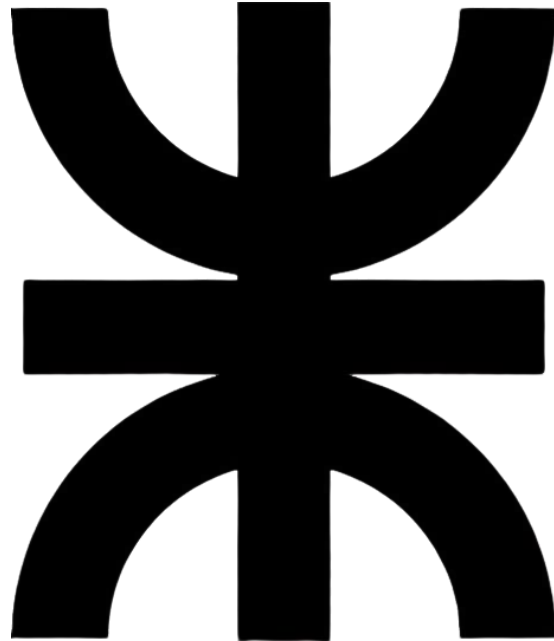


PROYECTO FINAL

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

Facultad Regional Villa María



INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN PIROLIZADOR

Mercedes Lozano Rus

Docentes:

Ing. Américo Di Cola

Ing. Marcelo Costamagna

Ing. Marcos Marino

VILLA MARÍA - 2023

Villa María, 21 de diciembre de 2023

En la mesa de examen del día de la fecha, la alumna Mercedes Lozano Rus presentó el Trabajo Final de Grado correspondiente a la carrera de Ingeniería Mecánica.

El Tribunal Examinador estuvo conformado por el Profesor Titular de la Cátedra Proyecto final, Ing. Américo Di Cola; el Profesor Jefe de Trabajos Prácticos, Ing. Marcelo Costamagna y por el Jefe de Departamento de Ingeniería Mecánica, Ing. Huber Fernández.

El Tribunal Examinador determinó que la alumna aprobó el examen con la siguiente calificación.....

Ing. Américo Di Cola

Ing. Marcelo Costamagna

Ing. Huber Fernández

Titular de Cátedra

Prof. Jefe de T. Prácticos

Jefe de Dpto. Ing. Mec.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a todos aquellos que han sido parte del proceso de elaboración de este proyecto final de grado. En especial, quiero destacar la invaluable orientación y guía brindada por los ingenieros de la cátedra, quienes con su experiencia y conocimiento contribuyeron de manera significativa en el desarrollo de este trabajo, además de su valiosa colaboración y por dedicar su tiempo a revisar y comentar cada una de las secciones de este documento, aportando sugerencias y mejoras que han permitido enriquecer el contenido y calidad del mismo.

También deseo agradecer a los ingenieros del Laboratorio de Materiales de la Universidad Tecnológica Nacional de la Facultad Regional Villa María, quienes no solo me proporcionado su apoyo en la realización del proyecto, sino que además estuvieron siempre dispuestos a colaborar y compartir sus conocimientos.

No puedo dejar de mencionar a mi familia y amigos, quienes me han apoyado en todo momento y me han brindado su motivación para seguir adelante. Sus palabras de aliento y comprensión han sido fundamentales para alcanzar este logro académico.

Quiero extender mi gratitud a Irish, quien me aportó su compañía y apoyo incondicional en el proceso, además de cumplir las horas de sueño que yo no pude.

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad por brindarme la oportunidad de desarrollar y fortalecer mis habilidades académicas, así como por fomentar en mí el amor por el conocimiento y la investigación.

A todos ellos, mi más profundo agradecimiento por haber sido parte de esta experiencia académica y por haberme manifestado su apoyo y confianza en todo momento.

Tabla de contenido

Agradecimientos	1
Resumen	5
Abstract	6
Introducción	7
PRIMERA PARTE: Presentación del proyecto	9
Capítulo 1: Pirólisis	10
1. Introducción	10
2. Datos históricos	13
3. Productos de pirólisis	14
3.1 Líquidos	14
3.2 Sólidos	14
3.3 Gases	15
4. Tipos de pirólisis	15
4.1 Pirólisis rápida	17
4.2 Pirólisis Flash	17
4.3 Pirólisis ultrarrápida	17
4.4 Pirólisis en presencia de un medio	18
5. Rendimiento del producto de pirólisis	18
5.1 Efecto de la temperatura de pirólisis	18
5.2 Efecto de la tasa de calentamiento	19
5.3 Efecto del tamaño de las partículas	20
6. Cinética de pirólisis	20
6.1 Aspectos físicos	20
6.2 Aspectos químicos	22
6.3 Modelos cinéticos de pirólisis	23
7. Reactor de pirólisis	24
7.1 Tipos de reactores	24
8. Transferencia de calor en un pirolizador	24
8.1 Efecto de transferencia de masa	25
8.2 ¿La pirólisis es autotérmica?	25
9. Tipos de pirolizadores	26
9.1 Pirolizador de lecho fijo	27
9.2 Pirolizador de lecho burbujeante	27
9.3 Pirolizador CFB	28
9.4 Pirolizador ultrarrápido	29
9.5 Pirolizador ablativo	29
9.6 Pirolizador de cono giratorio	30
9.7 Pirolizador de vacío	31

10. Consideraciones de diseño del pirolizador	32
10.1 Producción de líquido por pirólisis	32
11. Biochar	33
Capítulo 2: Plásticos	36
1. Aspectos generales	36
2. Antecedentes	37
3. Definición	37
4. Clasificación	38
4.1 Termoestables	38
4.2 Termoplásticos	38
5. Residuos plásticos	38
5.1 Producción de residuos plásticos	39
5.2 Gestión de los residuos plásticos	40
5.3 Situación actual de la gestión de residuos	44
6. Identificación de residuos plásticos	44
6.1 Polietileno	47
SEGUNDA PARTE: Diseño del pirolizador	51
Capítulo 3: Material y soldadura	52
1. Introducción	52
2. Material a utilizar	52
2.1 Acero inoxidable	52
2.2 Tipos de aceros inoxidables	53
2.3 Aceros inoxidables austeníticos	53
3. Soldadura	57
3.1 Técnicas de soldadura	58
3.2 Tipos de uniones	63
3.3 Tipos de soldadura según la forma geométrica	63
3.4 Verificación de la resistencia de la soldadura	64
Capítulo 4: Reactor	68
1. Entrada de alimentación	68
2. Partes y dimensionamiento del reactor	69
2.1 Dimensionamiento del reactor	70
2.2 Verificación del espesor	70
2.3 Cálculo sistema de cierre	73
3. Cálculo de engranaje y ejes	76
3.1 Cálculo de la potencia del motorreductor	78
3.2 Comprobación por la Norma ANSI/AGMA 2101-D04	86
3.3 Cálculo de la cadena	99
3.4 Cálculo de los ejes	105

4. Resultados de la simulación	117
4.1 Cargas y sujeciones	117
5. Cálculo de chaveta	121
6. Selección de rodamientos	124
7. Selección de aislante	125
7.1 Tipos de aislamientos térmicos	126
Capítulo 5: Ciclón	129
1. Principio de funcionamiento	129
2. Tipos de ciclones	130
2.1 Diseño del ciclón	132
Capítulo 6: Intercambiador de calor	138
1. Diseño y verificación en Excel	139
2. Circuito de agua	148
2.1 Cálculo de la pérdida de carga en el circuito de agua	148
2.2 Cálculo de la bomba de agua	153
3. Dinámica del fluido	156
4. Resultados del estudio	157
Capítulo 7: Estructura soporte de componentes	161
1. Factores a tener en cuenta en el proyecto	161
2. Análisis estructural	161
2.1 Conceptos fundamentales	161
2.2 Solicitaciones que soportan los elementos que componen las estructuras	162
2.3 Elementos estructurales	163
3. Cálculo estructural	163
4. Resultados del estudio	171
4.1 Cargas y sujeciones	171
Capítulo 8: Sistema de planimetría y codificación	174
1. Introducción	174
2. Sistema de codificación	174
Bibliografía	177
Anexo	179

Resumen

En el presente proyecto se ha diseñado un pirolizador prototipo para la producción de aceite pirolítico a partir de polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE), los cuales se obtienen de los residuos sólidos urbanos, dando de esta forma una solución para la problemática ambiental existente en la actualidad. El pirolizador consta de tres etapas principales: en primer lugar, un reactor, donde se produce la descomposición a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno de la materia prima transformándola en gas. Como segunda etapa, un ciclón, en el cual por efecto de fuerza centrífuga se separan las partículas del gas y, finalmente, un intercambiador de calor donde a distintas temperaturas se condensa, obteniéndose así, el aceite de pirólisis. Su diseño abarca todos los aspectos técnicos, de seguridad, ambiental y económicos que deben ser tenidos en cuenta para la fabricación del mismo.

Por lo dicho, este trabajo se basa en el diseño y dimensionamiento para la construcción de los elementos más relevantes del mismo como son el reactor, el ciclón, el intercambiador de calor y la estructura soporte de componentes.

Palabras claves: Pirólisis, residuos urbanos, diseño.

Abstract

In the present project, a prototype pyrolyzer has been designed for the production of pyrolytic oil from high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE), which are obtained from municipal solid waste, thus providing a solution to the environmental problems currently existing. The pyrolyzer consists of three main stages: first, a reactor, where the raw material decomposes at high temperatures and in the absence of oxygen, transforming it into gas. The second stage is a cyclone, in which the particles are separated from the gas by centrifugal force, and finally a heat exchanger where the pyrolysis oil is condensed at different temperatures, thus obtaining the pyrolysis oil. Its design includes all the technical, safety, environmental and economic aspects that must be taken into account for its manufacture.

Therefore, this work is based on the design and dimensioning for the construction of the most relevant elements such as the reactor, the cyclone, the heat exchanger and the components support structure.

Keywords: *Pyrolysis, urban waste, design.*

Introducción

El consumo de productos plásticos se ha incrementado progresivamente, debido principalmente a sus características físicas y su bajo costo, razones por las cuales han llegado a ser dominantes en el mercado. Sin embargo, esto ha dado lugar a una creciente generación de residuos poliméricos, a causa de que tienen una vida útil relativamente corta y, (al menos en su forma convencional), no son biodegradables ni compostables; ocasionan la acumulación de dichos residuos en el ambiente, con la consecuente reducción de vida útil de los rellenos sanitarios, su inadecuada clasificación es causa de contaminación en los recursos agua, suelo y aire; y aumenta la cantidad de recursos económicos para su tratamiento. Esto ha motivado la investigación y el desarrollo de alternativas para su valorización; como es el caso de la obtención de energía renovable y la reducción del consumo de recursos finitos (como son los combustibles derivados del petróleo), que ocasionan perjuicios crónicos al ambiente.

En busca de soluciones a esta problemática se han planteado diversas alternativas, entre las que se encuentran el reciclado mecánico, aprovechamiento energético y reciclado químico que incluye despolimerización, gasificación y pirólisis. De ellos, esta última presenta mayores ventajas sobre el reciclado mecánico, ya que permite ingresar al proceso todo tipo de plástico sin necesidad de caracterización incluso admite aquellos residuos plásticos cuya separación es inviable. Colomer define la pirólisis como un conjunto de reacciones químicas complejas donde se produce la descomposición térmica (comenzando con 250 °C hasta alrededor de 400 °C) de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, teniendo como resultado productos sólidos, líquidos y gaseosos.

El presente proyecto final -denominado *Diseño y construcción de un pirolizador prototipo*- se realiza con el propósito de desarrollar un pirolizador a escala con el cual generar combustible a partir de residuos plásticos. Se ha estructurado en dos partes: la primera, Presentación del proyecto y, la segunda, Diseño y construcción del pirolizador.

La parte PRESENTACIÓN DEL PROYECTO consta de dos capítulos.

En el Capítulo 1, se describe el *proceso de pirólisis*, su evolución en el tiempo y los países que fueron pioneros en su desarrollo. Se muestran los principales parámetros que influyen en dicho proceso, los productos obtenidos en el mismo, además de los reactores que pueden implementarse para llevar a cabo las reacciones pirolíticas; finalmente se da una explicación de las técnicas utilizadas para el análisis y la caracterización de la pirólisis.

En el Capítulo 2, se exhiben datos generales de producción de *residuos plásticos* y la problemática ambiental derivada de ello; mediante los antecedentes se da a conocer la historia del avance tecnológico en la producción de plásticos, se continua con la

definición y clasificación de plásticos, para luego enfocar el tema de residuos plásticos y su gestión, planteando también las técnicas más usadas para el aprovechamiento y valorización de residuos plásticos. Finalmente se detalla el sistema de codificación para la identificación de residuos plásticos presentado en la Norma ISO 11469:2016 (Identificación genérica y marcado de productos plásticos).

La parte DISEÑO DEL PIROLIZADOR consta de seis capítulos.

En el Capítulo 3 se caracteriza el *material* a utilizar en el reactor, el ciclón y el intercambiador de calor, además del tipo de *soldadura* que se realizará.

El Capítulo 4, abarca la metodología aplicada en este proyecto para el diseño del *reactor*. Incluye el dimensionamiento de los ejes, selección de los rodamientos, cálculo del engranaje y la selección del aislante que se implementará.

En el Capítulo 5 se define el *ciclón*, desde el material a utilizar hasta el tipo de soldadura a realizar.

En el Capítulo 6 se dimensionan las partes que conforman el *intercambiador de calor* y se establecen los aspectos estáticos (arreglo de tubos, distancias entre bafles) y dinámicos (sentidos de circulación de fluidos) que las relacionan. Se efectúa el cálculo de rendimiento del equipo; además, se determinará la pérdida de carga del circuito de agua y se buscará la bomba para el abastecimiento del mismo.

En el Capítulo 7, una vez realizado todo el dimensionamiento anterior, se realiza un cálculo estático para dimensionar la *estructura* donde se dispondrá el pirolizador.

Finalmente, en el Capítulo 8 se presenta un *sistema de codificación* de planos.

El Anexo incluye los *planos* relacionados con este proyecto.

PRIMERA PARTE:

Presentación del proyecto

Capítulo 1: Pirólisis

1. Introducción

La pirólisis es una descomposición termoquímica de la biomasa en una gama de productos útiles, ya sea en ausencia total de agentes oxidantes o con un suministro limitado de ellos. Durante la pirólisis, las grandes moléculas de hidrocarburos de biomasa se descomponen en moléculas más pequeñas y más simples de gas, líquido y char (Figura 1). La pirólisis se lleva a cabo típicamente en un rango de temperatura de 300-650 °C.

La misma implica el calentamiento rápido de biomasa u otro material en ausencia de aire u oxígeno a una temperatura máxima, conocida como temperatura de pirólisis, y mantenerla allí durante un tiempo específico para producir gases no condensables, carbón sólido y producto líquido.

Los vapores condensables y no condensables liberados de la biomasa salen de la cámara, mientras que el carbón sólido producido permanece parte en la cámara y parte en el gas. El carbón puede recolectarse como un producto comercial. El gas no condensable puede reciclarse en el reactor, ya que el mismo es libre de oxígeno. El vapor condensable se condensa como bioaceite o aceite de pirólisis. El producto líquido es de interés primordial en la pirólisis.

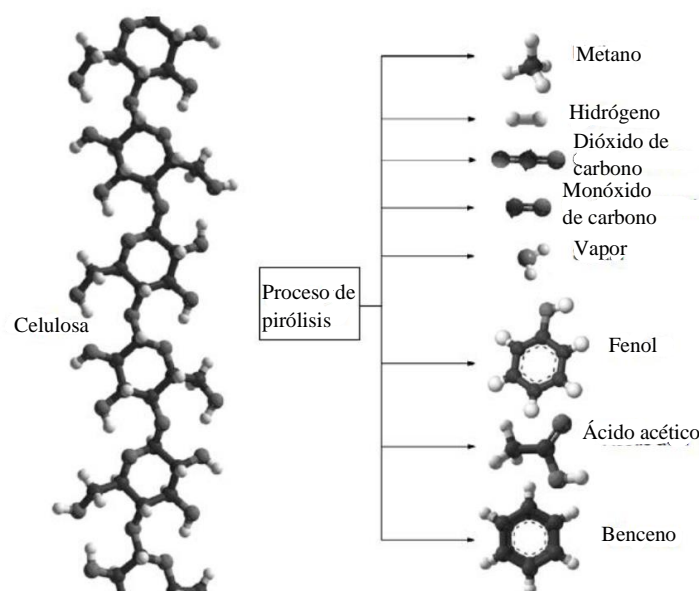


Figura 1 Proceso de descomposición de una molécula de hidrocarburo durante la pirólisis

En la Figura 2 se esquematizan los diversos fenómenos que intervienen en un proceso de pirólisis. Este es un proceso complejo; de modo simplificado, consiste en la descomposición de sólido a través de reacciones primarias cuyos productos resultantes pueden degradarse al sufrir reacciones secundarias (Como el caso del craqueo de volátiles). Las proporciones y características de ambos productos, primarios y secundarios, son función de las condiciones en las que transcurre el proceso.

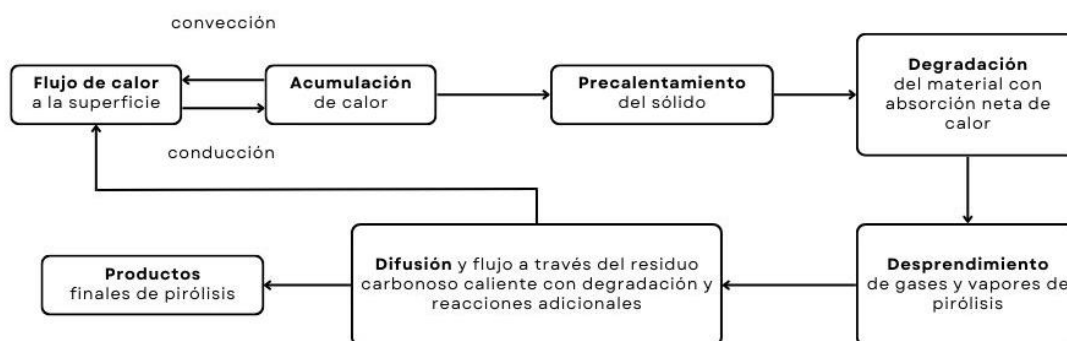


Figura 2 Proceso de pirólisis

Los parámetros que influyen en la composición y rendimiento de los productos químicos resultantes de un proceso de pirólisis son muy diversos. Entre ellos cabe destacar:

- La *composición* de la materia a pirolizar, tanto por la contribución de cada elemento al total (análisis elemental), como por la estructura de la materia, es decir, moléculas, enlaces químicos, etc.
- La *temperatura*, que es una variable fundamental del proceso. Por un lado, favorece la rotura de moléculas complejas para dar lugar a otras más sencillas (craqueo térmico), lo que implica normalmente un aumento de la producción de gas frente a la disminución del rendimiento de líquidos y sólidos. Por otro lado, promueve también las reacciones de ciclación de moléculas aromáticas para dar lugar a estructuras más grandes (pirosíntesis).
- Las elevadas temperaturas, mayores a 600°C, dan lugar a pequeñas moléculas gaseosas simples; mientras que los productos líquidos más viscosos, se producen a temperaturas menores a 400°C (temperaturas bajas) y a presiones más altas. En la mayoría de los plásticos, el proceso de pirólisis inicia alrededor de los 300°C, aunque para algunas resinas termosensibles el proceso puede iniciar antes; también la presencia de aditivos (estabilizantes, plastificantes y pigmentos) influye en el inicio de la reacción. Por lo general, se selecciona una temperatura media entre 400°C a 500°C para el proceso.

- La *humedad* está indirectamente relacionada con la temperatura, puesto que el calor destinado a la evaporación del agua de la muestra provoca que la pirólisis se realice a una temperatura menor de la inicialmente considerada.
- La *velocidad de calefacción* es, junto con la temperatura, una de las variables primordiales del proceso, y marca la diferencia entre una pirólisis suave y una pirólisis flash. En pirólisis suave, el proceso que controla la descomposición es generalmente la reacción química y el rendimiento de residuo sólido carbonoso es mayor, mientras que en pirólisis flash (velocidades medias de 200-300°C/s), la descomposición está controlada por la transmisión de calor y rendimiento de gases y líquidos es mayor. Así, si la pirólisis pretende optimizar la producción de carbón, ésta se lleva a cabo muy lentamente con tiempos de reacción de horas o días; la formación de líquidos se favorece con tiempos de reacción de unos pocos segundos y temperaturas menores de 650°C, mientras que, si la reacción transcurre a temperaturas y tiempos de reacción elevados, se maximiza la producción de gas.
- Un *tiempo de residencia* de los volátiles suficientemente alto permite que las reacciones de craqueo de los alquitranes primarios para dar gases tengan lugar en una mayor extensión.
- La *presión* tiene efecto tanto en el proceso de pirólisis como en la obtención de productos, se ha determinado que a presiones elevadas el rendimiento de gases no condensables incrementa, con la consecuente disminución de producto líquido.
- Otros factores importantes son el tamaño de partícula y la cantidad (o caudal) de muestra, que influyen sobre la transmisión de calor al sólido; y el empleo de catalizadores, se puede clasificar en pirólisis catalítica o térmica, dependiendo del uso o no de catalizadores. La pirólisis catalítica, admite trabajar a rangos de temperatura más bajos, y en función de los catalizadores utilizados, es más selectivo en los productos obtenidos. Los catalizadores influyen en el mecanismo de reacción, pudiendo acelerar la descomposición de los compuestos.

