De modo que la energía total consumida por todos los componentes utilizados para llevar a cabo el proceso de degradación térmica de los 10 kilogramos de neumáticos fuera de uso es de 37.1624 [kW]. Además, la energía consumida por parte del sistema de quemadores es de 22.756 [kW], obteniendo como resultado un total de energía consumida de **59.9184 kWh**.

9.3 Cálculo del desempeño del reactor

El cálculo del desempeño de reactor se realiza a partir de la energía de los productos obtenidos y la energía necesaria para llevar a cabo el proceso.

De esta manera, se obtiene que la eficiencia del proceso es:

$$\eta = \frac{\text{energía en los productos}}{\text{energía consumida}} \quad (39)$$

En donde la energía aprovechable de los productos obtenidos está conformada por el aceite, gas y carbón en su porcentaje.

Para este caso se tiene que:

Tabla 18. Resumen de composición de compuestos de pirólisis.

	Fracción en masa [%]	PCI
Aceite	48 – 49.5	42 [MJ/kg]
Gas	14.5 – 18	33 [MJ/Nm ³]
Carbón	32.5 – 37.5	28 [MJ/kg]

Por lo tanto, la energía aprovechable de los productos es:

$$\text{Aceite: } (\text{Fracción en masa} * \text{Masa total} * \text{PCI}) = 0.48 * 10 * 42 = 201.6 \text{ [MJ]}$$

$$\text{Gas: } \left(\frac{\text{Fracción en masa} * \text{Masa total} * \text{PCI}}{\text{Densidad}} \right) = \frac{0.145 * 10 * 33}{1.2} = 39.875 \text{ [MJ]}$$

$$\text{Carbón: } (\text{Fracción en masa} * \text{Masa total} * \text{PCI}) = 0.325 * 10 * 28 = 91 \text{ [MJ]}$$

En cuanto a la energía consumida, es la suma de la energía necesaria para llevar a cabo el proceso y la propia de los neumáticos fuera de uso. En donde, la energía utilizada para el proceso es de 215,70624 [MJ] y la propia de los NFU se obtiene a partir del poder calorífico inferior, el cual corresponde a 37 [MJ/kg] y la cantidad total de masa introducida en el reactor en este caso 10kg.

$$\eta = \frac{201.6 + 39.875 + 91}{215.70624 + (37 * 10)} * 100 = 56.76\%$$

10 Conclusiones

- A partir del desarrollo del reactor de pirólisis con capacidad de 10 kg/h destinado al procesamiento de neumáticos fuera de uso se aprecia un desempeño óptimo de manera estructural como en su capacidad de operación, logrando la degradación de 750 gramos de los neumáticos fuera de uso durante el proceso transitorio en un tiempo de 25 minutos, en donde fue necesario parar el proceso debido a una falla en el sistema de aislamiento. A partir de la proyección lineal realizada se estima un tiempo total de proceso de 5.55 horas debido al gradiente térmico del lecho de manera radial y longitud, por lo cual la implementación de un sistema de mezclado reduciría en gran medida este tiempo.
- La implementación del sistema de suministro de energía fue suficiente para llevar a cabo el proceso de pirólisis alcanzado una temperatura de 640°C en las zonas cercanas a las paredes del reactor, sin embargo, se observa un mal comportamiento en el funcionamiento de un cuarto quemador debido a irregularidades en el sistema de suministro de aire que afectan la estabilidad de la combustión de los quemadores, aumentando el tiempo del proceso de pirólisis.
- Por medio de los productos obtenidos y el consumo energético del sistema se obtiene una eficiencia energética del proceso de 56.76%, lo que representa la energía útil en relación al consumo del proceso de pirólisis con un valor de 59.9184 kWh, lo que evidencia el potencial del proceso como una solución viable para la gestión de residuos sólidos.