Cuando el proceso de descomposición térmica tiene lugar en condiciones de presión y temperaturas mayores y con una oxidación parcial de la materia por parte de aire o vapor de agua con el propósito de aumentar la fracción gaseosa para producir fundamentalmente monóxido de carbono e hidrógeno se habla de *gasificación*. Este proceso es especialmente útil para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos carbonosos como la biomasa, debido a que la utilización posterior como combustible de la mezcla gaseosa resultante de la gasificación es más eficaz que una combustión directa el residuo sólido carbonoso. En el rendimiento y selectividad de los productos de la gasificación intervienen los mismos parámetros que en pirólisis, junto con otros tales como la relación entre el aire o vapor de agua utilizado con respecto al caudal de alimento.

2. Datos históricos

El ser humano aprovechaba el potencial energético de la madera desde tiempos muy remotos, los egipcios realizaban procesos de pirólisis de este material para la obtención de carbón, alquitrán y ácidos piroleñosos (para embalsamar); en la Inglaterra feudal también se utilizaban estos métodos, y se transmitían de padres a hijos para no compartirlo en escritos. El carbón obtenido de la madera por medio de la pirólisis era esencial para la extracción de hierro del mineral de hierro en la era preindustrial. La Figura 3 muestra un horno de colmena típico utilizado en los primeros tiempos para producir carbón vegetal a partir de biomasa, utilizando un proceso de pirólisis lenta. Esta práctica continuó hasta que casi se acabaron los suministros de madera y carbón, producido a bajo costo en minas subterráneas, se reemplazó al carbón para la producción de hierro.

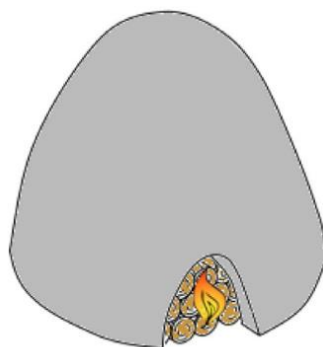


Figura 3 Horno colmena para la producción de carbón vegetal mediante pirólisis lenta de la madera

En la Primera Guerra Mundial los procesos sintéticos reemplazaron el método implementado en la Inglaterra feudal, y en la Segunda Guerra Mundial, Europa, Asia, Latinoamérica y Australia desarrollaron “*sistemas de gasificación de biomasa*” que se dejaron de lado en su mayoría cuando los combustibles líquidos tuvieron precios más accesibles.

En la década de los 70, se consideró a la pirólisis y gasificación ya no solo como sistema generador de energía, sino también para la eliminación de residuos.

En la década de los 80, se desarrolló en Japón, a gran escala, pirólisis de residuos sólidos urbanos para la producción de electricidad con los gases generados, sin embargo posteriormente, el precio de los crudos descendió a menos de la mitad, produciendo la suspensión de proyectos como estos. De igual manera en dicha década, se desarrollaron tecnologías para conseguir el aumento de bioaceite producido en el proceso de pirólisis, en Europa y América del Norte.

De la pirólisis de madera se han obtenido de unos veinte productos químicos distintos, pero la viabilidad de este proceso está en función de las fluctuaciones del mercado.

La generación de productos líquidos, sólidos y gaseosos es lo que sitúa en ventaja a la pirólisis sobre la incineración; sin embargo, en la pirólisis resulta complejo un aumento de la selectividad del proceso.

3. Productos de pirólisis

3.1 Líquidos

El rendimiento líquido, conocido como alquitrán, biopetróleo o biocrudo, es un líquido alquitranado negro que contiene hasta un 20% de agua. Se compone principalmente de compuestos fenólicos homólogos. El bioaceite es una mezcla de hidrocarburos complejos con grandes cantidades de oxígeno y agua.

La despolimerización y la fragmentación rápidas y simultáneas de los componentes de celulosa, hemicelulosa y lignina de la biomasa producen bioaceite. En una operación típica, la biomasa está sujeta a un rápido aumento de temperatura seguido de un enfriamiento inmediato para "congelar" los productos de pirólisis. El enfriamiento rápido es importante, ya que evita una mayor degradación o reacción con otras moléculas.

El bioaceite es una micro emulsión en la que la fase continua es una solución de los productos de descomposición de la celulosa y la hemicelulosa, y moléculas pequeñas de la descomposición de la lignina. La fase discontinua es compuesta en gran parte por macromoléculas de lignina pirolítica.

El bioaceite normalmente contiene fragmentos moleculares de celulosa, hemicelulosa, y polímeros de lignina que escaparon del entorno de pirólisis. Los compuestos encontrados en el bioaceite se clasifican en las siguientes cinco amplias categorías:

- Hidroxialdehídos
- Hidroxicetonas
- Azúcares y deshidroazúcares
- Ácidos carboxílicos
- Compuestos fenólicos.

3.2 Sólidos

El char es el producto sólido obtenido en el proceso de pirólisis. Es principalmente carbono, pero puede contener algo de oxígeno e hidrógeno. A diferencia de los

combustibles fósiles, la biomasa contiene muy poca ceniza inorgánica. Se caracteriza por tener grandes poros en su superficie.

3.3 Gases

La descomposición primaria de la biomasa produce gases condensables (vapor) y gases no condensables (gas primario). Los vapores, que se hacen de moléculas más pesadas, se condensan al enfriarse y se suman al rendimiento líquido de pirólisis. La mezcla de gas no condensable contiene gas de bajo peso molecular; gases como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etano y etileno. Estos últimos no se condensan al enfriarse. Se producen gases no condensables adicionales a través del craqueo secundario del vapor a mayor temperatura, estos se llaman gases secundarios. El producto final de gas no condensable es, por lo tanto, una mezcla de gases primarios y secundarios.

4. Tipos de pirólisis

La naturaleza de su producto depende de una serie de factores, tales como la temperatura de la pirólisis, el tiempo de reacción o la velocidad de calentamiento. El objetivo de la pirólisis es la optimización de los productos de alto valor de combustible de la biomasa por medios térmicos y catalíticos.

Una temperatura de proceso menor que 400 °C y tiempos de residencia de incluso días favorece la producción de char (sólido residual de base carbonosa). Una alta temperatura y un elevado tiempo de residencia aumentan la producción de gas a partir de biomasa. Finalmente, una temperatura moderada (~ 500 °C) y el tiempo de residencia corto del vapor (< 2 s) son óptimos para producir líquidos (Tabla 1).

Tabla 1 Distribución del producto a partir de diferentes condiciones en el proceso de pirólisis

Proceso	Condiciones	Líquido	Char	Gas
Pirólisis rápida	Temperaturas moderadas, tiempo de residencia corto (~ 500 °C, < 2 s)	75%	12%	13%
Carbonización	Bajas temperaturas, tiempo de residencia muy alto (~ 400 °C, días)	30%	35%	35%
Gasificación	Altas temperaturas, tiempo de residencia alto (~ 900 °C, 8 s)	5%	10%	85%

Así pues, la pirólisis puede ser lenta (carbonización) o rápida. La primera se da cuando el tiempo necesario para calentar el combustible a la temperatura de pirólisis es mayor que el tiempo de reacción de pirólisis característico.

Como se ha mencionado anteriormente, al variar el tiempo de residencia, la temperatura y la velocidad de calentamiento se obtiene un proceso pirolítico distinto que dará lugar a un producto diferente (Tabla 2).

Tabla 2 Características de algunos procesos pirolíticos

Procesos	Tiempo residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura final (°C)	Producto
Torrefacción	10-60 min.	Muy baja	280	Biomasa torrefactada
Carbonización	Días	Muy baja (~ 0,01-2 °C/s)	400	Char
Convencional	5-30 min.	Baja	600	Char, bio-oil, gas
Rápida	< 2 s	Muy alta	~500	Bio-oil
Flash	< 1 s	Alta	<650	Bio-oil, químicos, gas
Ultrarrápida	< 0.5 s	Muy alta	~1000	Químicos, gas
Vacuum	2-30 s	Media	400	Bio-oil
Hidropirólisis	< 10 s	Alta	<500	Bio-oil
Metano-pirólisis	< 10 s	Alta	>700	Químicos

La pirólisis lenta y rápida se basan en la tasa de calentamiento mientras que la hidropirólisis y metano-pirólisis se basan en el ambiente o el medio en el que se lleva a cabo las mismas. Estas últimas se utilizan principalmente para la producción de productos químicos. La pirólisis lenta y rápida se llevan a cabo generalmente en ausencia de un medio.

En la pirólisis lenta, el tiempo de residencia del vapor en la zona de pirólisis es del orden de minutos o más. Este proceso no se utiliza para la pirólisis convencional, donde la producción de líquido es el principal objetivo. La pirólisis lenta se utiliza principalmente para la producción de carbón y se divide en dos tipos: carbonización y torrefacción. Se produce la torrefacción en una temperatura muy baja y estrecha (200-300 °C), mientras que la carbonización tiene lugar a una temperatura mucho más alta y amplia. En la pirólisis rápida, el tiempo de residencia del vapor es del orden de segundos o milisegundos. Este tipo de pirólisis, utilizada principalmente para la producción de bio-petróleo y gas, es de dos tipos principales: flash y ultrarrápido. La Tabla 2 compara las

características de los diferentes tipos de pirólisis; muestra la carbonización como la más lenta y la ultrarrápida como la más rápida. La carbonización produce principalmente carbon vegetal; mientras que la ultrarrápida se usa para producción de líquido o gas. La pirólisis convencional involucra los tres tipos de productos de pirólisis (gas, líquido y carbon). Como tal, calienta la biomasa a un ritmo moderado y a una temperatura moderada. El tiempo de residencia del producto está en el orden de los minutos.

4.1 Pirólisis rápida

El objetivo principal de la pirólisis rápida es maximizar la producción de líquido o bio-oil. La biomasa se calienta tan rápidamente que alcanza el pico de temperatura antes que se descomponga. La velocidad de calentamiento puede ser tan alta como 10-300 °C/s, pero la temperatura máxima debe estar por debajo de 650 °C si el bio-oil es el producto de interés. Sin embargo, la temperatura máxima puede ser de hasta 1000 °C si la producción de gas es el interés primario.

Cuatro características importantes del proceso de pirólisis rápida son:

- Velocidad de calentamiento muy alta;
- Temperatura de reacción dentro del rango de 425-600 °C;
- Corto tiempo de residencia de vapor en el reactor;
- Enfriamiento rápido del gas producto.

4.2 Pirólisis Flash

En este caso la biomasa se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno a un rango de temperatura relativamente modesto de 450 °C a 600 °C. El producto, que contiene gas condensable y no condensable, sale del pirolizador con una breve residencia. Al enfriarse, el vapor condensable se condensa en un combustible líquido conocido como “bio-oil”. Tal operación aumenta el rendimiento del líquido mientras que reduce la producción de carbón. Un rendimiento típico del bio-oil en la pirólisis flash es de un 70-75% del producto de pirólisis total.

4.3 Pirólisis ultrarrápida

Esta implica un calentamiento extremadamente rápido de la biomasa. En el primer momento, los sólidos portadores de calor impactan en el vapor de biomasa, lo que resulta en una muy alta tasa de calentamiento. Sigue un enfriamiento rápido del producto primario de pirólisis que se produce en el reactor. Un separador de partículas separa las partículas sólidas de los gases no condensables y los vapores de productos primarios, los cuales vuelven al mezclador. Luego se calientan en una cámara de combustión separada.

Un gas no oxidante transporta los sólidos calientes al mezclador. Un tiempo de residencia uniforme corto controlado con precisión es una de las características más importantes de esta pirólisis. Para maximizar el rendimiento del producto de gas la temperatura de pirólisis es de alrededor de 1000 °C, y para maximizar el rendimiento del líquido la temperatura debe ser de 650 °C aproximadamente.

4.4 Pirólisis en presencia de un medio

La pirólisis convencional se lleva a cabo en ausencia de un medio como el aire, pero hay otro tipo de pirólisis que se realiza en presencia de un medio como el agua o el hidrógeno. La hidropirólisis es uno de esos tipos en los que la descomposición térmica de la biomasa tiene lugar en una atmósfera de hidrógeno a alta presión. La hidropirólisis puede aumentar el rendimiento volátil y la proporción inferior de masa molar de hidrocarburos. Este proceso es diferente de la hidrogasificación de char. Su mayor rendimiento volátil se atribuye a la hidrogenación de fragmentos de radicales libres suficientes para estabilizarlos antes de que se vuelvan a polimerizar y formar char.

En un proceso de dos etapas, la primera etapa se lleva a cabo en agua a 200-300 °C bajo presión; en la segunda etapa, el hidrocarburo producido se descompone en un hidrocarburo más liviano a una temperatura de alrededor de 500 °C. La hidropirólisis puede producir bio-oil con oxígeno reducido.

5. Rendimiento del producto de pirólisis

El producto de pirólisis depende del diseño del pirolizador, la física y características químicas de la biomasa, y parámetros tales como: *Tasa de calentamiento*, *Temperatura final (temperatura de pirólisis)*, *Tiempo de residencia en la zona de reacción*.

Al cambiar la temperatura final y la velocidad de calentamiento, es posible cambiar los rendimientos relativos de los productos sólidos, líquidos y gaseosos de pirólisis. El calentamiento rápido produce un carbón más volátil y más reactivo que los producidos por un proceso de calentamiento más lento; la velocidad de calentamiento más lenta y el tiempo de residencia da como resultado un carbón secundario producido por una reacción entre el carbon primario y los volátiles.

5.1 Efecto de la temperatura de pirólisis

Durante la pirólisis, una partícula de combustible se calienta a una velocidad definida desde el ambiente a una temperatura máxima, conocida como temperatura de pirólisis. El combustible es retenido allí hasta la finalización del proceso. La temperatura de pirólisis afecta tanto la composición como el rendimiento del producto. Durante la pirólisis de una

biomasa, la liberación de varios gases producto cambia con diferentes temperaturas. Podemos ver que las tasas de liberación varían ampliamente para diferentes constituyentes gaseosos.

La cantidad de carbón producido también depende de la temperatura de pirólisis. Las bajas temperaturas dan como resultado una mayor cantidad de carbón; las altas temperaturas resultan en menos.

5.2 Efecto de la tasa de calentamiento

La velocidad de calentamiento de las partículas de biomasa tiene una importante influencia en el rendimiento y composición del producto. El calentamiento rápido a una temperatura moderada (400-600 °C) produce más volátiles condensables y por lo tanto más líquido, mientras que un calentamiento más lento a esa temperatura produce más carbón.

Sin embargo, la velocidad de calentamiento por sí sola no define el producto. El tiempo de residencia del producto en el reactor también es importante. Durante el calentamiento lento, una eliminación lenta o gradual de los volátiles del reactor permite que se produzca una segunda reacción entre las partículas de carbón y los volátiles, lo que lleva a una reacción secundaria obteniendo como resultado la formación de carbón.

Los parámetros operativos de un pirolizador se ajustan para cumplir con los requisitos del producto final de interés. Las normas tentativas de diseño para calentar en un pirolizador incluyen lo siguiente:

- Para maximizar la producción de carbón se usa una tasa de calentamiento lenta ($<0,01-2,0$ °C/s), una temperatura final baja y un largo tiempo de residencia del gas.
- Para maximizar el rendimiento líquido, se implementa una tasa de calentamiento alta con una temperatura final moderada (450-600 °C), y un corto tiempo de residencia del gas.
- Para maximizar la producción de gas, se emplea una tasa de calentamiento de moderada a lenta, una alta temperatura final (700-900 °C), y un largo tiempo de residencia del gas.

La producción de carbón vegetal a través de la carbonización utiliza el primer caso. Mientras que la pirólisis rápida utiliza el segundo caso. El último caso se utiliza cuando se quiere maximizar la producción de gas.

5.3 Efecto del tamaño de las partículas

La composición, tamaño, forma y estructura física de la biomasa podría ejercer alguna influencia sobre el producto de pirólisis a través de su efecto sobre el índice de calentamiento. Las partículas de biomasa más finas ofrecen menos resistencia al escape de los gases condensables, que por lo tanto escapan con relativa facilidad al entorno antes de sufrir un agrietamiento secundario. Esto da como resultado un mayor rendimiento líquido.

Las partículas más grandes, por otro lado, facilitan el agrietamiento secundario debido a la mayor resistencia que ofrecen al escape del producto primario de pirólisis. Por esta razón, los métodos más antiguos de producción de carbon vegetal utilizaban pilas de piezas de madera de gran tamaño en una cámara sellada.

6. Cinética de pirólisis

Un estudio de la cinética de pirólisis proporciona información importante para el diseño de ingeniería de un pirolizador o un gasificador. También ayuda a explicar cómo los distintos procesos en un pirolizador afectan el rendimiento y la composición.

Los tres principales procesos que influyen en la tasa de pirólisis son: *la cinética química, la transferencia de calor y la transferencia de masa*. En esta sección se describen los procesos físicos y químicos, que son los aspectos que rigen el proceso.

6.1 Aspectos físicos

Desde un punto de vista térmico, podemos dividir el proceso de pirólisis en cuatro etapas. Aunque divididos por temperatura, los límites entre ellos no están tan separados; siempre hay alguna superposición:

1. *Secado* (~100 °C): durante la fase inicial de calentamiento de biomasa a baja temperatura, se libera la humedad y algo de agua. La humedad libre se evapora y luego el calor se conduce hacia el interior de la biomasa. Si la humedad es alta, el agua ligada ayuda la fusión de la fracción lignítica, que solidifica en el enfriamiento posterior. Este fenómeno se utiliza en el doblado de madera con vapor, que es un método popular práctica para moldearlo para muebles.
2. *Etapas inicial* (100-300 °C): en esta etapa, la deshidratación exotérmica de la biomasa tiene lugar con la liberación de agua y de bajo peso molecular gases como el CO y el CO₂. En esta etapa tiene lugar la torrefacción.
3. *Etapas intermedia* (>200 °C): esta es la pirólisis primaria, y tiene lugar en el rango de temperatura de 200-600 °C. La mayor parte del vapor o precursor del bio-oil

se produce en esta etapa. Grandes moléculas de partículas de biomasa descomponen en carbón (carbón primario), gases condensables (vapores y precursores del rendimiento líquido), y gases no condensables.

4. *Etapa final* (~300-900 °C): la etapa final de la pirólisis implica el craqueo secundario de volátiles en carbón y gases no condensables. Esta etapa generalmente ocurre por encima de los 300 °C. Los gases condensables, si se eliminan rápidamente del sitio de reacción, se condensan fuera del reactor, aguas abajo como alquitrán o bioaceite. Es evidente en la Figura 4 que una mayor temperatura de pirólisis favorece la producción de hidrógeno, que aumenta rápidamente por encima de 600 °C. Una contribución adicional a la reacción aumenta aún más el rendimiento de hidrógeno por encima de 900 °C.

La temperatura tiene una gran influencia en el producto de la pirólisis. La producción de dióxido de carbono es alta a temperaturas más bajas y disminuye a temperaturas más altas. La temperatura de liberación de gases de hidrocarburos alcanza su punto máximo alrededor de los 450 °C y luego comienza a disminuir por encima de los 500 °C, impulsando la generación de hidrógeno.

Las partículas de carbón caliente pueden catalizar el craqueo primario del vapor liberado dentro de la partícula de biomasa y el agrietamiento secundario que ocurre fuera de la partícula, pero dentro del reactor. Para evitar el craqueo de gases condensables y aumentando así el rendimiento líquido, la eliminación rápida del vapor condensable es muy importante. Cuanto menor sea el tiempo de residencia del gas condensable en el reactor, menor es el craqueo secundario y por lo tanto mayor es el líquido producido.

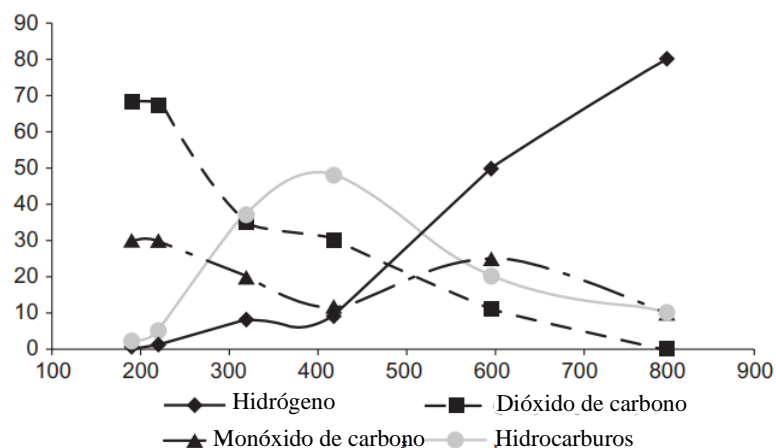


Figura 4 Gráfico de liberación de gases durante la destilación seca de la madera

6.2 Aspectos químicos

Como se mencionó anteriormente, una biomasa típica tiene tres componentes poliméricos principales: *I* celulosa, *II* hemicelulosa y *III* lignina. Estos constituyentes tienen diferentes tasas de degradación y rangos de temperatura de descomposición.

6.2.1 Celulosa

La descomposición de la celulosa es un proceso complejo de varias etapas. La Figura 5 muestra el modelo Broido Shafizadeh (Bradbury et al., 2001) el cual, es el más conocido y se puede aplicar, al menos cualitativamente, a la mayoría de la biomasa. Dicha figura es un esquema según el cual el proceso de pirólisis implica una pre-reacción intermedia (*I*) seguida de dos reacciones de primer orden de competencia:

- *Reacción II*: deshidratación (domina a baja temperatura y calentamiento lento).
- *Reacción III*: despolimerización (domina a velocidades de calentamiento rápidas).

La reacción *II* implica deshidratación, descarboxilación y carbonización, a través de una secuencia de pasos para producir carbón y gases no condensables como vapor de agua, dióxido de carbono y monóxido de carbono. Se favorece a bajas temperaturas (menos de 300 °C) y tasas de calentamiento lentas.

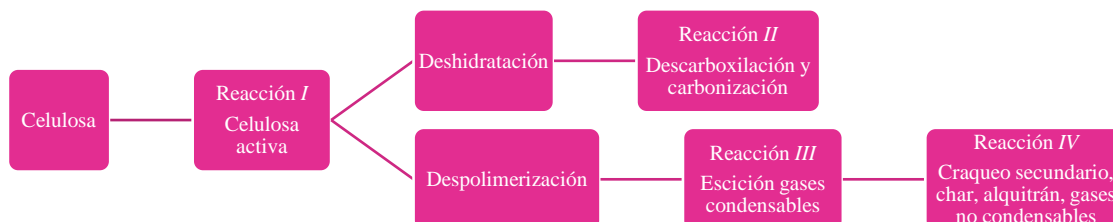


Figura 5 Modelo de celulosa "Broido Shafizadeh" modificado, que puede ser razonablemente aplicado a toda la biomasa

La reacción *III* implica la despolimerización y la escisión, formando vapores incluyendo alquitrán y gases condensables. Levoglucosan es un producto intermedio importante en este camino que se ve favorecido en condiciones más rápidas de tasas de calentamiento y temperaturas más altas de 300 °C.

El vapor condensable, si se le permite escapar rápidamente del reactor, puede condensarse como bio-oil o alquitrán. Por otro lado, si se mantiene en contacto con biomasa dentro del reactor, puede sufrir reacciones secundarias (Reacción *IV*), craqueando el vapor en

carbón secundario, alquitrán y gases (Figura 5). Las reacciones *II* y *III* están precedidos por la reacción *I*, que forma un producto intermedio de vida muy corta llamado celulosa activa que es líquido a la temperatura de reacción, pero sólido a temperatura ambiente.

Se especula sobre la existencia de la reacción *I*, ya que esta especie inestable no se detecta en el producto final en la mayoría de los procesos de pirólisis.

El modelo Broido Shafizadeh, aunque desarrollado para un componente de biomasa (celulosa), se puede aplicar a la pirólisis de una biomasa completa como la madera. La despolimerización (Reacción *III*) tiene energías de activación superiores a los de la deshidratación (Reacción *II*). Por lo tanto, una temperatura más baja y un tiempo de residencia más prolongado favorecen esta reacción, produciendo principalmente carbón vegetal, agua y dióxido de carbono. Por otro lado, debido a su mayor energía de activación, la reacción *III* se ve favorecida a temperaturas más altas, velocidad de calentamiento rápida y tiempos de residencia más prolongados, produciendo principalmente gas. La temperatura moderada y el corto tiempo de residencia del vapor evitan el agrietamiento secundario, produciendo principalmente vapor condensable, el precursor del bio-oil, que es de gran importancia comercial.

6.2.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa produce no solo más gas y menos alquitrán, sino también menos carbón en comparación con la celulosa. Sin embargo, produce la misma cantidad de agua. La hemicelulosa sufre una rápida descomposición térmica, que comienza en una temperatura inferior a la de la celulosa o la lignina. Contiene más humedad combinada que la lignina, y su punto de reblandecimiento también es más bajo. El pico exotérmico de la hemicelulosa aparece a una temperatura inferior a la de lignina.

6.2.3 Lignina

La pirólisis de la lignina normalmente produce alrededor del 55% de carbón, 15% de alquitrán, 20% de componentes acuosos y aproximadamente 12% gases. Es más difícil deshidratar la lignina que la celulosa o la hemicelulosa. El alquitrán producido contiene una mezcla de compuestos fenólicos, uno de los cuales, el fenol, es una importante materia prima de resina verde (resina producida a partir de biomasa). La porción acuosa comprende metanol, ácido acético, acetona y agua.

6.3 Modelos cinéticos de pirólisis

Para optimizar los parámetros del proceso y maximizar los rendimientos deseados, el conocimiento de la cinética de la pirólisis es importante. Sin embargo, es muy difícil conseguir datos confiables de constantes de velocidad cinética que se pueden usar para

una amplia gama de biomasa y para diferentes velocidades de calentamiento. Esto es aún más difícil para la pirólisis rápida, ya que es un proceso sin equilibrio y sin estado estacionario. Para fines de diseño de ingeniería, un enfoque de “caja negra” puede ser útil, al menos para la primera aproximación.

7. Reactor de pirólisis

Es la unidad donde ocurre una o varias reacciones químicas. Este equipo se compone de una cámara cerrada que dispone de entradas y salidas para el material y demás compuestos usados en la reacción.

7.1 Tipos de reactores

Se pueden clasificar de acuerdo al proceso de alimentación y retirada del producto, en Batch (discontinuo, intermitente), semi-batch y continuo.

7.1.1 Reactor Batch (intermitente o por lotes)

Este reactor se caracteriza porque los reactantes se colocan en su interior, dejando que reaccionen por un tiempo determinado antes de extraer los compuestos resultantes. Este tipo de reactor permite trabajar con tamaños de muestra pequeños y con un adecuado control de la reacción a nivel de laboratorio.

7.1.2 Reactores continuos

Son aquellos en los que se introduce en una parte del reactor los materiales a pirolizar y se obtienen en otra parte del reactor los productos, es decir, que se mantiene un flujo continuo de entrada de material y salida de productos, a lo largo del proceso.

7.1.3 Reactores semi-batch o semicontinuos

Desalojan los productos continuamente una vez que son generados, pero los materiales a ser pirolizados o de entrada, son ingresados antes de que inicie el proceso.

8. Transferencia de calor en un pirolizador

Las discusiones anteriores suponen que la tasa de transporte de calor o masa es demasiado alta para ofrecer alguna resistencia a la tasa global de pirólisis. Esto es cierto en un rango de temperatura de 300 °C a 400 °C, pero a temperaturas más altas el calor y el transporte

de masa influyen en la tasa general y por lo tanto no pueden ser descuidado. Esta sección trata sobre el transporte de calor durante la pirólisis. Durante la pirólisis, el calor es transportado a la superficie exterior de la partícula por radiación y convección. Posteriormente, se transfiere al interior de la partícula por conducción y convección de poros. Los modos de transferencia de calor están involucrados en este proceso.

- Conducción dentro de la partícula.
- Convección dentro de los poros de las partículas.
- Convección y radiación desde la superficie de las partículas.

En un pirolizador o gasificador comercial, el medio de transferencia de calor puede ser uno o una combinación de los siguientes:

- Pared del reactor (para reactor de vacío).
- Gas (para reactor de flujo arrastrado).
- Sólidos portadores de calor (para flujo fluidizado).

Dado que la transferencia de calor al interior de la partícula de biomasa es principalmente por conducción térmica, la baja conductividad térmica de la biomasa ($\sim 0,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) es un impedimento importante para el calentamiento rápido de su interior. Por esta razón, incluso cuando la tasa de calentamiento del exterior de la partícula es tan rápida como $10,000 \text{ }^\circ\text{C/s}$, la el interior se puede calentar a un ritmo considerablemente más lento para una partícula gruesa. Debido al lento calentamiento asociado al interior, las reacciones secundarias dentro de las partículas se vuelven cada vez más importantes a medida que aumenta el tamaño de las partículas y como resultado el rendimiento líquido se reduce.

8.1 Efecto de transferencia de masa

La transferencia de masa puede influir en el producto de pirólisis. Por ejemplo, un barrido del gas sobre el combustible elimina rápidamente los productos del entorno de pirólisis. Por lo tanto, las reacciones secundarias como el craqueo térmico, la repolimerización y la recondensación se minimizan.

8.2 ¿La pirólisis es autotérmica?

Una pregunta importante para los diseñadores es si un pirolizador puede satisfacer sus propias necesidades de energía o depende de la energía externa. La breve y tentativa respuesta es que un pirolizador en su conjunto no es autosuficiente energéticamente. El calor de reacción es inadecuado para satisfacer todas las demandas de energía, que incluyen el calor requerido para elevar la alimentación y cualquier medio de transferencia de calor inerte a la temperatura de reacción, el calor consumido por las reacciones endotérmicas y las pérdidas de calor en el reactor. En la mayoría de los casos, es necesario quemar los gases no condensables y el carbon producido para proporcionar el calor

requerido. Si eso no es suficiente, son necesarias otras fuentes de calor para suministrar la energía requerida para la pirólisis. En la siguiente sección analiza el requerimiento de calor de las reacciones en un pirolizador.

El proceso de deshidratación (Reacción *II*) es exotérmico, mientras que la despolimerización (Reacción *III*) y el craqueo secundario (Reacción *IV*) son endotérmicos. Entre las reacciones entre productos intermedios de pirólisis, algunos son exotérmicos y otros son endotérmicos. En general, la pirólisis de hemicelulosa y lignina es exotérmica. La pirólisis de celulosa es endotérmica a temperaturas más bajas (<400-450 °C) y se vuelve exotérmica a temperaturas más altas.

Por esta razón, un sistema correctamente diseñado inicialmente requiere calor externo sólo hasta que se alcance la temperatura requerida. La producción de carbón a partir de celulosa es ligeramente exotérmica. Sin embargo, a una temperatura más alta, cuando se produce suficiente hidrógeno otras reacciones exotérmicas pueden continuar. A bajas temperaturas y cortos tiempos de residencia de los volátiles, sólo las reacciones primarias endotérmicas son activas mientras que a altas temperaturas las reacciones secundarias exotérmicas son activas. En conclusión, para fines de diseño, se puede despreciar el calor de reacción para el proceso de pirólisis, pero es necesario calcular la energía necesaria para la vaporización de productos y para calentar gases de alimentación a la temperatura de pirólisis.

9. Tipos de pirolizadores

Los pirolizadores se han utilizado desde la antigüedad para producir carbón vegetal. Los primeros pirolizadores operaban en modo discontinuo usando una tasa muy lenta de calentamiento y durante largos periodos de reacción para maximizar la producción de char. Si el objetivo era producir la máxima cantidad de líquido o gas, entonces la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima de pirólisis y la duración de la pirólisis tuvieron que elegirse en consecuencia. Estas opciones también decidieron que tipo de reactor iba a ser usado. La Tabla 3 enumera la elección de velocidad de calentamiento, temperatura y tiempo de residencia de gas para la maximización del rendimiento.

Tabla 3 Efecto de las variables operativas en el rendimiento de la pirólisis

Para maximizar el rendimiento de	Temperatura máxima	Índice de calefacción	Tiempo de residencia del gas
Char	Bajo	Lento	Largo
Líquido	Bajo	Alto	Corto
Gas	Alto	Bajo	Largo

Los pirolizadores modernos se ocupan más de los productos gaseosos y líquidos, y requieren un proceso continuo. Varios tipos de pirolizadores han sido desarrollados. Basados en el modo de contacto gas-sólido, pueden clasificarse en términos generales como lecho fijo, lecho fluidizado y lecho arrastrado, y luego se subdivide aún más dependiendo de la configuración del diseño. Algunos de los principales diseños de pirolizadores en uso son:

- Cama fija o móvil
- Lecho fluidizado burbujeante
- Lecho fluidizado circulante (CFB)
- Reactor ultrarrápido
- Cono giratorio
- Reactor ablativo
- Reactor de vacío

9.1 Pirolizador de lecho fijo

La pirólisis de lecho fijo, que funciona en modo discontinuo, es el tipo de pirolizador más antiguo. El calor para la descomposición térmica de la biomasa se suministra desde una fuente externa o permitiendo una combustión limitada como en un horno de colmena. El producto puede fluir fuera del pirolizador debido al volumen de expansión mientras el char permanece en el reactor. En algunos diseños, se utiliza un barrido para la eliminación eficaz del gas producto del reactor. El gas es necesariamente inerte y libre de oxígeno. El principal producto de este tipo es carbón debido a la velocidad de calentamiento relativamente lenta y el largo tiempo de residencia del producto en la zona de pirólisis.

9.2 Pirolizador de lecho burbujeante

La biomasa triturada (2-6 mm) se introduce en un lecho burbujeante de arena caliente u otros sólidos. La cama es fluidizada por un gas inerte tal como el gas de combustión reciclado. Dicha mezcla ofrece una buena y uniforme temperatura. También proporciona una alta transferencia de calor a los sólidos de biomasa. La residencia del tiempo de los sólidos es considerablemente mayor que el gas en el pirolizador.

El calor necesario para la pirólisis puede obtenerse quemando una parte del gas producto en el lecho, o quemando el carbón sólido en una cámara separada y transfiriendo ese calor a los sólidos del lecho. El producto de pirolisis normalmente contendría alrededor del 70-75% líquido. El carbón en los sólidos del lecho actúa como catalizador de craqueo de vapor, por lo que su separación a través de elutriación o de otra manera si lo importante es evitar el craqueo secundario para maximizar el producto líquido. Las partículas de

carbón arrastradas se separan del gas producto mediante ciclones de una o varias etapas. Una característica positiva de este pirolizador es que es relativamente fácil de escalar.

9.3 Pirolizador CFB

Este tipo de pirolizador se muestra en la Figura 6, funciona con el mismo principio que el anterior, excepto que el lecho está muy expandido y los sólidos se reciclan continuamente alrededor de un circuito externo que comprende un ciclón y un circuito sello. Opera en un régimen hidrodinámico especial conocido como lecho rápido. Proporciona un buen control de la temperatura y mezcla uniforme en toda la altura. La velocidad superficial del gas es considerablemente mayor que en un lecho burbujeante. La alta velocidad combinada con una excelente mezcla permite que tenga grandes rendimientos de biomasa. Aquí, el gas y los sólidos suben por el reactor con algún grado de reflujo interno. Como resultado, el tiempo de residencia de las partículas de biomasa promedio es más largo que el del gas, pero la diferencia no es tan alta como en un lecho burbujeante. Una gran ventaja de este sistema es que el carbón arrastrado desde el reactor se separa fácilmente y se quema en un lecho fluidizado externo. El calor de combustión se transfiere al lecho sólido inerte que se recicla al reactor por medio de un sello de bucle.

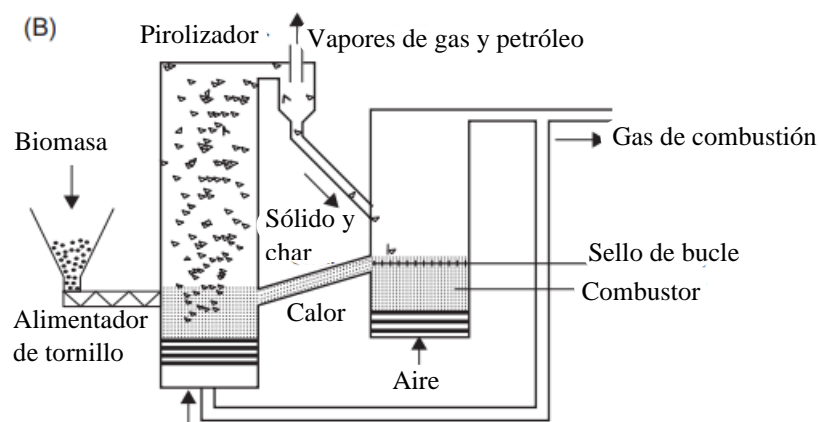


Figura 6 Pirolizador de lecho fluidizado circulante

La pirólisis térmica rápida utiliza un reactor ascendente. Aquí, la biomasa se introduce en un recipiente y rápidamente calentado a 500 °C por un tornado de arena caliente que fluye hacia arriba; luego se enfría en segundos. La velocidad de calentamiento es del orden de 1000 °C/s, y el tiempo de residencia del reactor es de unas pocas centésimas de milisegundo a un máximo de 5 s, lo que da un rendimiento líquido de hasta el 83%.

9.4 Pirolizador ultrarrápido

La alta tasa de calentamiento y el corto tiempo de residencia en la zona de pirólisis son dos requisitos clave de alto rendimiento líquido. El pirolizador ultrarrápido, mostrado en la Figura 7, proporciona una mezcla extremadamente corta (10-20 ms), residencia en el reactor (70-200 ms) y aplacar (~20 ms). Porque la temperatura del reactor también es baja (~650 °C), se puede lograr un rendimiento líquido de hasta el 90%. El nitrógeno del gas inerte se calienta a 100 °C por encima de la temperatura del reactor e inyectado a muy alta velocidad en el reactor para bombardear una corriente de biomasa inyectada en el reactor. El reactor también puede utilizar un portador de calor sólido, como la arena que se calienta externamente y se bombardea con una corriente de biomasa a través de múltiples chorros. Un impacto de tan alta velocidad en el reactor da como resultado una tasa de calentamiento excepcionalmente alta. La biomasa se calienta a la temperatura de pirólisis en unos pocos milisegundos. El producto de pirólisis sale del reactor desde el fondo y se enfría inmediatamente para suprimir una reacción secundaria o agrietamiento del vapor de aceite. Por lo tanto, este proceso es capaz de maximizar el rendimiento líquido durante la pirólisis.

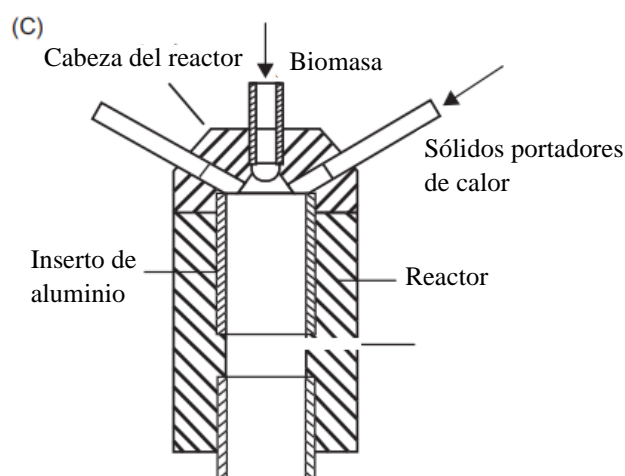


Figura 7 Pirolizador ultrarrápido

9.5 Pirolizador ablativo

Este proceso que se muestra en la Figura 8, implica la creación de alta presión entre una partícula de biomasa y la pared caliente del reactor. Esto permite la transferencia de calor de la pared a la biomasa, haciendo que el producto líquido se derrita en la biomasa. La biomasa al deslizarse contra la pared deja una película líquida que se evapora y sale de la zona de pirólisis, que es la interfaz entre la biomasa y la pared. Como resultado de la alta transferencia de calor y el corto tiempo de residencia del gas, se informa un rendimiento

líquido de hasta el 80%. La presión entre la biomasa y la pared se crea por medios mecánicos o por fuerza centrífuga. En un sistema mecánico, una gran parte de la biomasa se presiona contra una placa caliente giratoria.