11 Recomendaciones

- Se recomienda mejorar el sistema de aislamiento a partir de lana de roca o material refractario, esto con el fin de reducir las pérdidas de energía a través del área superficial del cuerpo externo del reactor, favoreciendo una mayor concentración de energía en el interior del reactor.
- Implementar un sistema de aire secundario a partir de un ventilador de mayor capacidad a la determinada en el ítem 5.1 con el fin de evitar los problemas presentados debido a la posible deficiencia de oxígeno de la cuarta flauta de gas, estabilizando el suministro de energía.
- Se recomienda implementar un sistema de agitación que disminuya el gradiente de temperatura al interior del reactor, disminuyendo así el tiempo del proceso y una degradación uniforme de la materia a pirolizar.
- Analizar la implementación de un ventilador que fuerce los gases de condensación hacia la entrada del intercambiador de calor, evitando así una menor precipitación en los tubos, recolectando una mayor cantidad de producto líquido.
- Evitar los cambios drásticos de temperatura una vez terminadas las pruebas que puedan producir grietas, abolladuras o fisuras los elementos estructurales, favoreciendo una mejor preservación de los componentes.
- Realizar una inspección periódica de elementos críticos como el reactor, las bujías, las conexiones de gas y el sistema automático de encendido de las bujías.

Referencias

Congreso de la República de Colombia. (1979). Ley 11 del 5 de marzo de 1979 “Por la cual se reconoce la profesión de bibliotecólogo y se reglamenta su ejercicio”.

Bogotá: El Congreso.

Çengel, Y. (s.f.). Transferencia de calor y masa (4a ed.).

EcoGreen. (2021). Impactos ambientales de la eliminación de llantas de desecho.

Recuperado de <https://ecogreenequipment.com/es/environmental-impacts-of-waste-tire-disposal/>

Gobierno de Mendoza. (2021). El Ambiente recuerda que está prohibido quemar neumáticos.

Recuperado de <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/ambiente-recuerda-que-esta-prohibida-la-quema-de-neumaticos-para-combatir-las-heladas>

Handbook of Heat Transfer. (s.f.). Rohsenow, W., Hartnett, J., & Cho, Y. (3a ed.).

McGraw-Hill.

Kumar, A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2009). Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology. *Energies*, 2(3), 556-581.

<https://doi.org/10.3390/en2030556>

Mejía, S., & Upegui, S. (2021). La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria: Una revisión.

Cuaderno Activa, 13, 41-60.

Merchan, S. (s.f.). Estimación del potencial del caucho de llantas para la producción de gases combustibles mediante gasificación usando O₂.

Michelin. (s.f.). Tiempo estimado de duración de llantas.

Recuperado de <https://www.michelin.com.co/auto/consejos/cambiar-llantas/cuanto-duran-las-llantas>

Müfide, B., Vildan, A., Aysun, O., Zerrin, Ç., & Özlem, O. (2012). Characterization of pyrolytic oil obtained from pyrolysis of TDF (Tire Derived Fuel).

Energy Conversion and Management, 62, 22–30.

National Geographic. (2019). Los neumáticos son una gran fuente de contaminación por plástico.

Recuperado de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/09/neumaticos-gran-fuente-contaminacion-plastico>

Nkosi, N., et al. (2020). The development of a waste tyre pyrolysis production plant business model for the Gauteng region, South Africa.

Norton, R. (s.f.). Diseño de máquinas (4a ed.).

Ochoa, A., & Mahecha, D. (s.f.). Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas.

Parr Company. (s.f.). Lecho fluidizado de pirólisis.

Recuperado de <https://www.parrinst.com/es/products/tubular-reactor-systems/fluidized-bed-reactors>

Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). (2012). Pirólisis: Un proceso para derretir la biomasa. Revista de Química, 26, 37-40.

Reventón Energético. (2014). Reactores de lecho fluidizado y burbujeante.

Revista UIS, 12, 35-45. Recuperado de

<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/4789/4935>

Sánchez, D., et al. (2013). Waste tire rubber gasification using air steam for partial oxidation and N₂ as carrier gas. En Proceedings of ASME Turbo Expo 2013, San Antonio, Texas, USA.

Speight, J. G. (2016). The chemistry and technology of petroleum.

Tecam. (s.f.). Proceso de pirólisis: Descomposición química en ausencia de oxígeno.