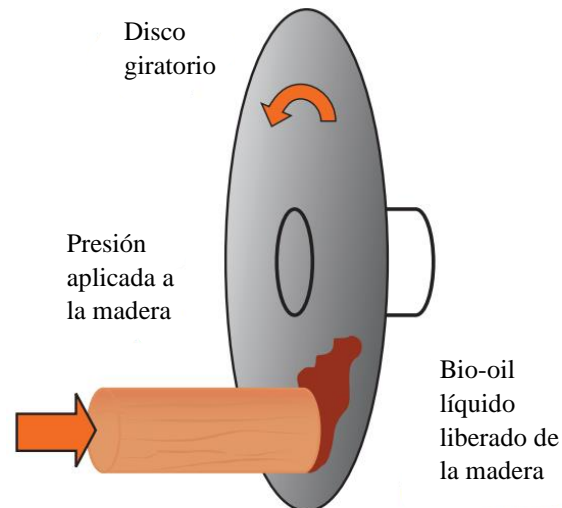


Figura 8 Pirolizador ablativo

9.6 Pirolizador de cono giratorio

En el proceso, las partículas de biomasa se alimentan en el fondo de un cono rotatorio (360-960 rev/min) junto con un exceso de sólido portador de partículas. La fuerza centrífuga empuja las partículas contra la pared caliente; las partículas son transportadas en espiral hacia arriba a lo largo de la pared. Debido a su excelente mezcla, la biomasa se calienta rápidamente (5000 K/s) y se piroliza dentro del pequeño volumen anular. El gas producto que contiene vapor de bio-oil sale por otro tubo, mientras que el sólido, el carbón y la arena se derraman sobre el borde superior del cono giratorio en un fluido que lo rodea, como se muestra en la Figura 9. El carbón se quema en el lecho fluidizado y esta combustión ayuda a calentar el cono y los sólidos que se reciclan para suministrar calor para la pirólisis. Algunas características especiales de este reactor incluyen un tiempo de residencia de sólidos muy corto (0,5 s) y un tiempo de residencia de fase gaseosa pequeño (0,3 s). Por lo general, proporcionan un rendimiento líquido de 60-70%. La ausencia de un gas portador es otra ventaja de este proceso. La compleja geometría del sistema puede plantear algunos problemas de ampliación.

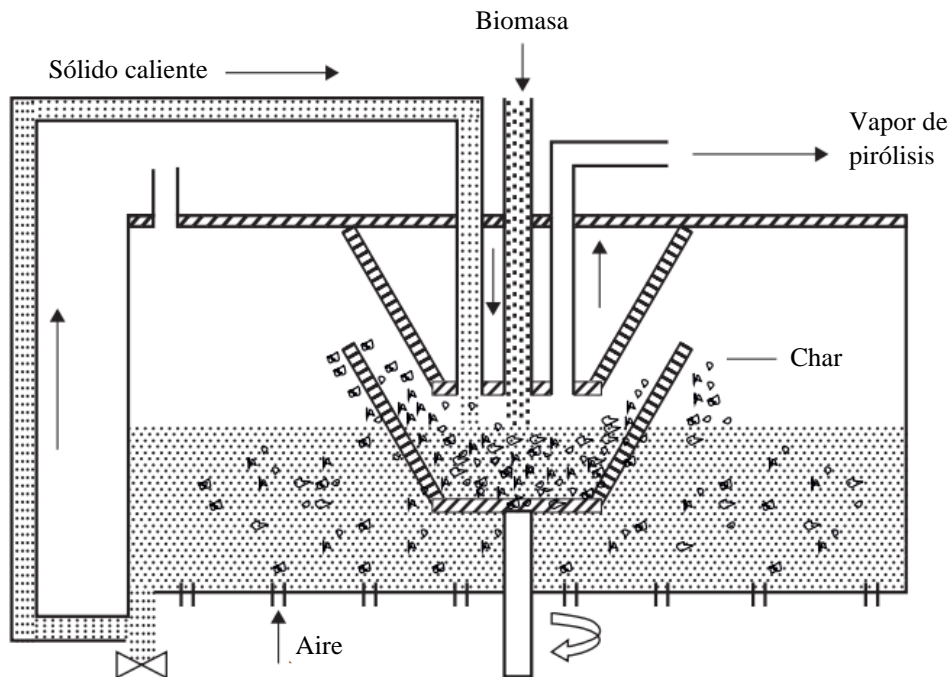


Figura 9 Pirolizador de cono giratorio

9.7 Pirolizador de vacío

Este pirolizador que se muestra en la Figura 10, comprende una serie de placas circulares calentadas apiladas. La placa superior está a unos 200 °C mientras que la de abajo está a 400 °C. La biomasa alimentada a la placa superior cae en sucesivas placas inferiores por medio de raspadores. No se requiere gas portador en este pirolizador. Solo queda carbón cuando la biomasa llega a la placa más baja. Aunque la tasa de calentamiento de la biomasa es relativamente lenta, el tiempo de residencia del vapor en la zona de pirólisis es corto. Como resultado, el rendimiento líquido en este proceso es relativamente modesto, alrededor del 35-50% en alimento seco, con un alto rendimiento de carbón. Este diseño de pirolizador es complejo, especialmente dado el ensuciamiento potencial de la bomba de vacío.

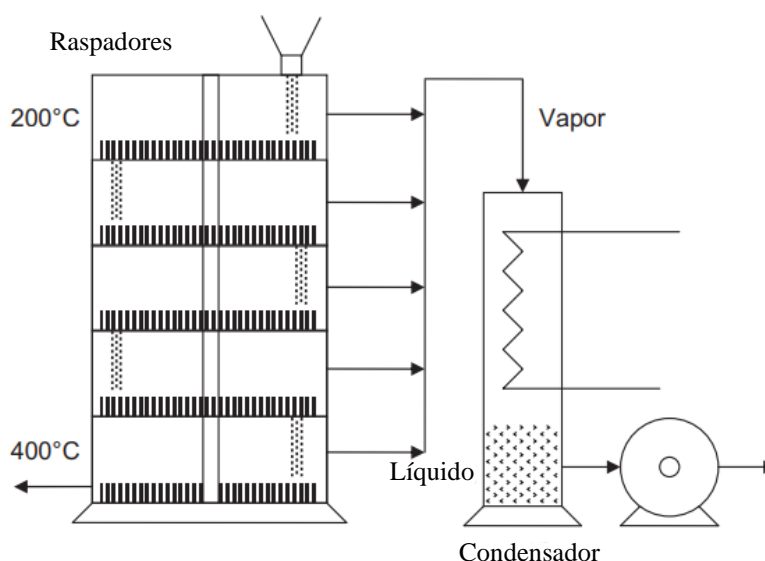


Figura 10 Pirolizador de vacío

10. Consideraciones de diseño del pirolizador

En esta sección se analizan las consideraciones de diseño en la producción de combustible líquido y carbón por pirólisis.

10.1 Producción de líquido por pirólisis

La pirólisis es uno de varios medios de producción de combustible líquido a partir de biomasa. El rendimiento máximo de líquido orgánico (aceite pirolítico o bio-oil) por la descomposición puede incrementarse hasta un 70%, si la biomasa se calienta rápidamente a una temperatura intermedia y una residencia corta, se permite que el tiempo en la zona de pirólisis reduzca las reacciones secundarias. Estos hallazgos pueden resumirse como sigue:

- Una velocidad de calentamiento más lenta, una temperatura más baja y un tiempo de residencia más largo, maximiza el rendimiento de carbón sólido.
- Una tasa de calentamiento más alta, una temperatura más alta y un tiempo de residencia más corto, maximiza la producción de gas.
- Una tasa de calentamiento más alta, una temperatura intermedia y una residencia más corta de tiempo, maximiza el rendimiento líquido.

Existe una temperatura de pirólisis óptima para obtener el máximo rendimiento de líquido. El rendimiento es más alto a 500 °C y cae bruscamente por encima y por debajo de esta temperatura. El tiempo de residencia esta generalmente en el rango de 0,1-2,0 s. Estos valores dependen de varios factores, incluido el tipo de biomasa. Podemos usar un

modelo cinético para una evaluación razonable del rendimiento. El propuesto por Liden (1988) puede utilizarse para predecir los rendimientos del líquido de pirólisis en una amplia gama de condiciones. La transferencia de calor es una consideración importante en el diseño de un pirolizador. El balance de calor para un pirolizador típico se puede escribir como:

$$[\textit{Calor libredo por la combustión del carbón}] + [\textit{Calor en la corriente entrante}] \\ = [\textit{Calor necesario para la pirólisis}] + [\textit{Pérdida de calor}]$$

Es difícil evaluar con precisión la pérdida de calor antes de diseñar la unidad. Así que, para una evaluación preliminar, podemos tomar esto como el 10% del calor en la corriente entrante.

La pirólisis rápida o flash es especialmente adecuada para la licuefacción pirolítica de biomasa. El producto es una mezcla de varios hidrocarburos, lo que permite producción de combustible y productos químicos a través de métodos de refinación apropiados. El poder calorífico del líquido producido es un poco más bajo o en el mismo rango (13-18 MJ/kg) que el de la biomasa original. El líquido pirolítico contiene varios azúcares solubles en agua y compuestos derivados de polisacáridos y lignina pirolítica insoluble en agua. El líquido pirolítico contiene una cantidad mucho mayor de oxígeno (~50%) que la mayoría del fuel-oil. También es más pesado y viscoso. A diferencia del fuel-oil, el aceite pirolítico aumenta su viscosidad con el tiempo debido a la polimerización. Este aceite no es auto inflamable como el fuel-oil, y como tal no puede ser mezclado con Diesel para operar un motor Diesel. Alternativamente, podemos someter el aceite pirolítico a hidrocrqueo para producir gasolina y Diesel.

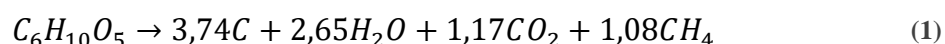
11. Biochar

El carbón vegetal, también conocido como biochar, es un producto preferido de pirólisis lenta a una temperatura moderada. El cálculo del equilibrio termodinámico muestra que el rendimiento del carbón de la mayor parte de la biomasa no puede exceder el 35%. La Tabla 4 da el rendimiento de equilibrio teórico de diferentes productos de biomasa a diferentes temperaturas. Sin embargo, el rendimiento real podría ser muy diferente.

Tabla 4 Equilibrio termodinámico, concentración de pirólisis de celulosa a diferentes temperaturas

Productos	Temperatura (°C)				
	200	300	400	500	600
C	32	28	27	27	25,2
H₂O	36,5	32,5	9,5	27	22,5
CH₄	8,5	10	10,5	10	9
CO₂	23,9	28	32	35	36
CO	0	0	0,1	1,2	4,5

Asumiendo que la celulosa representa biomasa, la ecuación estequiométrica para la producción de biochar puede escribirse como:



La producción de carbon vegetal a partir de biomasa requiere un calentamiento lento durante mucho tiempo, pero a una temperatura relativamente baja de alrededor de 400 °C. El horno de coque es un pirolizador de lecho fijo calentado indirectamente que opera a una temperatura superior a 1000 °C y durante un largo periodo de tiempo para maximizar la producción de gas y coque sólido.

El biochar tiene un atractivo especial en la reducción de gases de efecto invernadero, ya que su producción puede aumentar en gran medida la cantidad de carbono retenido en el suelo en forma estable similar a la que se realiza para atrapar de carbono. El carbono en residuos agrícolas y residuos forestales cuando se dejan en el suelo se liberan con el tiempo a la atmósfera como CO₂ o CH₄. Por otro lado, si la biomasa se convierte en biochar, hasta el 50% del carbono contenido en la biomasa podría permanecer en el suelo como un residuo de biochar estable. Entre el 38% y el 84% del carbono de la biomasa se libera a la atmósfera durante la quema de la vegetación natural. Esta es una muy ineficiente forma de producir biochar. Es el residuo sólido de la pirólisis, lo que lo convierte en un subproducto del proceso.

Como se mencionó anteriormente, el biochar se produce a través de la pirólisis como el subproducto sólido. La cantidad de biochar se define por las siguientes características:

- La BET o superficie interna
- PH del carbón
- CIC de biochar
- Recuperación de carbón en char

Las características anteriores del biochar dependen de cómo se produzca el mismo. Esta así influenciado por los siguientes tres procesos y parámetros de alimentación:

1. Temperatura
2. Tipo de biomasa
3. Tiempo de residencia

La temperatura de pirólisis es el parámetro más importante que influye en las propiedades del biochar. La Figura 11 muestra que hay un fuerte aumento en el área superficial entre la temperatura de 450 °C y 550 °C. La CEC también aumenta durante el periodo. El pH aumenta constantemente dentro del rango de temperatura de 200-800 °C. El rendimiento de carbono o la recuperación de carbono disminuye con el aumento de la temperatura al 60% del carbono inicial, pero esta menos influenciado por encima de los 600 °C. Esto sugiere que la pirólisis a una temperatura más alta es deseable desde el punto de vista de la producción de biochar.

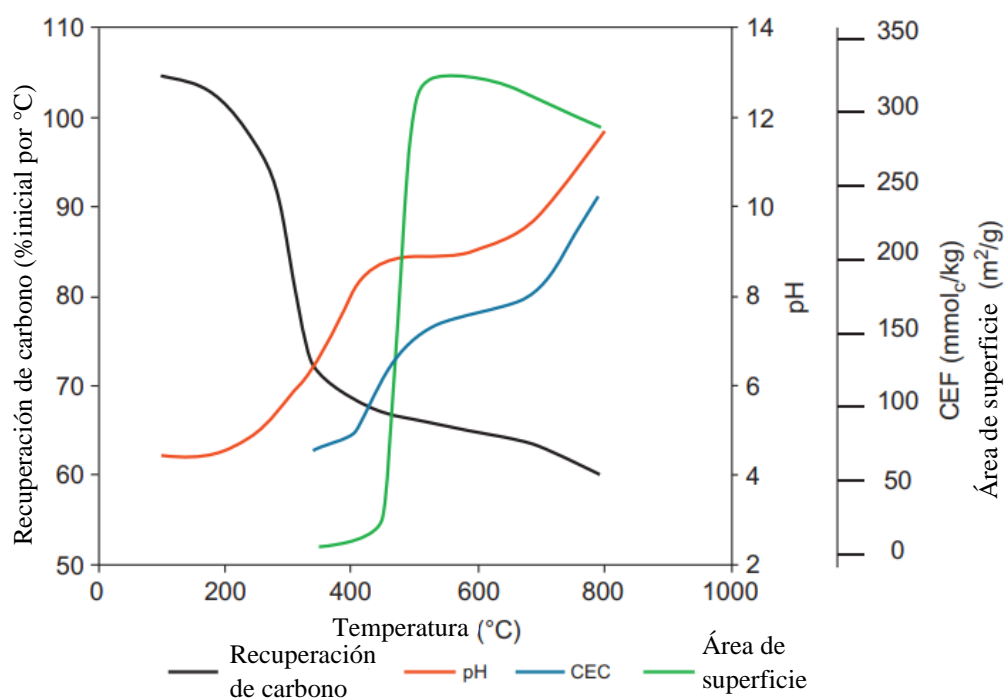


Figura 11 Diagrama cualitativo que muestra los cambios en las propiedades del biochar en función de la temperatura

Capítulo 2: Plásticos

1. Aspectos generales

Los plásticos constituyen uno de los mayores aportes al desarrollo social, económico y tecnológico de la última mitad del siglo XX. Existen alrededor de 50 familias diferentes y centenares de variedades de plásticos, debido a su ligereza, flexibilidad, durabilidad, versatilidad y otras propiedades ofrecen un rango tan amplio de posibilidades de utilización que los hacen aplicables prácticamente a cualquier sector de la sociedad actual.

Los plásticos han reemplazado a otros materiales tradicionales como metales, cerámicas y maderas, en muchas de sus aplicaciones, pero su desarrollo también se centra en aplicaciones nuevas como la microelectrónica, biomedicina y comunicaciones, esto provoca una mayor demanda por parte de los consumidores. Esta es una de las razones por las cuales, a partir de 1950, la producción de plásticos a nivel mundial ha aumentado una media de un 10% anual.

La creciente demanda de productos plásticos se ve reflejada en una problemática ambiental que tiene dos variantes:

- *La explotación de un recurso natural no renovable:* en la fabricación de plásticos se emplea el 4% del petróleo que se extrae en el mundo.
- *Problemas de disposición y tratamiento de residuos:* si bien los plásticos dentro de los residuos urbanos representan tan sólo el 7% en peso con relación a los demás materiales, en cuanto a volumen estos porcentajes se elevan notablemente, ocupando el 23% del total de residuos, debido a su baja densidad; esto según proyecciones internacionales.

Los plásticos se han acumulado en los ecosistemas, debido especialmente a sus características anticorrosivas y su resistencia a la intemperie y la degradación de microorganismos. La degradación de los plásticos es muy lenta pudiendo tardar hasta 1000 años, y este lapso de tiempo generan partículas de plástico más pequeñas que se almacenan en el ambiente.

Una de las características que hace tan atractivo el uso de plásticos en la mayoría de los productos es su bajo peso, pero esto también trae consecuencias negativas para el ambiente puesto que, cuando son abandonados como residuos, los plásticos navegan por corrientes subterráneas, ríos, mares y océanos. A nivel mundial el principal impacto ambiental de los residuos plásticos en la contaminación de los océanos y mares, este es un impacto acumulativo que se presenta a largo plazo y cubre gran cantidad de espacios de todo el planeta.

La cantidad de residuos plásticos en los mares aumenta cada año con reportes de abundancia de 3 a 5 kg/km², con registros de hasta 30 kg/km². En el océano Pacífico la cantidad de microplásticos se ha triplicado en la última década; esto conlleva serios problemas estéticos y, lo que es aún más grave, el peligro que esto representa para los organismos marinos que sufren daños por ingestión y atragantamiento.

En busca de una solución a este problema ambiental se han planteado varias técnicas para el tratamiento de residuos plásticos, entre ellas: reciclado mecánico y reciclado químico, que incluye despolimerización, gasificación y pirólisis, y aprovechamiento energético.

2. Antecedentes

El celuloide y la galatita son considerados con los primeros plásticos sintéticos obtenidos a partir de polímeros a los que se añadían sustancias plastificantes. La producción de plástico se inicia cuando se crea el celuloide en 1869 por John Hyatt, lo cual da origen en 1884 a la película fotográfica; en 1895 Emil Bertiner genera la galatita, derivada de la caseína tratada con formol; y en 1909 Leo H. Baekeland obtiene la baquelita, el primer polímero totalmente sintético. Esto incentivó a los químicos y a la industria a buscar otras moléculas sencillas para generar polímeros, de ahí que en la década de los 30, químicos ingleses crean el polietileno (PE) a partir de la polimerización del gas etileno bajo la acción del calor y la presión; y, al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro, se produjo un plástico duro y resistente al fuego, el cloruro de polivinilo (PVC); también se crea el poliestireno y en nylon, pero esto en Alemania. Ya en 1942 nacen las melaminas, las resinas epoxi, el poliuretano y en 1952 el policarbonato.

Con el pasar del tiempo, y gracias a los avances tecnológicos, se han ido desarrollando nuevos polímeros con mejores características, que se acoplan a las necesidades de la población, es por ello que en un periodo de diez años se calcula que los envases y embalajes de plástico han reducido su peso unitario un 28%, sin este logro los costos de producción y el consumo de energía serían el doble y el volumen de residuos se incrementaría un 150%.

3. Definición

Los plásticos son compuestos orgánicos que se generan a partir de simples moléculas de hidrocarburos, llamados monómeros, obtenidos del petróleo o del gas, estos forman polímeros más complejos luego de someterse a una polimerización, siendo este el material con el cual se fabrican los productos que demanda la población, es decir, están conformados por largas cadenas macromoleculares que generalmente contienen en su estructura carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, cloro, flúor y bromo.

4. Clasificación

Los polímeros se pueden clasificar de diversas formas, de acuerdo a sus características, siendo todas igualmente válidas, para efecto de este proyecto se analiza la clasificación de acuerdo a su comportamiento frente al calor, en donde existen esencialmente dos familias de plásticos, los termoplásticos y los termoestables, que se diferencian por su estructura molecular.

4.1 Termoestables

Tienen una estructura molecular rígida que se produce durante su elaboración por entrecruzamiento molecular, están representados por poliúreas o poliuretanos que no pueden ser restablecidos o reprocesados. Es decir, son insolubles e incapaces de fundir ya que son materiales que adquieren un estado final reticulado (entrecruzado), debido a que no funden y no reblandecen presentan muy buenas propiedades a elevadas temperaturas. Dentro de este grupo de plásticos se encuentran el poliéster insaturado, las resinas fenólicas y resinas epóxicas, principalmente.

4.2 Termoplásticos

Se caracterizan por ser polímeros lineales que pueden estar ramificados o no, su estructura molecular no presenta entrecruzamientos por lo que son solubles en algunos disolventes orgánicos; poseen la particularidad de fluir de un estado fundido, cuando se calientan, a uno sólido, cuando se enfrían. No tienen una estructura rígida y son principalmente poliolefinas, poliestireno y cloruro de polivinilo, al calentarse sus moléculas son libres de moverse y adoptar nuevas formas y posiciones puesto que el calor no modifica sus características físicas ni químicas es por ello que pueden ser reutilizados o reciclados muy fácilmente.

Dentro de este grupo se hallan principalmente siete tipos de plásticos, que han sido codificados por la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI), los mismos se presentan en la Tabla 5.

5. Residuos plásticos

Los residuos plásticos son el conjunto de materiales a base de plásticos, resinas o productos poliméricos que deben ser reprocesados para su reutilización.

5.1 Producción de residuos plásticos

Se generan en todos aquellos sectores productivos y del mercado en los cuales intervienen los plásticos. Se pueden clasificar dentro de dos grandes grupos: residuos de fabricación y transformación y residuos de post-consumo.

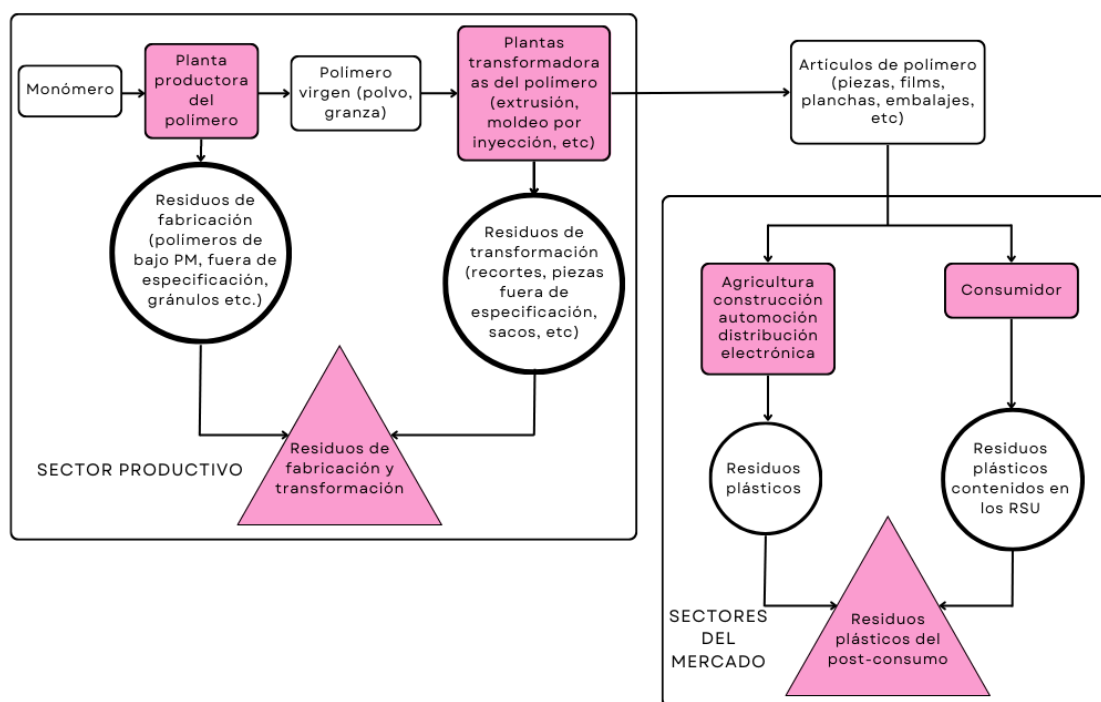


Figura 12 Vías de generación de residuos plásticos

La procedencia de los residuos plásticos integrados en estos dos grandes grupos se puede establecer del siguiente modo:

- *Los residuos de fabricación y transformación* están constituidos por diversos desperdicios de las plantas productoras de polímeros (polímeros de bajo peso molecular, fuera de especificación, restos del reactor, gránulos, etc.) y de las plantas de transformación de los mismos artículos plásticos (barreduras, recortes, piezas fuera de especificación, sacos, etc.).
- *Los residuos de post-consumo* proceden, en un 35% aproximadamente, de los sectores de la distribución, construcción, automoción, industria, electrónica y agricultura, y el 65% restante proviene de los residuos sólidos urbanos.

Teniendo en cuenta la distribución por sectores tanto del consumo como de la generación de residuos plásticos, se pueden deducir los siguientes puntos:

- En el conjunto de los sectores de envase y embalaje y bienes de consumo domésticos (en los que el destino final principal de los plásticos es la industria, distribución y consumo doméstico), la proporción de residuos plásticos generados respecto a la cantidad de plásticos consumida es de más del 75%.
- En sectores como la agricultura, automoción o electricidad y electrónica, la proporción es del 20-30%.
- En el sector de la construcción, la proporción es algo menor del 10%.

5.2 Gestión de los residuos plásticos

El manejo de residuos plásticos es el conjunto de procedimientos y políticas dentro de una gestión ambiental económicamente apropiada, en el que se incluyen diferentes procesos y operaciones, como son: generación, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final.

El tratamiento de los residuos plásticos también está basado en el conjunto de las tres “R”: reducir, reutilizar y recuperar, aunque con ciertas particularidades debidas a las características propias de estos materiales.

La *reducción* en origen es el primer paso hacia una gestión de residuos satisfactoria. Consiste, por un lado, en la utilización de menos cantidad de plásticos para cubrir las prestaciones de un producto con la misma eficacia, y por otro, en el diseño del producto de forma que se reduzca el consumo de material y se simplifique el número de diferentes plásticos utilizados en cada objeto.

En cuanto a la *reutilización* hay que tener en cuenta que los plásticos son materiales especialmente adecuados para ser reutilizados, debido a que son duraderos, lavables, resistentes, esterilizables, etc. Tanto en el sector de la distribución (caja, pallets, bidones industriales y otros) como en el doméstico, con el desarrollo, por ejemplo, de envases ligeros de recambio, este concepto está cada vez más vigente.

Una vez que se han realizado los esfuerzos adecuados en reducción y se ha procurado la reutilización de los distintos objetos, estos pasan a convertirse en residuos, y es en este momento cuando es aplicable la *recuperación*. En el caso de los plásticos, existen tres alternativas de tratamiento: el reciclado mecánico, el reciclado químico y la recuperación energética.

Para lograr una correcta gestión de los plásticos, se debe considerar una jerarquización de las acciones de manejo, dando prioridad a las actividades que apuntan a la minimización de los residuos, después se deben plantear alternativas para el aprovechamiento de los materiales y finalmente, si las demás acciones no son aplicables, se debe realizar una disposición final adecuada de los mismos.

5.2.1 Reciclado mecánico

El reciclado mecánico consiste en el tratamiento de los residuos plásticos por medio de presión y calor para volver a darle forma y conseguir otros objetos iguales o distintos de los iniciales. Mediante este proceso se obtienen materias primas secundarias con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original.

La viabilidad técnica y económica del reciclado mecánico solo es posible si los plásticos a tratar son termoplásticos, homogéneos, libres de materiales extraños y no contaminados. Los plásticos ideales para el reciclado mecánico son aquellos objetos de mayor tamaño, como por ejemplo botellas (si son residuos de envases), parachoques de automóviles fuera de uso o residuos recogidos en grandes cantidades, como las películas procedentes de invernaderos.

La aplicación de este método se limita a un porcentaje reducido de residuos plásticos, por tres razones primordiales:

- Los plásticos reciclados generalmente deben mezclarse con plástico virgen, debido a que los plásticos durante su vida útil y su eliminación pierden sus propiedades.
- Los residuos plásticos deben ser separados homogéneamente, no deben existir mezclas de tipos de plásticos y además deben estar completamente limpios.
- Se limita exclusivamente a los polímeros termoplásticos, ya que son los únicos que se pueden moldear una y otra vez sin que pierdan sus características iniciales.

El proceso de reciclado mecánico comienza con la recogida y clasificación. Se trata de conseguir residuos identificados, separados por tipos, fáciles de manejar y que se puedan obtener en grandes cantidades. El paso siguiente es la trituración o molienda. A continuación, el producto se lava y se separa la suciedad y las sustancias contaminantes, y posteriormente el material se centrifuga y se seca, almacenándose en silos intermedio en los que se realiza una homogeneización que garantice una cantidad constante y adecuada. El producto triturado, limpio, seco y homogéneo se alimenta a una extrusora, y tras el proceso de granceado, se obtiene la granza lista para ser procesada por diferentes técnicas. Se pueden considerar tres casos en este proceso final:

- Procesado del producto reciclado directamente, con la formulación que sea adecuada a su aplicación concreta. Las piezas obtenidas de este modo tienen en general propiedades menores a las fabricadas con polímero virgen, pero es suficiente para la utilidad deseada.
- Mezcla de la granza reciclada con polímero virgen para alcanzar las prestaciones requeridas.

- Coextrusión del producto reciclado entre dos o más capas de polímero virgen. Un ejemplo de esta técnica es la fabricación de botellas para bebidas, en las que la capa intermedia puede ser de polímero reciclado y la interior (en contacto con el producto) y la exterior son de polímero virgen.

Una cuestión siempre debatida es la de los límites que existen en el reciclado mecánico. En el año 1999 se realizó un estudio en la Unión Europea para evaluar diferentes escenarios de recuperación de residuos plásticos de envases, se determinó que un aumento en la tasa de reciclado mecánico por encima del 15% no aportaba ningún beneficio ambiental y resultaba económicamente perjudicial (AMPE, 1998). Bien es cierto que, dependiendo del tipo de residuo, podrían darse variaciones sobre la cifra anterior: un límite mayor para grandes objetos limpios como botellas, contenedores, películas de paletizado, baterías y parachoques de coches, etc.; y un límite menor para objetos pequeños como envases de yogures, componentes de coches menores de 50 gramos, bolsas pequeñas, etc.

En cualquier caso, el éxito del reciclado mecánico de los residuos plásticos depende de una serie de factores tales como:

- La cooperación entre fabricantes de materias primas, transformadores, usuarios, recolectores de residuos y recicladores.
- El diseño de productos con vistas a su posible reciclado.
- El desarrollo de sistemas de calidad y de normalización para los plásticos reciclados, que generen confianza en el material reciclado.
- La búsqueda de mercados de aplicaciones de gran volumen para los productos reciclados.

5.2.2 Reciclado químico

Mediante un proceso químico se descomponen los plásticos usados, en componentes más sencillos como son los monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos; este proceso no exige homogeneidad de los materiales, sino se puede hacer con mezclas de distintos polímeros, incluso se puede trabajar con los plásticos termoestables y plásticos de composición compleja, de esta manera se reducen los costos de selección. Con esta técnica se pueden recuperar los residuos plásticos que no han podido ser aprovechados en el reciclado mecánico como plásticos compuestos, partes de automóviles, cables, tapetes, textiles, etc.

Existen diferentes procesos para realizar el reciclaje químico: la pirólisis, la hidrogenación, la gasificación o el tratamiento con disolventes. Desarrollaremos brevemente cada uno a excepción de la pirólisis.

Despolimerización: consiste en el proceso inverso para la obtención del plástico, se parte de un polímero que es descompuesto en monómeros que pueden volver a ser utilizados como materias primas. Este proceso se puede desarrollar por vía térmica o química, mediante reacciones de hidrólisis, metanólisis, alcoholólisis o glicólisis; para lograr buenos resultados se debe disponer de materia prima bien definida, es aplicable a polímeros de policondensación (PET y poliamidas) y algunos de adición (poliuretanos).

Gasificación: se produce la oxidación parcial de las cadenas poliméricas donde se sintetiza monóxido de carbono e hidrógeno (gas de síntesis), que se pueden utilizar como combustible para generar electricidad, como materia prima para la producción de metano, amoníaco o alcoholes, o incluso como agentes para la producción de acero en hornos de venteo. Esta técnica presenta como ventaja el hecho de que no requiere la separación previa de los residuos, y además es la más desarrollada del reciclado químico.

5.2.3 Aprovechamiento energético

Se libera energía térmica mediante el calentamiento del residuo plástico, en donde el plástico es usado como combustible en diferentes procesos debido a su elevado poder calorífico, por ejemplo, un kilogramo de polietileno (con un poder calorífico aproximado de 46 MJ/kg) produce la misma energía que un kilogramo de fuelóleo o de gas natural.

Aquí se pueden aprovechar todo tipo de plásticos incluso aquellos que presenta deterioro o suciedad como aquellos que proceden de la agricultura o de los residuos sólidos urbanos. Diversos estudios de eco balance o análisis del ciclo de vida han demostrado que para muchos plásticos la recuperación energética, también denominada valorización energética o aprovechamiento energético, es considerada más conveniente que el reciclado químico o mecánico.

Existen diversas posibilidades para la recuperación energética de los residuos plásticos:

- *Recuperación de energía de los residuos plásticos mezclados con el resto de los RSU:* los plásticos suponen aproximadamente un 11% de los RSU y aumentan considerablemente el poder calorífico de estos, que es de unos 10 MJ/kg aproximadamente. Unas dos tercias partes de las plantas de incineración de RSU en la Unión Europea realizan recuperación de energía. La mayor parte de ellas usa un intercambiador de calor y una caldera para producir calor. Otro gran número usa también la primera salida de vapor para mover una turbina y producir electricidad.
- *Uso de los residuos plásticos como combustibles alternativos en plantas cementeras y centrales térmicas:* la utilización de residuos plásticos como sustituto parcial del carbón puede incrementar el poder calorífico del alimento combustible y disminuir la emisión de dióxido de carbono, metales pesados,

dióxido de azufre y cenizas, lo que implica un menor impacto ambiental. Los residuos plásticos más adecuados para ser utilizados como combustibles en cementeras o centrales térmicas son las películas agrícolas, ciertos residuos plásticos del comercio e industria y recortes industriales. Un buen ejemplo de la recuperación de energía de residuos plásticos es el caso de los plásticos de invernadero: cuando estos han sido agredidos por el aire y el sol durante varias temporadas, la recuperación por vía mecánica puede suponer un impacto ambiental mayor que el beneficio que se va a obtener, por lo que podría ser preferible su valorización energética en algunos casos.

- *Recuperación de energía de residuos plásticos solos mediante combustión:* en este caso se tratarían exclusivamente los residuos plásticos, los cuales no sea posible su separación, ya sea porque se trate de piezas muy pequeñas o por el nivel de degradación que presenten. En la práctica, sin embargo, es la opción anterior la que se prefiere frente a esta, pues en aquella ya se dispone de las infraestructuras necesarias para llevar a cabo el proceso de aprovechamiento energético.

En cualquier caso, todo proceso de tratamiento térmico por combustión genera una serie de contaminantes que han de ser adecuadamente tratados para evitar su descarga al ambiente en cantidades que puedan suponer un riesgo, tal y como se explicará en posteriores apartados.

5.3 Situación actual de la gestión de residuos

De los plásticos reciclados, el polietileno de baja densidad (LDPE) en forma de películas – como las de invernadero – es el mayoritario, seguido por el polietileno de alta densidad (HDPE) en embalajes, el PET en botellas y el polipropileno (PP) en embalajes y moldes.

El reciclado mecánico se aplica principalmente a films, fundas y sacos de plástico, aunque el mayor crecimiento de los últimos años ha sido, con diferencia, el reciclado de botellas de post-consumo urbano, impulsado por la puesta en vigor de la Ley de Envases y Residuos de Envases, la dinamización de la recogida selectiva y las plantas de selección. Mas del 40% de los plásticos reciclados se destina al sector de la construcción, principalmente a la fabricación de tuberías. Por otro lado, la vía mayoritaria de valorización energética de residuos plásticos es en la incineración de residuos sólidos urbanos, aunque también un pequeño porcentaje de los plásticos se utiliza como combustible alternativo en plantas cementeras.

6. Identificación de residuos plásticos

Los plásticos están identificados de acuerdo al sistema de codificación de la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI), para lo cual se considera el tipo de resina con la que se han

fabricado dichos plásticos, en la Tabla 5 que presenta la ISO 11469:2016 (Disposición de desechos plásticos post-consumo-, requisitos) sobre los “Usos más comunes de los plásticos”, de esta manera se tiene siete tipos de plásticos, los cuales están considerados dentro de los termoplásticos descritos anteriormente.

La codificación internacional de la SPI, permite una fácil identificación de los residuos plásticos, ya que cada tipo de plástico tiene un código único referente a sus características, a continuación, en la Tabla 5 se presenta la descripción que hace la norma ISO de cada uno de ellos.

Tabla 5 Codificación internacional de la Sociedad de la Industria de Plásticos



Código de la resina	Descripción	Aplicaciones del producto
	<p>PET es claro, duro y tiene buenas propiedades de barrera de gas y humedad. Esta resina se utiliza comúnmente en botellas de bebidas y muchos contenedores de productos de consumo elaborados por moldeo por inyección. Copos/hojuelas y pellets limpios de PET reciclado tienen gran demanda para el hilado de fibra para alfombra, producción de fibra de relleno y geotextiles. Conocido como poliéster.</p>	<p>Botellas plásticas para bebidas ligeras, agua, jugo, bebidas deportivas, cerveza, enjuague bucal, salsa de tomate y aderezo. Frascos de comida, aceite de cocina, mantequilla de maní, jalea, mermelada y embutidos. Películas para hornos, bandejas de comida para microondas.</p>
	<p>Es utilizado para elaborar diversos tipos de envases. Los envases no pigmentados son translucidos, tienen buenas propiedades de barrera y rigidez y son adecuados para envasado de productos con una corta vida de estante como la leche. Debido a que el HDPE tiene buena resistencia química, se usa para el envasado de muchos productos químicos domésticos e industriales tales como detergentes y lejía. Las botellas pigmentadas de HDPE tienen mejor resistencia al estrés por agrietamiento que aquellas de HDPE no pigmentado.</p>	<p>Envases para lácteos, agua, jugo, cosméticos, shampoo, detergente y lavandería y limpiadores domésticos. Bolsas para alimentos y compras al por menos. Fundas de caja de cereales. Contenedores reutilizables.</p>

Tabla 5 (continuación)






	<p>Además de sus propiedades físicas estables, el PVC tiene buena resistencia química, resistencia a la intemperie, características de flujo y propiedades eléctricas estables. La diversa lista de productos de vinilo puede dividirse ampliamente en materiales rígidos y flexibles.</p>	<p>Aplicaciones de embalaje rígido incluyen ampollas y recipientes con bisagras para comida para llevar. El uso en envases flexibles incluye bolsas para ropa de cama y ropa médica y presentan utilidad para embalajes y resistencia a la manipulación.</p>
	<p>LDPE se utiliza principalmente en aplicaciones de película debido a su dureza, flexibilidad y relativa transparencia, y es de uso común en aplicaciones donde es necesario el sellado mediante calor. El LDPE también se utiliza para fabricar algunas tapas flexibles y botellas, así como en aplicaciones sobre alambres y cables. Incluye al Polietileno lineal de Baja Densidad (LLDPE).</p>	<p>Bolsas y envolturas transparentes o pigmentadas. Bolsas para limpieza en seco, periódicos, pan, alimentos congelados, productos frescos y basura doméstica. Termoencogibles y película de estiramiento (stretch film). Recubrimientos para cartones de leche y vasos de bebidas calientes y frías. Tapas de contenedores. Juguetes.</p>
	<p>El PP tiene buena resistencia química, es fuerte y tiene un elevado punto de fusión por lo que le da aptitud para ser llenado con líquidos en caliente. Esta resina se encuentra en embalajes flexibles y rígidos, fibras y grandes piezas moldeada para automóviles y productos de consumo.</p>	<p>Contenedores para yogur, margarina, comidas para llevar y alimentos gourmet. Botellas de medicamentos y cosméticos. Tapas de botellas y cierres. Sorbetes, botellas de salsa de tomate y jarabe.</p>
	<p>PS es un plástico versátil que puede ser rígido o espumoso. El poliestireno de uso general es claro, duro y quebradizo. Tiene un punto de fusión relativamente bajo. Las aplicaciones típicas incluyen el embalaje de protección, envases de alimentos, botellas.</p>	<p>Artículos para servicios de alimentos, como tazas, platos, cuencos, cubiertos, recipientes con bisagras para comida para llevar, bandejas de carne y aves de corral, envases rígidos para alimentos. Espuma de embalaje de protección para muebles, aparatos electrónicos y otros objetos delicados.</p>

Tabla 5 (continuación)

	<p>El uso de este código indica que un paquete/envase/embalaje está elaborado con una resina, distinta a las seis anteriormente enlistadas o está compuesta por más de una resina y se utiliza en una combinación de múltiples capas. Incluye al poliuretano (PU), acrilonitrilobutadienoestireno (ABS), policarbonato (PC), resina acetal.</p>	<p>Botellas de agua reutilizables de tres y cinco galones, algunas botellas de jugos cítricos y salsa de tomate. Bolsas de cocción al horno, capas de barrera y el embalaje a medida. Piezas de grifería y de vehículos. Discos compactos, techo translucido, armazones. El PU se emplea principalmente como aislante de temperatura. El ABS es un plástico duro empleado en perfiles, tuberías, defensas de automóviles y juguetes. Los discos compactos y garrafones de agua están hechos de PC.</p>
---	---	--

A continuación, se desarrolla en mayor detalle el Polietileno, ya que será el principal combustible en el pirolizador.