Recuperado de <https://tecamgroup.com/es/valorizacion-de-residuos/pirolisis>

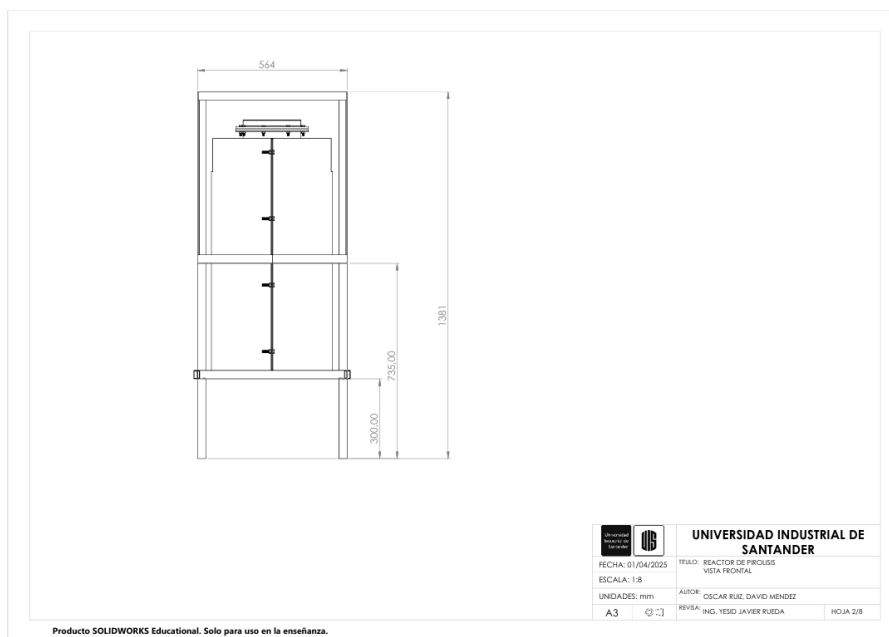
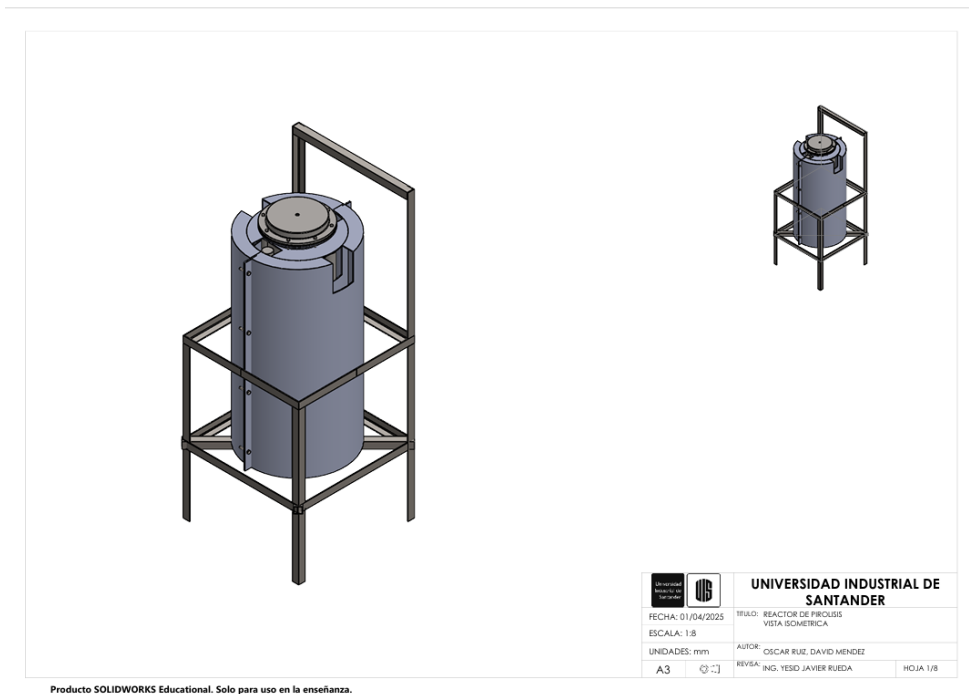
Wang, S. (2024). Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.

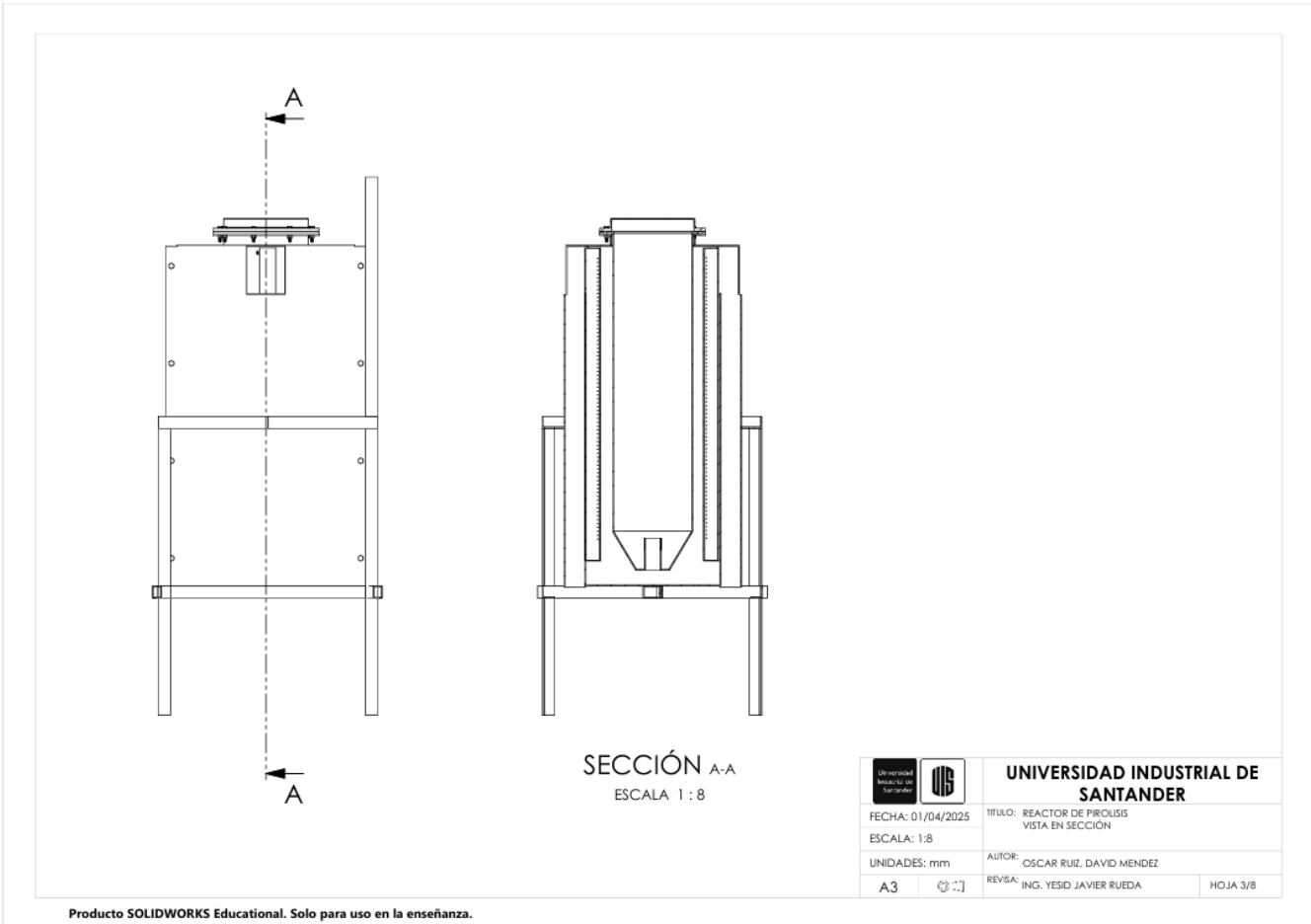
Wang, S. (2024). Journal of Analytical and Applied Pyrolysis o Bioresource Technology:
Renewable Energy.