6.1 Polietileno

El PE es el polímero más simple desde el punto de vista químico, aunque no obstante existe una gran variedad de tipos y procesos de fabricación. Básicamente se obtiene de la polimerización del etileno, siendo el plástico más consumido y también el más económico; además, es químicamente inerte y un excelente aislante eléctrico.

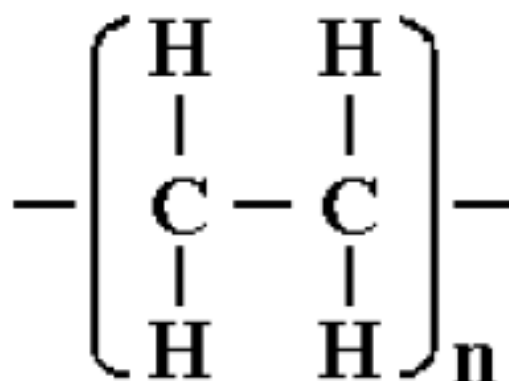


Figura 13 Unidad básica de repetición de Polietileno

El polietileno fue sinterizado por primera vez en 1898 de forma accidental por el químico alemán Hans Von Pechmann mientras calentaba diazometano, aunque no fue hasta 1933 cuando fue sinterizado en los laboratorios ICI en Inglaterra tal y como se conoce hoy en día, aplicando elevadas presiones (1400 bares) y una temperatura de 170 °C a una mezcla de etileno y benzaldehído. En 1935 se desarrolló de forma reproducible el proceso de altas presiones, y la producción industrial de polietileno comenzó en 1939. Este polietileno así obtenido era parcialmente cristalino debido al alto grado de ramificación de las cadenas, y es el que se conoce como polietileno de baja densidad (LDPE).

En la década de los años 50, la investigación sobre las mejoras del proceso de producción se centró en encontrar catalizadores que permitieran trabajar en condiciones menos extremas. El primer catalizador, basado en trióxido de cromo, fue descubierto en 1951 en la empresa Phillips Petroleum, y en 1953 el alemán Karl Ziegler desarrolló un sistema catalítico basado en haluros de titanio y compuestos organoalumínicos que trabaja en condiciones aún más suaves que los catalizadores Phillips. El polietileno así obtenido era esencialmente lineal y cristalino, y es el que se conoce como polietileno de alta densidad (HDPE). Posteriormente, en 1976, Kaminsky y Sinn patentaron un tercer tipo de catalizadores basados en metallocenos. Estos catalizadores, junto con los de Ziegler, son en la actualidad de gran utilidad para copolimerizar etileno con otras olefinas para la producción de nuevas variedades como el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), cuya producción adquirió relevancia desde la introducción del proceso Unipol en 1978.

6.1.1 Características

El polietileno se presenta en multitud de formas en función de su densidad y ramificación. Las propiedades mecánicas dependen fundamentalmente de variables como la extensión y el tipo de ramificaciones, la estructura cristalina y el peso molecular. Las variedades más importantes son:

- *LDPE*: presenta una densidad de 0.910-0.940 g/cm³ con un elevado grado de ramificación tanto de cadena larga como corta, lo que significa que las cadenas no se compactan adecuadamente para formar una estructura cristalina. Su temperatura de fusión es de 110 °C. Su resistencia a la tracción es baja y su ductilidad alta, y debido a ello su procesado es sencillo.
- *LLDPE*: su densidad está en el rango de 0.915-0.940 g/cm³. Es básicamente un polímero lineal, aunque con un número significativo de ramificaciones cortas, como resultado de la copolimerización de etileno con α -olefinas de cadena corta (1-buteno, 1-hexeno o 1-octeno). Su temperatura de fusión es de 122 °C. Presenta una resistencia tanto a la tracción como al impacto mayor que el LDPE, y que permite elaborar films de menor grosor que éste, aunque no es tan sencillo de procesar.

- *HDPE*: tiene una densidad típica de 0.940-0.970 g/cm³ por ser fundamentalmente lineal, y presenta solo unas pocas ramificaciones cortas. Su temperatura de fusión es de 130 °C. Su resistencia a la tracción es elevada debido a su carácter cristalino.

6.1.2 Los residuos de polietileno

La mayor parte de las aplicaciones del polietileno, tanto de baja como alta densidad, se dirigen a la fabricación de bienes de consumo no duraderos, de contenedores y de envases. El polietileno es el polímero más fácil de reciclar en comparación con los otros.

La pirólisis de polietileno como método de reciclado químico ha sido ampliamente estudiada por diversos autores desde la década de 1970. El uso de diversos catalizadores para el craqueo catalítico de polietileno ha permitido la disminución de las temperaturas de operación y la selectividad hacia compuestos específicos. En este sentido, el grupo del profesor Walter Kaminsky en Alemania fue uno de los pioneros en el estudio en planta piloto con reactor de lecho fluidizado de la pirólisis de poliolefinas para la producción de oleofinas, mediante el denominado *Hamburg Pyrolysis Process*. En España existen en la actualidad diversos grupos de investigación importantes dedicados al estudio de los diferentes aspectos de la pirólisis catalítica de polímeros -con especial atención al polietileno-, referentes al efecto sobre los rendimientos de los productos finales de variables tales como la utilización de distintas zeolitas, la desactivación de éstas, la temperatura de operación o el tiempo de residencia de los gases.

Un caso interesante es el de los plásticos utilizados para cubiertas de invernadero. La utilización de películas para cubiertas de invernadero ha permitido en las últimas décadas un aumento significativo en la producción agrícola en regiones españolas como Almería. El LPDE es el plástico flexible más empleado actualmente para cultivos en invernaderos, túneles y acolchado, debido principalmente a su bajo precio, a sus buenas propiedades mecánicas y a la facilidad para incorporar los aditivos que mejoran sus prestaciones. Sin embargo, después de dos o tres años de uso, estas películas se degradan, principalmente por la acción de los rayos solares, volviéndose quebradizas y no pudiendo resistir la presión del viento. Tanto el vertido como la quema incontrolada de estos residuos perjudican el entorno y desperdician recursos valiosos. El reciclado mecánico puede utilizarse para transformar los residuos plásticos en bolsas de basura y pequeñas tuberías. Sin embargo, la cantidad de estos residuos que puede ser gestionada de esta forma está limitada por los niveles de degradación y contaminación y por la demanda insuficiente del mercado para los productos reciclados.

A fines de los 90 se llevó a cabo un estudio en la Central Térmica Litoral de Almería en Carboneras, el cual arrojó resultados positivos desde tres puntos de vista:

- *Económico*: el polietileno tiene un poder calorífico mayor que el carbón, y la sustitución de éste supondría un ahorro en las importaciones.
- *Ambiental*: el polietileno, debido a su naturaleza libre de impurezas, no originó cambio en las emisiones registradas.
- *Operativo*: el funcionamiento de la planta transcurrió con normalidad durante todo el proceso.

Si bien la experiencia resultó satisfactoria, no se tiene constancia de que en la actualidad la central térmica opere con una sustitución parcial de carbón por residuos de LDPE. Así pues, en España la recuperación de los plásticos de invernadero tiene lugar mediante reciclado mecánico, mientras que la recuperación energética de residuos de polietileno en general se lleva a cabo en instalaciones de incineración de RSU, puesto que los plásticos forman parte de éstos y su presencia es beneficiosa debido a su elevado poder calorífico.

En Estados Unidos la recuperación de los residuos de polietileno consistió, principalmente, en el reciclado de botellas de HDPE de agua y leche. Los productos obtenidos del reciclado se destinan a la fabricación de tuberías, botellas de detergentes o de aceites de coches.

En Japón, predomina el reciclado mecánico, del cual una baja tasa es de plásticos contenidos en los RSU, ya que la mayor parte son residuos plásticos de pre-consumo.

SEGUNDA PARTE:

Diseño del pirolizador

Capítulo 3: Material y soldadura

1. Introducción

En este capítulo se seleccionará el material a utilizar para la fabricación del reactor, el ciclón y el intercambiador de calor, y para ello se describirá las características del acero que se necesita y se seleccionará el mismo justificándose la elección.

Posteriormente se hará referencia a la soldadura, caracterizando cada tipo de soldadura y se describirá más detalladamente en particular el método SMAW, el cual es el elegido para el proyecto.

2. Material a utilizar

2.1 Acero inoxidable

La característica fundamental de los aceros inoxidables es su excelente comportamiento frente a la corrosión, tanto atmosférica, como de otros agentes y medios que puedan ser más agresivos y que constituyan el ambiente de trabajo de los aceros.

La resistencia a la corrosión que muestran los aceros inoxidables se basa en la presencia en su composición química de un componente, el cromo (Cr). De esta manera, para que esta resistencia a la corrosión empiece a ser efectiva su porcentaje deberá ser superior al 10,5% en peso, con un máximo del 1,2% de porcentaje en peso de carbono (C).

Este contenido mínimo en cromo es fundamental para que un acero pueda ser considerado como inoxidable. De hecho, los fenómenos de corrosión de aquellos aceros situados en ambientes rurales e industriales desaparecen prácticamente como la proporción de cromo como elemento de aleación supera el 12%, mientras que para contenidos de cromo superiores al 15% el acero ya es resistente a la corrosión en contacto incluso con atmosferas marinas.

Esta capacidad protectora que el cromo confiere a los aceros se basa en la gran afinidad que muestra el cromo por el oxígeno. De esta manera, un acero que posea un alto contenido en cromo al entrar en contacto con un medio oxidante (por ejemplo, la atmosfera) produce la formación de una finísima capa superficial de óxido de cromo (Cr_2O_3), que es impermeable e invisible y que cubre homogéneamente a toda la pieza de acero, impidiendo que el proceso corrosivo sobre el acero siga progresando. Este fenómeno se conoce como pasivación del acero.

La pasivación del acero inoxidable es un fenómeno automático y espontáneo que ocurre siempre que exista oxígeno suficiente en contacto con la superficie de los aceros que contienen suficiente cromo como elemento aleante en su composición. De esta manera, aunque la pieza de acero inoxidable sufra algún rasguño o un proceso de mecanizado, el cromo presente en el acero volverá a crear esta capa protectora de óxido de cromo que la protegerá de la corrosión.

No obstante, habrá situaciones donde el acero pueda perder su estado pasivo y pueda sufrir procesos de corrosión, volviéndose activo a efectos de corrosión. Suelen producirse en zonas pequeñas donde el porcentaje de oxígeno presente sea pequeño, tales como en esquinas compactas, en soldaduras incompletas o mal acabadas, o incluso en el interior de uniones mecánicas donde al no haber suficiente oxígeno no se puede generar esta capa protectora de óxido de cromo.

2.2 Tipos de aceros inoxidables

Como se ha visto, los aceros inoxidables son aleaciones de hierro (Fe), cromo (Cr) en un porcentaje en peso $>10,5\%$, y de carbono (C) cuyo porcentaje debe ser $<1,2\%$. A parte de estos componentes, a los aceros inoxidables se les complementan con otros elementos aleantes que les confiere distintas propiedades que serán útiles según el uso a que se destine el acero.

Entre estos nuevos elementos que se añaden a la composición de los aceros inoxidables se encuentra fundamentalmente el níquel (Ni), aunque también se suelen emplear el molibdeno (Mo), nitrógeno (N) o el titanio (Ti), entre otros. Con ellos se podrá conseguir mejorar las prestaciones de los aceros inoxidables en aspectos tales como su conformabilidad, mejorar su resistencia mecánica o su resistencia térmica (mejorar su comportamiento frente a temperaturas elevadas).

De esta manera, los aceros inoxidables se van a clasificar en función de los distintos elementos y de las cantidades relativas de cada uno de ellos que intervienen en su composición. De forma general se consideran cuatro familias básicas de aceros inoxidables: martensíticos, ferríticos, austeníticos y dúplex.

A continuación, se describen las propiedades, designación empleada para cada tipo y sus principales aplicaciones de uso del acero inoxidable austenítico AISI 316L, que es el material que se implementó en este proyecto.

2.3 Aceros inoxidables austeníticos

Dentro de los aceros inoxidables, los aceros austeníticos son los que más aplicaciones han tenido, empleándose ampliamente en sectores como la industria alimentaria y

farmacéutica, la industria química y petroquímica, en calderería y fabricación de tubos, en la fabricación de electrodomésticos, de componentes de la industria aeronáutica, así como material para la fabricación de elementos decorativos arquitectónicos o de componentes del automóvil, etc.

Los aceros inoxidable austenítico se caracterizan por una adición importante de níquel (Ni) y/o también de manganeso (Mn), que son elementos gammágenos, cuyo efecto es contrario al del cromo, es decir, que la adición de níquel aumenta el rango térmico de estabilidad del acero según la forma austenítica.

La austenita, o acero gamma (γ), es una forma de ordenamiento de la estructura cristalina del acero por parte de los átomos de hierro (Fe) y carbono (C). La estructura cristalina austenítica que resulta es del tipo cubica centrada en las caras (FCC), donde los átomos de hierro ocupan los vértices del retículo cubico y el centro de las caras, mientras que los átomos de carbono, en un porcentaje máximo de carbono (C) del 2,11%, se presentan como elemento intersticial, ocupando los huecos internos que dejan dentro de la estructura los átomos de hierro. Las formas austeníticas son en general de naturaleza dúctil, blanda y tenaz.

Los aceros inoxidable austeníticos son amagnéticos y mantienen unas buenas propiedades mecánicas a temperaturas criogénicas. Asimismo, los aceros inoxidable austeníticos no sufren ninguna transformación desde su solidificación hasta temperatura ambiente por lo que no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico.

El acero inoxidable austenítico clásico que representa esta familia de los aceros es el AISI 304. Luego aparecieron otros aceros más resistentes a la corrosión mediante la adición de molibdeno (AISI 316 y 317). También están los aceros de muy bajo contenido en carbono, que se crearon para evitar el fenómeno de corrosión intergranular (AISI 304L, AISI 316L). Por otro lado, están los grados aleados con nitrógeno para aumentar su resistencia mecánica (AISI 304N, AISI 316N), así como los grados estabilizados con titanio o con niobio (AISI 321, AISI 347). Por último, están también los grados resistentes a la oxidación en base a su mayor contenido en cromo (AISI 308, AISI 309, AISI 310), a los que también habrá que añadir más proporción de níquel para asegurar la microestructura austenítica.

En general, los aceros inoxidable austeníticos son aceros muy dúctiles que se pueden endurecer por deformación en frío. Este proceso de endurecimiento por deformación en frío es mucho más acusado en el AISI 301 debido a su menor contenido en níquel. Este bajo contenido en níquel del AISI 301 provoca que la estructura austenítica sea menos estable a temperatura ambiente que la de otros aceros con mayor contenido en níquel,

transformándose parcialmente la austenita en martensita durante el proceso de deformación en frío.

Uno de los problemas típicos que se pueden presentar en los aceros inoxidable austeníticos es la corrosión intergranular, fenómeno conocido también como sensibilización del acero.

El proceso de sensibilización suele estar ligado a los calentamientos a que se ven sometidas aquellas zonas afectadas térmicamente por un proceso de soldadura en los aceros, de manera que un acero sensibilizado puede sufrir corrosión intergranular en ambientes donde normalmente no deberían tener ningún tipo de corrosión.

El proceso de corrosión intergranular en los aceros austeníticos ocurre cuando estos aceros permanecen durante un cierto tiempo en un rango de temperatura entre 600°C y 800°C, o cuando hayan sido enfriados lentamente durante este rango térmico. Cuando ocurren estas circunstancias se produce una precipitación intergranular (entre las juntas de granos de austenita) de compuestos de carburos de cromo, de manera que las zonas adyacentes a donde se producen estos precipitados quedan muy empobrecidas en cromo (porcentaje en Cr < 12%), por lo que dejan de ser inoxidable al carecer de la protección del cromo y quedan expuestos a la corrosión.

Fuera del rango de temperatura entre los 600 °C y 800 °C no ocurre este fenómeno. En efecto, por encima de los 900 °C no puede producirse la precipitación dado que el carbono y el cromo se disuelven perfectamente en la austenita, y por otro lado, a temperaturas inferiores a los 600 °C, la difusión es tan lenta que la precipitación es imperceptible.

Para evitar los fenómenos de corrosión intergranular en los aceros auténticos se suelen utilizar enfriamientos bruscos en agua en el recocido de los aceros, o bien, se pueden emplear aceros con bajo contenido de carbono (con un porcentaje de C < 0,03%), dado que a medida que se reduce el contenido en carbono en el acero la precipitación de carburos se hace más lenta.

Otra forma efectiva de evitar los riesgos de corrosión intergranular de los aceros inoxidable es el uso de pequeñas adiciones de elementos fuertemente carburígenos (como el titanio, niobio o tántalo) en los grados, denominados estabilizados: AISI 321 y AISI 347. En estos aceros los carburos que precipitan en las regiones susceptibles son del tipo TiC o bien NbC, de manera que las regiones adyacentes mantienen suficiente contenido en cromo sin precipitar como para evitar la corrosión local.

Cuando un acero inoxidable haya sufrido de sensibilización, es decir, de corrosión intergranular por precipitación de carburos de cromo, este se puede recuperar aplicando al acero un calentamiento de solubilización hasta mantenerlo en un rango de temperatura de 1000 °C a 1100 °C, seguido de un enfriamiento rápido en agua.

Por último, recordar que la resistencia a la oxidación a alta temperatura de los aceros inoxidable es función directa de su contenido en cromo. De este modo los aceros con menos de 18% de cromo se deben utilizar en aquellas aplicaciones donde las temperaturas sean inferiores a 800°C, mientras que cuando se requieran aceros que soporten temperaturas superiores a los 1000 °C, aceros denominados refractarios, habrá que recurrir a tipos con un contenido en cromo en torno al 25%.

El acero que se implementó para el reactor, el ciclón y el intercambiador de calor es el acero inoxidable austenítico AISI 316L. La composición química se detalla en la Tabla 6. Las aplicaciones del mismo son en la industria química y petroquímica, industria alimentaria, farmacéutica y textil, adornos arquitectónicos, aplicaciones con soldadura, tubos y calderería y cisternas de vehículos. En la Tabla 7 se visualiza las propiedades físicas.

Tabla 6 Composición química del acero inoxidable AISI 316L

Composición química del acero inoxidable AISI 316L	
C	≤ 0,03
Si	≤ 0,75
Mn	≤ 2,00
P	≤ 0,045
S	≤ 0,0015
Cr	16,50-18,00
Mo	2,00-2,50
N	≤ 0,10
Ti	-
Ni	10,80–13,00

Tabla 7 Propiedades físicas del acero inoxidable AISI 316L

	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
Mod. Elasticidad (GPa)	200	194	186	179	172	165
Coefficiente medio dilatación térmica entre 20°C (10⁻⁶ k⁻¹)	-	16	16,5	17	17,5	18
Conductividad térmica (W/m K)	15	16	17,5	19	21	22,5
Resistividad eléctrica (Ω mm² /m)	0,75	0,82	0,95	1,05	1,12	1,19

A 20 °C el AISI 316L presenta una densidad de 8 kg/dm³ y un calor específico de 500 j/kg.K. En la Tabla 8 se muestran los consumibles recomendados para la soldadura de este acero.

Tabla 8 Los consumibles recomendados para el acero inoxidable AISI 316L

Electrodos revestidos	Alambres y varillas	Electrodos huecos
E 19 12 3 L	G 19 12 3 L (GMAW)	T 19 12 3 L
	W 19 12 3 L (GTAW)	
ER 36 L (Si)	P 19 12 3 L (PAW)	ER 316 L (Si)
	S 19 12 3 L (SAW)	
ER 317 L (Si)	ER 316 (Si)	ER 317 L (Si)
	ER 317 (Si)	

La corrosión bajo tensiones puede ocurrir en los aceros inoxidables austeníticos cuando están sometidos a esfuerzos de tracción en medios con iones cloruros y temperaturas superiores a 60 °C.