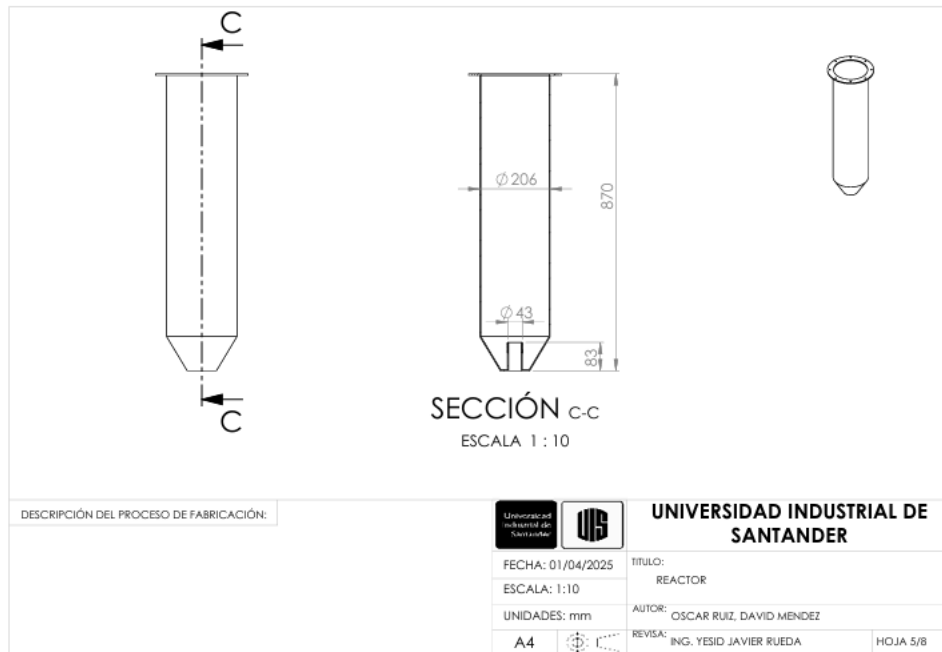
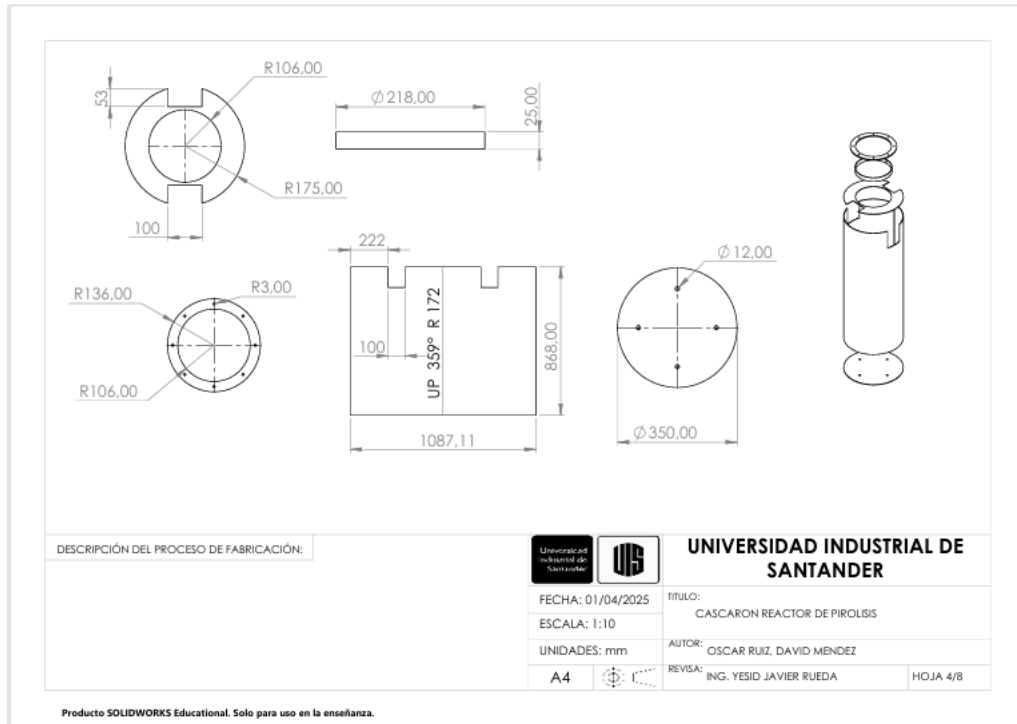
Apéndices