En aplicaciones que conlleven un uso continuado en el rango de temperaturas de 405 °C a 850 °C, u operaciones de soldadura con riesgo de sensibilización, se recomienda usar este tipo de acero (aleaciones de bajo C) para así minimizar el riesgo de corrosión intergranular.

La máxima temperatura de servicio para estos tipos de aceros en aplicaciones continuas es de 920 °C. para ciclos térmicos intermitentes la máxima temperatura de servicio es de 870 °C.

3. Soldadura

Las estructuras se forman mediante conjuntos de chapas o perfiles unidos entre si con enlaces capaces de soportar los esfuerzos que se transmiten entre las piezas. El objeto principal de la unión es el de asegurar la mejor continuidad de las piezas, continuidad que será más perfecta cuanto más uniforme sea la transmisión del esfuerzo.

En todo proceso de soldadura normalmente se emplea alguna fuente de energía. Si esta energía es el calor, se pueden llegar a fundir los bordes de los metales, los cuales se mezclarán en estado líquido; si en vez de calor se aplica presión se produce deformación plástica, permitiendo el contacto íntimo entre las dos superficies y por lo tanto la unión metalúrgica.

Otro concepto importante a considerar es el de la soldabilidad. Este término hace referencia a la mayor o menor facilidad con que un metal permite que se obtengan soldaduras sanas y homogéneas, que respondan a las necesidades para las que fueron diseñadas.

La calidad de una soldadura también depende de la combinación de los materiales usados para el material base y el material de relleno. No todos los metales son adecuados para la soldadura, y no todos los metales de relleno trabajan bien con materiales bases aceptables.

3.1 Técnicas de soldadura

La operación de soldar se efectúa de diversas maneras. Los procesos comunes de importancia comercial se mencionan más abajo. En esta tipificación de procesos se ha tomado en cuenta la fuente de energía utilizada en el momento de la soldadura.

3.1.1 Soldadura por gas

Se trata de una técnica bastante simple, económica y popular, aunque su utilización en procesos industriales ha disminuido últimamente. La más conocida es aquella que utiliza la combustión de acetileno en oxígeno, llamada soldadura autógena, que permite alcanzar una llama que supera los 3200 °C. Las principales ventajas son el bajo costo y la capacidad de movilidad de los equipos. Como desventaja tiene el tiempo que tardan los materiales para enfriarse.

3.1.2 Soldadura por resistencia

En esta técnica se aplica una corriente eléctrica directamente a las piezas que deben ser soldadas, lo que permite fundirlas y unir las. Requiere de equipos costosos y sus aplicaciones son bastante limitadas. Las técnicas más utilizadas son las llamadas soldadura por puntos y soldadura de costura, que permiten unir varias piezas de metal fino, ya sea en pequeñas uniones o en soldaduras largas y continuas.

3.1.3 Soldadura por rayo de energía concentrada

En esta técnica se puede utilizar un rayo láser concentrado o un haz de electrones disparado en el vacío para lograr soldaduras de alta precisión. Es un proceso muy costoso, pero fácil de automatizar. La técnica es extremadamente rápida, lo que la hace ideal para procesos de fabricación en masa.

3.1.4 Soldadura de estado sólido

Son técnicas que permiten unir las piezas sin fundirlas. Una de ellas es la aplicación de ondas de ultrasonido en una atmósfera de presión alta, muchas veces utilizada para la unión de materiales plásticos. Otra técnica es la soldadura explosiva, que consiste en colisionar dos piezas a alta velocidad, lo que produce que los materiales se plastifiquen y se unan sin generar demasiado calor.

3.1.5 Soldadura por arco eléctrico

Esta es una de las técnicas más desarrolladas, y existen muchos procesos que se basan en este principio. La soldadura por arco se basa en dos conductores en contacto a los que se los somete a una diferencia de potencial, estableciéndose entre ambos una corriente. Si posteriormente se los separa, se provoca una chispa, cuyo efecto es ionizar el gas o el aire que la rodea, permitiendo así el paso de la corriente, a pesar de no estar los conductores en contacto. Con esto se logra crear entre ellos un arco eléctrico por transformación de la energía eléctrica en energía luminosa y calorífica. El calor provocado por el arco no solo es intenso, sino que además está muy localizado, lo que resulta ideal para la operación de soldar. Las temperaturas alcanzadas son del orden de 3500 °C. En el circuito eléctrico formado por los electrodos y el arco, la intensidad de corriente depende de la tensión y de la resistencia del circuito. Si los electrodos se acercan o se separan variará la resistencia y la intensidad y, por lo tanto, la energía se transformará en calor, con lo que la soldadura no será uniforme.

Los procedimientos de soldadura en arco pueden agruparse en tres:

- *Con electrodos de carbono:* no se utiliza en la estructura metálica. El arco salta entre un electrodo de carbono y la pieza a soldar. Se complementa con material de aporte.
- *Con electrodo de tungsteno:* el arco salta entre dos electrodos de tungsteno en atmósfera de hidrógeno. El calor del arco disocia las moléculas de hidrógeno, que vuelven a soldarse al contacto con las piezas a soldar, desprendiendo una gran cantidad de calor. Este calor funde las piezas permitiendo que se efectúe la soldadura en ausencia del oxígeno y el nitrógeno del aire.
- *Con electrodo metálico revestido:* es el procedimiento de unión normalmente implementado en la construcción metálica. La unión se consigue al provocar un arco eléctrico entre las piezas a unir y un electrodo que sirve de material de aporte. El operario establece un contacto inicial entre el electrodo y la pieza a soldar, con lo que se inicia un flujo de corriente. A continuación, se retira ligeramente el electrodo y se establece un arco, que funde el electrodo y los bordes de la pieza a unir, formándose el cordón de soldadura.

Dentro de esta técnica de soldadura existen variados procesos que se mencionan a continuación:

- El proceso de soldadura por arco de carbono (CAW).
- El proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).
- El proceso de soldadura por arco de plasma (PAW).
- El proceso de soldadura de montante (SW).
- El proceso de soldadura por electro gas (EGW).
- El proceso de soldadura por electro escoria (EW).
- El proceso de soldadura por arco metálico protegido (SMAW).
- El proceso de soldadura por arco metálico con gas (GMAW).
- El proceso de soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW).
- El proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW).

El proceso de soldadura por arco metálico protegido (SMAW)

Es en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

El núcleo del electrodo cubierto consiste en una varilla de metal sólida de material o colado, o bien una varilla fabricada encerrando metal en polvo en una funda metálica. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión. Las funciones principales de la cobertura del electrodo son estabilizar el arco y proteger el metal derretido de la atmósfera por medio de los gases que se crean cuando el recubrimiento se descompone por el calor del arco.

La composición de la cobertura del electrodo varía dependiendo del tipo de electrodo.

Principios

La soldadura por arco de metal protegido aprovecha el calor del arco para derretir el metal base y la punta de un electrodo consumible cubierto. El electrodo y la pieza de trabajo forman parte de un circuito eléctrico que se muestra en la Figura 14. Dicho circuito comienza con la fuente de potencia eléctrica e incluye los cables de soldadura, un porta-electrodos, una conexión con la pieza de trabajo, la pieza de trabajo y el electrodo de soldadura por arco. Uno de los dos cables de la fuente de potencia se conecta a la pieza de trabajo; y el otro se conecta al porta-electrodos.

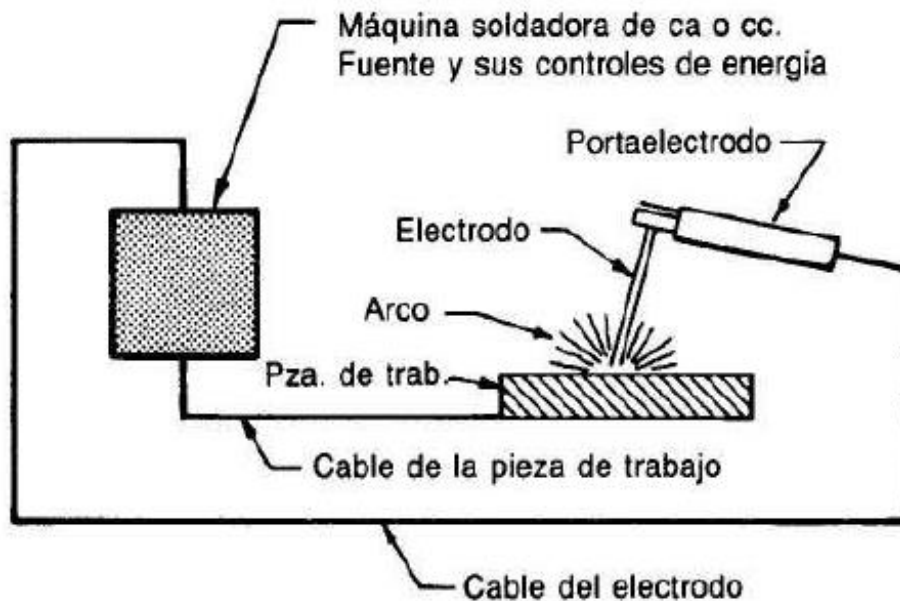


Figura 14 Circuito de soldadura SMAW

Electrodos recubiertos

Dependiendo del tipo de electrodo que se use, el recubrimiento desempeña una o más de las siguientes funciones:

1. Provee un gas para proteger el arco y evitar una contaminación exclusiva del metal de aporte derretido por parte de la atmosfera.
2. Suministra limpiadores, desoxidantes y agentes fundentes para purificar la soldadura y evitar un crecimiento excesivo de granos en el metal de soldadura.
3. Establece las características eléctricas del electrodo.
4. Proporciona un manto de escoria que protege la soldadura caliente de aire y mejora las propiedades mecánicas, la forma del cordón y la limpieza superficial de dicho metal.
5. Constituye un medio para añadir elementos de aleación que modifiquen las propiedades mecánicas del metal de soldadura.
6. En todos los casos, la cobertura contiene la mayor parte de los materiales de protección, limpieza y desoxidación. La mayor parte de los electrodos para SMAW tienen un núcleo de metal sólido.

Metales base

El proceso SMAW se usa para aplicaciones de unión y recubrimiento sobre diversos metales base. Hay electrodos para los siguientes metales base:

1. Aceros al carbono.
2. Aceros de baja aleación.
3. Aceros resistentes a la corrosión.
4. Hierros colados (dúctiles y grises).
5. Aluminio y aleaciones de aluminio.
6. Cobre y aleaciones de cobre.
7. Níquel y aleaciones de níquel.

Electrodos recubiertos

Los electrodos se clasifican con base en la composición química o en las propiedades mecánicas, o ambas cosas, de su metal de soldadura sin diluir. Los electrodos de acero al carbono, acero de baja aleación y acero inoxidable también se clasifican de acuerdo con el tipo de corriente de soldadura con la que trabajan mejor, y en ocasiones de acuerdo con las posiciones de soldadura en las que pueden emplearse.

El recubrimiento de los electrodos para SMAW es higroscópico (absorben con facilidad y retienen la humedad), aunque algunos son más higroscópicos que otros. La humedad que captan al exponerse a una atmósfera húmeda se disocia durante la soldadura procediendo hidrógeno y oxígeno. Los átomos de hidrógeno se disuelven en la soldadura y en la zona térmicamente afectada, y pueden causar agrietamiento en frío. Este tipo de grietas es más común en los metales base de aceros endurecibles y en los metales de soldadura de aceros de alta resistencia. Un proceso de humedad en la cobertura de los electrodos puede originar porosidad en el metal de soldadura depositado.

Al fin de minimizar los problemas de humedad, es preciso empacarlos, almacenarlos y manejarlos correctamente. Los electrodos que han estado expuestos demasiado tiempo a la intemperie deben cocerse a una temperatura bastante alta para que expulsen la humedad absorbida, sin embargo, un calentamiento excesivo puede dañar la cobertura del electrodo.

Ventajas

- Equipo simple, portátil y de bajo costo.
- Aplicable a una amplia variedad de metales, posiciones de soldadura y electrodos.
- Posee tasas de deposición del metal relativamente altas.
- Adecuada para aplicaciones en exteriores.

Desventajas

- El proceso es discontinuo debido a la longitud limitada de los electrodos.
- Por tratarse de una soldadura manual, requiere gran pericia por parte del soldador.
- La soldadura puede contener inclusiones de escoria.
- Los humos dificultan el control del proceso.

3.2 Tipos de uniones

Las partes que se unen para producir la construcción soldada puede estar en la forma de placa rolada, lámina, forma estructural, tubo, o pueden ser fundiciones, forjas o lingotes. Es la colocación de estos miembros lo que define las uniones.

Hay cinco tipos básicos de uniones que se usan para juntar dos miembros entre sí para soldarlos.

- *Unión a tope*: se realiza entre dos miembros alineados aproximadamente en el mismo plano.
- *Unión en esquina*: entre dos miembros localizados aproximadamente en ángulo recto entre sí.
- *Unión a traslape*: entre dos miembros que se traslapan en planos paralelos.
- *Unión en T*: entre dos miembros localizados aproximadamente en ángulo recto en la forma de una T.
- *Unión en orilla o de canto*: unión entre las orillas de dos o más miembros paralelos o casi paralelos.

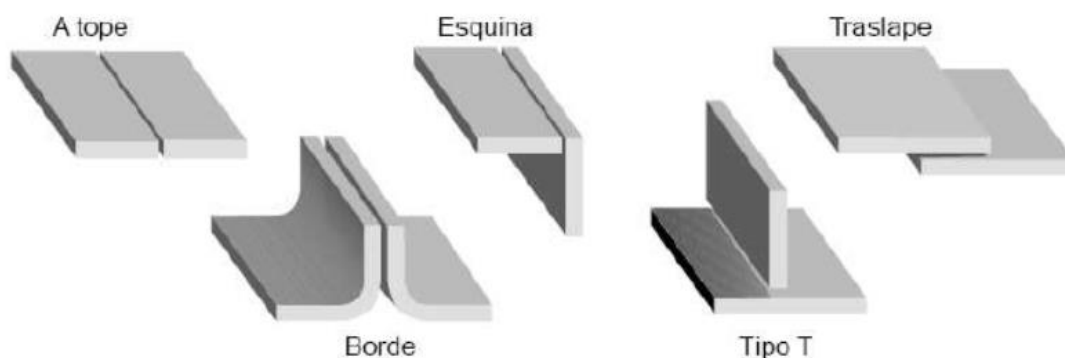


Figura 15 Tipos de uniones soldadas

3.3 Tipos de soldadura según la forma geométrica

Soldadura de filete: es el tipo más utilizado y es llamado así debido a la forma de su sección transversal. El filete se considera sobre la unión y se define como “una soldadura de sección transversal aproximadamente recto entre sí”.

Soldadura de tapón o de ranura: se utiliza con agujeros o ranuras preparadas. Si el agujero es redondo, se considera como una soldadura de tapón, si es alargado, como una soldadura de ranura.

Soldadura de protección o de punto: estos tipos de soldaduras se pueden aplicar por distintos procesos que cambian la soldadura real. Si se usa el proceso de haz de electrodos, rayo láser o de arco, el metal se funde desde un miembro hacia el segundo.

Soldadura de costura: es semejante a la de punto. La geometría de la soldadura está influida por el proceso de soldadura que se emplee. No hay agujeros preparados ni en la soldadura de un punto ni en la de costura.

Soldadura de bisel: es el segundo tipo más utilizado en la soldadura. Se define como una soldadura ejecutada en el bisel entre dos miembros que se han de unir.

Soldadura de respaldo: es un tipo especial de soldadura ejercida en el lado trasero o lado de raíz de una soldadura previamente hecha. La raíz de la soldadura original se bisela o se hace surco en ella, se limpia o cincela hasta llegar a metal macizo antes de que se haga la soldadura de respaldo. Esto aumenta la calidad de la unión y protege al metal.

Soldadura de revestimiento: este es un tipo de soldadura compuesto de uno o más cordones depositados en el metal base, en forma de superficie interrumpida. Se usa para aumentar las dimensiones superficiales, para aportar metales de distintas propiedades.

Soldadura de brida en orilla: esta se usa principalmente para uniones de láminas o placas delgadas.

Soldadura con brida en esquina: también se usa para partes de lámina o placas delgadas. En ambas bases, se deben preparar las partes según los detalles específicos de la unión.

3.4 Verificación de la resistencia de la soldadura

La verificación de la soldadura aplicada tanto en el reactor como en el ciclón y el intercambiador de calor no será realizada. Esto se debe a que en estos componentes se ha empleado un tipo específico de soldadura conocido como "a tope de penetración completa". Esta elección responde a la necesidad de asegurar la hermeticidad y la integridad estructural de dichos elementos, evitando cualquier posibilidad de fugas del fluido que circulará por su interior. Por el mismo motivo, se requiere que la soldadura abarque la longitud total de las piezas en todos los casos, garantizando así una conexión continua y segura que cumpla con los estándares de funcionamiento requeridos.

Se tomará una parte de la estructura soporte donde el cordón de soldadura es acotado en su longitud y se procede a verificar que dicho cordón de soldadura resista a los esfuerzos que está sometido.

Se implementa una fuerza de $F=41,21kg$, que es igual a la reacción obtenida en el extremo del banco soporte donde se encuentra el intercambiador de calor. El cálculo de esta fuerza se desarrolla en el Capítulo 8.

La verificación del cálculo de soldadura se realizó mediante la norma CIRSOC 301 EL 304. Analizando la Figura 16 se aprecia que la disposición del cordón de soldadura respecto a la fuerza hace que la misma realice un esfuerzo de corte, además se contempla que la soldadura es de filete, por lo tanto, para este tipo de soldadura en la cual se produce un corte en el área efectiva, el material a considerar debe ser el de base y el del electrodo.

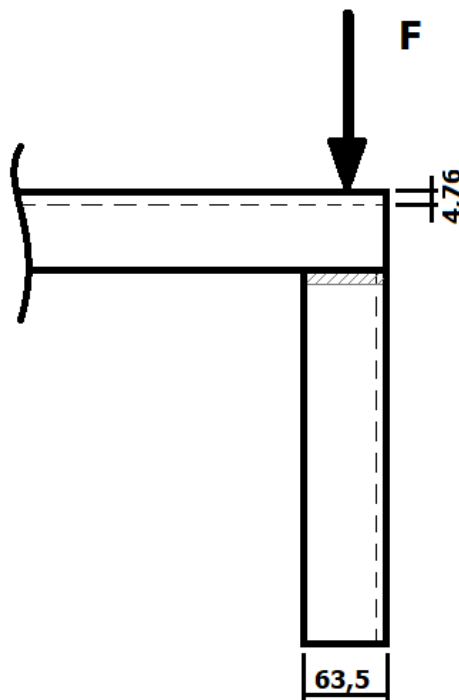


Figura 16 Diagrama simplificado de la soldadura que se verifica

El electrodo que se seleccionó fue el E 19 12 3 L, el cual tiene como valor de resistencia $131 MPa$. El valor del factor de resistencia es $\phi=0,6$; y la resistencia nominal que se considera es $0,6F_{EXX}$. La resistencia de diseño se calcula con la ecuación 2.

$$R_d = \phi * F_w * A_w * (10^{-1}) \quad (2)$$

Donde F_w es la resistencia nominal, A_w es el área efectiva de soldadura, la cual es el producto del espesor efectivo de garganta por la longitud efectiva del filete. El espesor efectivo de garganta es la distancia más corta entre la raíz y la cara teórica del filete, por

lo tanto, es igual a $0,707*d$, donde d es el cateto de la soldadura. En un primer caso se propone el valor de d igual a la unidad, y el valor de la longitud efectiva se plantea del largo del perfil utilizado, es decir, $l=6,35\text{ cm}$.

$$A_w = 0,707 * d * l \quad (3)$$

$$A_w = 0,707 * 1 * 6,35 = 4,49\text{ cm}^2 \quad (3a)$$

$$F_w = 0,6 * F_{E19} \quad (4)$$

$$F_w = 0,6 * 131\text{ MPa} = 78,6\text{ MPa} \quad (4a)$$

Reemplazando los valores del factor de resistencia y la resistencia nominal en la ecuación 2, con respecto al área efectiva de soldadura se la hace igual a la unidad para luego calcular el cateto necesario. Se tiene:

$$R_d = 0,6 * 78,6 * 1 * (10^{-1}) = 4,716\text{ kN/cm}^2 \quad (2a)$$

La tensión de corte (σ_c) que se produce debida a la fuerza actuante F , pasada a kN , se calcula mediante la ecuación 5.

$$F=41,21\text{ kg}=404,13\text{ N}=0,40413\text{ kN}.$$

$$\sigma_c = \frac{1,5 * F * 10}{A_w} \quad (5)$$

$$\sigma_c = \frac{1,5 * 0,40413\text{ kN} * 10}{4,49\text{ cm}^2} = 1,35\text{ MPa} \quad (5a)$$

$$d_{nec} = \frac{\sigma_c * (10^{-1})}{R_d} \quad (6)$$

$$d_{nec} = \frac{1,35\text{ MPa} * (10^{-1})}{4,716\text{ kN/cm}^2} = 0,0286\text{ cm} \quad (6a)$$

Por lo tanto, el cateto del filete de soldadura debe ser como mínimo de $0,28 \text{ mm}$. Para este caso particular el espesor $d=4,76 \text{ mm}$, por lo que se comprueba que la soldadura VERIFICA.