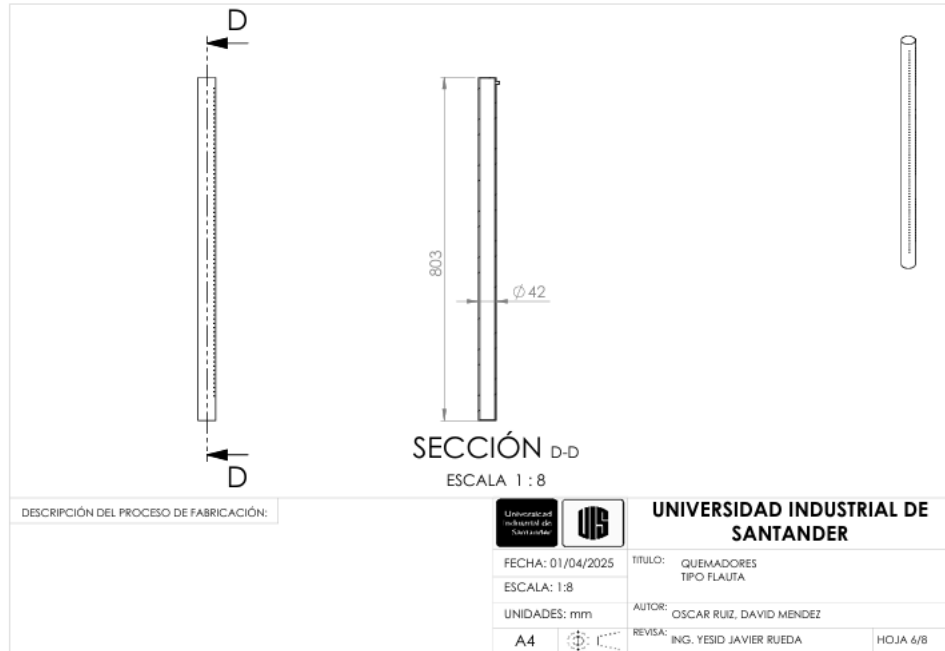
En la siguiente dirección URL puede encontrar el documento en Excel con los cálculos del proceso.

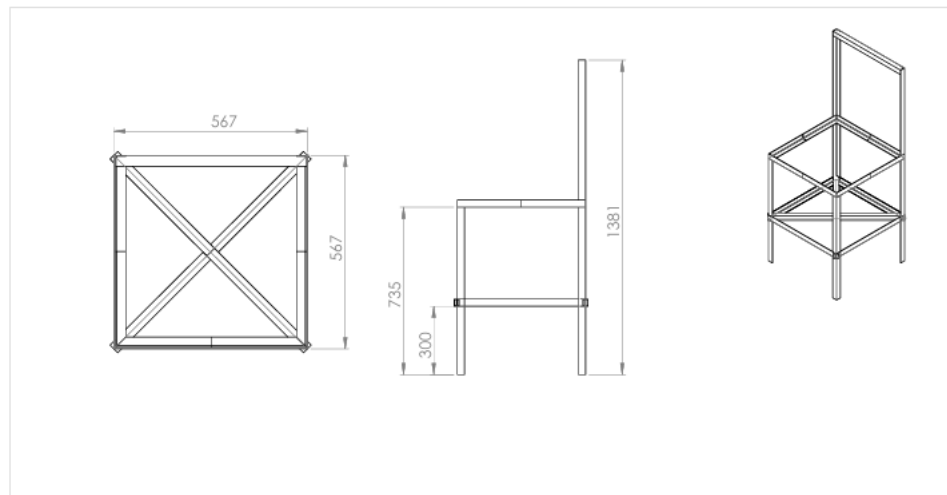
https://docs.google.com/spreadsheets/d/10EYxxqBFnWh8_J11Ou0LqH2Vo7jPYtDC/edit?usp=sharing&oid=112370227475770305810&rtpof=true&sd=true











DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:	  UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
	FECHA: 01/04/2025 TÍTULO: BASTIDOR SISTEMA ESCALA: 1:10 AUTOR: OSCAR RUIZ, DAVID MENDEZ UNIDADES: mm REVIS: ING. YESID JAVIER RUEDA
	A4  HOJA 8/8

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.