Capítulo 4: Reactor

1. Entrada de alimentación

La materia prima que se introduce en el reactor es HDPE, normalmente se plantearon cargar entre 5 y 6 kg, pero para realizar los cálculos se va a suponer el valor máximo que es de 9 kg, lo cual se realiza de manera manual. Este tipo de pirolizador opera bajo condiciones de presión atmosférica, lo cual simplifica el diseño. Una vez que la materia prima ha sido introducida en el reactor, este se sella heréticamente mediante una junta de grafito que se ubica en su tapa. Tras el sellado, el reactor comienza a rotar para proceder con el calentamiento uniforme del material. La Figura 17 proporciona una representación esquemática del reactor en estado abierto, destinada a la carga de la materia prima.

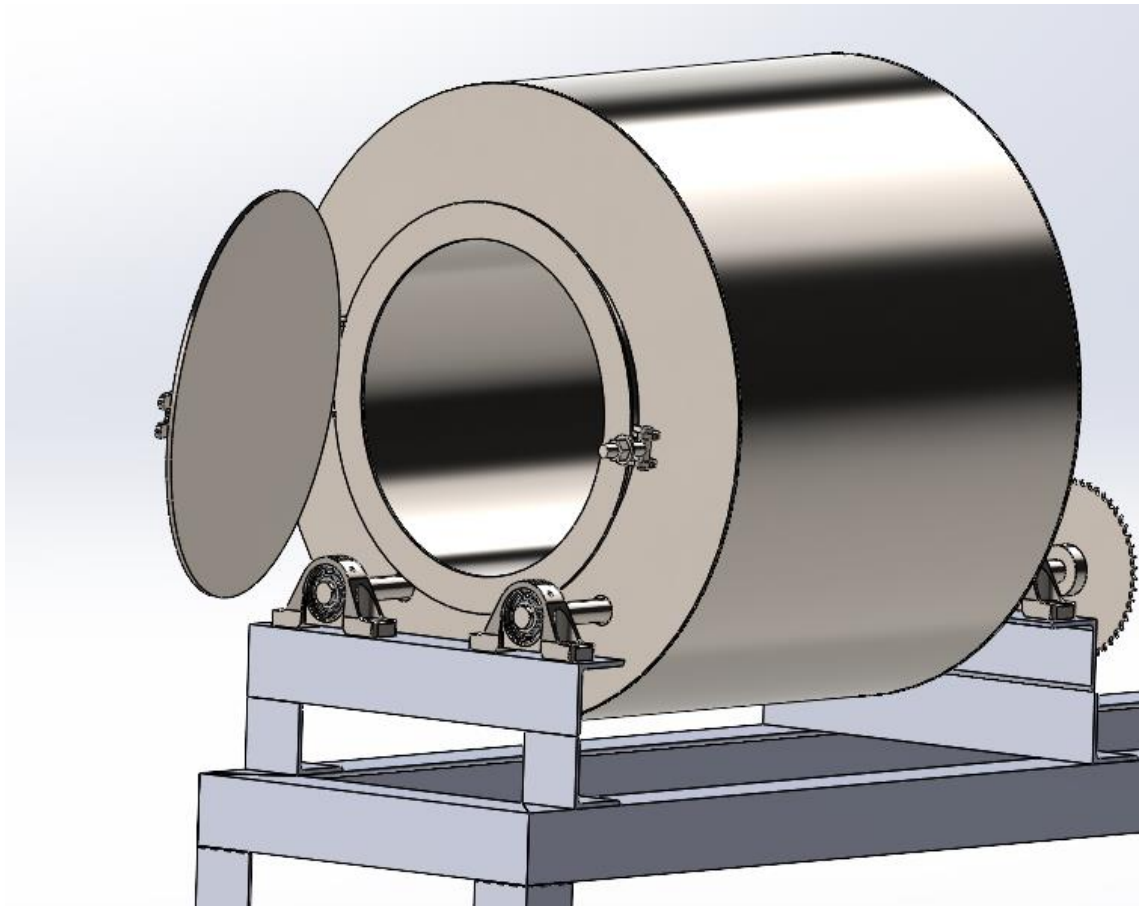


Figura 17 Conjunto montado de reactor abierto para la carga de la biomasa en el banco de ensayos

2. Partes y dimensionamiento del reactor

El reactor es de tipo semi-batch o semicontinuo, es decir, que los productos se desalojan de manera continua una vez que son generados, pero la biomasa es ingresada antes de que inicie el proceso. Consta de cuatro conjuntos principales, además de las piezas comerciales que son el quemador y el material aislante el cual se detalla más adelante. Los conjuntos principales con sus respectivos componentes son:

1. Conjunto soldado cuerpo calentador
 01. Cilindro calentador
 02. Tapa delantera
 03. Tapa trasera
2. Conjunto montado cuerpo reactor
 01. Perno
 02. Perno traba
 03. Lisa M 12
 04. Tuerca M 12x1.5
 21. Conjunto soldado tapa reactor
 01. Tapa reactor
 02. Planchuela para cierre tapa
 03. Planchuela bisagra tapa
 22. Conjunto soldado cilindro reactor
 01. Cilindro reactor
 02. Anillo reactor
 03. Cono reactor
 04. Caño reactor
 05. Guía reactor
 06. Planchuela para cierre
 07. Planchuela bisagra
3. Conjunto montado eje traccionado
 01. Eje largo
 02. Engranaje
 03. Guía eje
 04. Rodamiento UC 204
4. Conjunto montado eje apoyo
 01. Eje corto
 02. Guía eje
 03. Rodamiento UC 204

2.1 Dimensionamiento del reactor

Se dimensionó el reactor en función de la cantidad de materia prima que se quería analizar. Al ser un prototipo, se consideró que una masa de 9 kg por batch era adecuada. Se utilizó el valor de densidad aparente del polietileno para estimar el volumen necesario para procesar la cantidad de masa deseada. De bibliografía se obtiene que la densidad aparente del polietileno es $0,35 \text{ g/cm}^3$.

Por lo tanto, para poder ingresar 9 kg de plástico es necesario un volumen de 26 L. Implementando un criterio conservador se optó por definir un volumen de 30 L.

Además, se implementó un diámetro práctico con el fin de facilitar la carga de material, pero al mismo tiempo priorizando la longitud del cilindro buscando maximizar la superficie de contacto expuesta al calor. Las dimensiones resultantes son: $D=300 \text{ mm}$; $l=435 \text{ mm}$.

2.2 Verificación del espesor

Para abordar esta parte del proyecto se realiza un análisis de la relación entre la temperatura en el interior del reactor y el efecto que la misma produce en el material designado. Para ello, se considera que la temperatura interna del reactor es de 700 K, mientras que la temperatura ambiente exterior se mantiene a 300 K.

$$\Delta T = T_{int} - T_{ext} \quad (7)$$

$$\Delta T = 700 - 300 = 400 \text{ K} \quad (7a)$$

Esta diferencia de temperatura juega un papel crítico en la evaluación de la respuesta del material estructural a las variaciones térmicas. Se sabe que la variación de temperatura, en combinación con el coeficiente de dilatación térmica del acero ($\alpha=1,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), influye directamente en la deformación unitaria del material. La deformación unitaria se define como el cambio relativo en longitud con respecto a la longitud inicial del material debido a la variación de temperatura.

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha * \Delta T \quad (8)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = 1,6 * 10^{-5} * 400 = 0,0064 \quad (8a)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \quad (9)$$

$$\varepsilon = 0,0064 \quad (9a)$$

Esta deformación unitaria, cuando se multiplica por el módulo de elasticidad del acero ($E=2100000 \text{ N/m}^2$), proporciona la tensión inducida en la sección transversal del material.

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (10)$$

$$\sigma = 0,0064 * 2100000 = 13440 \text{ N/m}^2 \quad (10a)$$

Es importante destacar que para garantizar la seguridad y la adecuación del espesor del material utilizado en el reactor es crucial comparar la tensión resultante con la tensión de fluencia del acero ($\sigma_f=33*10^6 \text{ N/m}^2$).

$$\sigma \ll \sigma_f \quad (11)$$

$$13440 \text{ N/m}^2 \ll 33000000 \text{ N/m}^2 \quad (11a)$$

De la ecuación 11 se demuestra de manera concluyente que la relación entre el espesor y el diámetro del material seleccionado es adecuada para resistir las tensiones inducidas por las variaciones de temperatura en el reactor. Por lo tanto, retomando a la ecuación 9 y despejando el valor del espesor de la misma se tiene:

$$\Delta L = 0,0064 * 300 = 1,92 \text{ mm} \quad (9b)$$

Con un espesor de $1,92 \text{ mm}$ se comprueba la capacidad de resistencia del componente a la carga térmica generada. Por lo tanto, se consideró dicho espesor para la chapa de acero inoxidable 316L para el diseño del reactor. Sin embargo, después de un análisis comercial en el mercado se ha identificado un espesor de $3,2 \text{ mm}$ disponible. Esta chapa de mayor espesor proporciona un margen de seguridad significativo en comparación con las condiciones operativas y de carga térmica a las que estará expuesto el componente.

Por lo tanto, se tomó la decisión de implementar una chapa de acero inoxidable 316L con un espesor de $3,2 \text{ mm}$ en lugar de la opción inicial. Esta elección se basa en el principio de precaución y en la priorización de la seguridad y la integridad del componente, garantizando así estar completamente respaldados ante las condiciones de operación y carga térmica.

Pasando el valor de C de kg a kN se tiene: $C=7,2 kN$.

Por el diámetro de $30 mm$ y el valor de C el rodamiento recomendado es $UCP 206$.

Dimensiones	
Diámetro del eje	30 mm
Altura del centro (soporte de pie)	42.9 mm
Ancho total del soporte	45 mm
Distancia del centro entre los orificios para tornillos	121 mm
Ancho del rodamiento, total	38.1 mm
Rendimiento	
Capacidad de carga dinámica básica	19.5 kN
Capacidad de carga estática básica	11.4 kN
Velocidad límite	5 000 r/min
Note	Velocidad límite con tolerancia de eje h6

Figura 51 Propiedades del rodamiento UCP 206

7. Selección de aislante

Los aislamientos térmicos se utilizan con los siguientes fines: *controlar la transferencia de calor, retardar el enfriamiento, proteger contra incendio, controlar el fuego y conservar la energía.*

Mediante el uso de materiales con baja capacidad de conducción térmica, los aislantes desempeñan un papel fundamental al resguardar tanto las superficies que irradian calor, como las que lo absorben, como en el caso de las paredes de hornos y refrigeradores respectivamente. El propósito principal radica en reducir al máximo los flujos de calor, ya sea para abordar aspectos técnicos como la seguridad y la prevención de condensación, o para enfrentar desafíos económicos, como la eficiencia energética. Esto se traduce en la búsqueda de un ambiente confortable y la capacidad de mantener temperaturas estables en diversos procesos.

Se define conductividad térmica como la capacidad de los materiales de dejar pasar el calor. Es una propiedad intrínseca de cada material que varía en función de la temperatura a la que se efectúa la medida.

7.1 Tipos de aislamientos térmicos

- Fibrosos (lana mineral, fibra de vidrio, fibra cerámica)
 - Son materiales procesados a partir de la fusión de materiales a base de sílice, alúmina, escoria o roca basáltica, convertidos en fibras por proceso de soplado o centrifugado, para ser distribuidas de modo multidireccional.
- Celulares (vidrio espumado, poliestireno expandido, elastómeros, espuma fenólica, poliisocianurato)
 - Compuestos por pequeñas celdas individuales separadas entre sí. El material celular puede ser vidrio o plástico espumado.
- Granulados (Vermiculita expandida, silicato de calcio, perlita expandida, tierra diatomácea)
 - Compuestos por nódulos que contienen espacios vacíos. No son considerados como celulares debido a que el gas (aire) puede transitar entre los espacios individuales. Son combinados con fibras de refuerzo con lo que se consigue rigidez, estructura y forma.

7.2 Formas en las que se presentan los aislamientos

Los aislamientos térmicos pueden ser producidos en una variedad de formas de acuerdo a su función de acuerdo a su función y aplicación específica.

- *Rígidos*: placas y bloques en forma rectangular y preformados para tubería (medias cañas, bloques curvos).
- *Flexibles*: preformados en hojas, rollos, tubos, o en unidades que tienen un alto grado de flexibilidad.
- *Colchonetas flexibles*: están cubiertos por una o ambas caras con un respaldo rígido (foil de aluminio, malla de gallinero, metal desplegado) o entretejidos – agujados (Mantas).
- *Cementos monolíticos*: producidos con materiales fibrosos y granulares cementados con bentonita, que mezclados con agua generan masas viscosas de gran adherencia.
- *Espumado en sitio*: espuma de poliuretano vaciada o espumada en sitio para cubrir o rellenar áreas irregulares.

7.3 Mecanismo del aislamiento térmico

Los materiales aislantes contienen aire aprisionado, en pequeños poros, entre las fibras o copos. Este aire aprisionado en pequeñas células retarda el flujo de calor, debido a que poco calor es transferido por convección de un lado de la célula al otro. El material

aislante debe ser lo suficientemente opaco, o reflexivo, para reducir la transmisión de calor por radiación.

7.4 Características de los materiales aislantes

- *Bajo coeficiente de conductividad térmica (k):* cuanto menor es “ k ”, menor será el espesor necesario para una misma capacidad aislante.
- *Baja masa específica:* con el fin de reducir las solicitaciones mecánicas sobre la estructura del equipo aislado, un aislante de baja densidad presenta un menor almacenamiento de calor durante el calentamiento del equipo.
- *Resistencia mecánica compatible con el uso:* el aislamiento debe ser dimensionado para soportar las solicitaciones mecánicas normales de su operación, sin deformarse.
- *Incombustibilidad:* el material aislante debe presentar bajo índice de propagación de llama.
- *Estabilidad química y física:* las propiedades físico-químicas del material aislante no se deben alterar en su vida útil.
- *Inercia química:* los materiales aislantes no deben presentar tendencias a reaccionar químicamente con otros materiales durante su utilización.
- *Baja higroscopicidad:* la absorción de agua, ya sea en estado líquido o vapor, resulta en un deterioro de la capacidad de aislamiento, por el aumento de la conductividad térmica. Un aislamiento completamente seco puede aumentar su conductividad en hasta 15 veces cuando es humedecido.

En el proyecto desarrollado se decidió implementar como aislante térmico lana mineral en forma flexible. A continuación, se describe brevemente.

7.5 Lana mineral

Es un material constituido por un entrelazado de filamentos de minerales pétreos que forman un tejido manteniendo entre ellos aire inmóvil. Dicha estructura permite obtener productos aislantes muy ligeros que, por su peculiar configuración, ofrecen elevados niveles de protección frente al calor, el ruido y el fuego.

Dentro de las lanas minerales se pueden distinguir dos tipologías principales: la *lana de vidrio* y la *lana de roca*. Ambas provienen de materias primas naturales, la primera se conforma a partir de arena silíceas y la lana de roca se compone de roca basáltica.

Al ser materiales de porosidad abierta pueden retener agua líquida en su interior, por lo que deben emplearse en aplicaciones que estén protegidas del contacto directo con el agua.

En la Figura 52 se puede apreciar el esquema gráfico que refleja el proceso de fabricación de la lana de roca, el cual es el material que se decidió implementar como aislante del reactor.

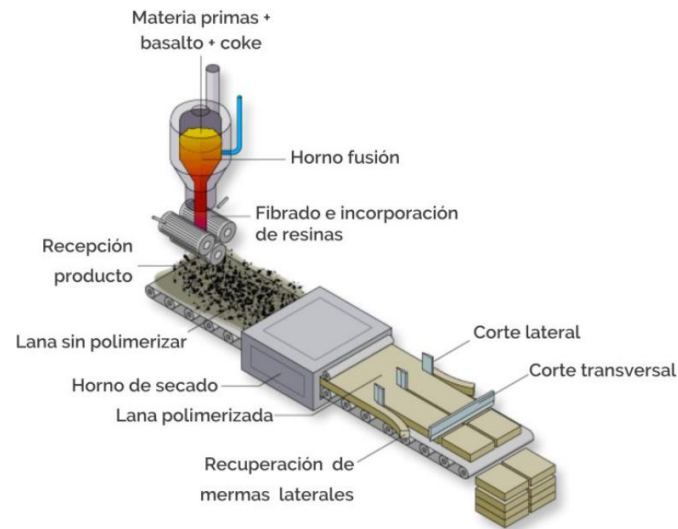


Figura 52 Esquema de fabricación de la lana de roca

Capítulo 5: Ciclón

Al salir el gas con partículas del reactor pasan por una válvula rotativa y luego al ciclón, al cual ingresa por un costado del mismo. La función del ciclón consiste en separar las partículas sólidas del gas, haciendo que las mismas decanten en un recipiente, el cual se encuentra en la parte inferior; mientras que el gas sale del ciclón por la parte superior para continuar el recorrido e ingresar al intercambiador. De ser necesario se pueden combinar varios ciclones para formar un sistema de ciclones de múltiples etapas; no es este el caso.

1. Principio de funcionamiento

La trayectoria del gas dentro del ciclón comprende una doble vórtice, en donde el gas “dibuja” una espiral descendente en el lado externo y ascendente en el lado interno (Figura 53). El gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espiral hasta el ápice de la sección cónica, luego asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado.

Por otra parte, las partículas sólidas se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las mismas, y quedan almacenadas en la parte inferior.

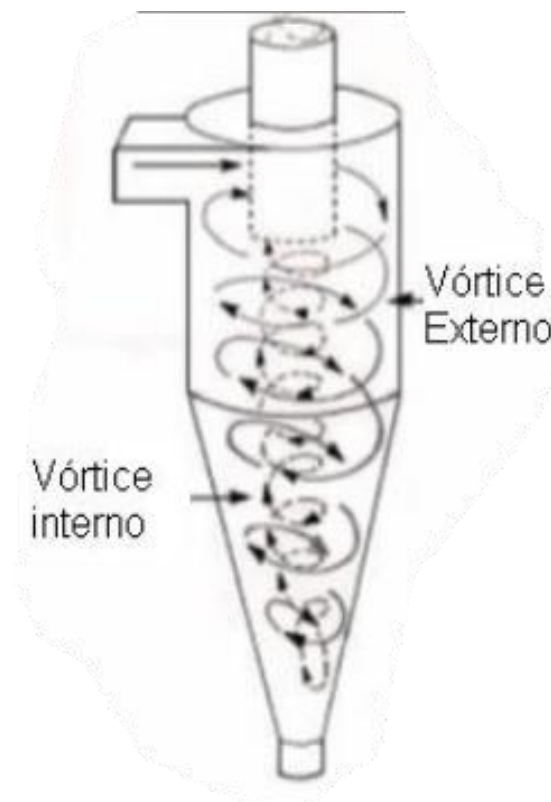


Figura 53 Vórtices en el ciclón

El diseño adecuado de la sección cónica de un ciclón introduce elementos cruciales para optimizar la eficiencia de su funcionamiento en la separación de partículas del flujo gaseoso. En este sentido, una característica esencial es la inducción de un cambio de dirección en el vórtice descendente que se forma en su interior. Este vórtice descendente, generado por la acción de la fuerza centrífuga debido a la rotación del gas en la cámara cilíndrica de entrada, juega un papel fundamental en el proceso de separación, ya que desplaza las partículas hacia las paredes del ciclón, permitiendo que el gas más limpio continúe su trayectoria ascendente hacia la salida superior.

Este cambio de dirección deliberado del vórtice descendente es clave para optimizar la separación de partículas. Al obligar al vórtice a modificar su dirección, se logra una distribución más efectiva de las partículas en las paredes del ciclón, minimizando su interferencia con el flujo de gas más limpio que se dirige hacia el centro del dispositivo.

A medida que el gas limpio asciende, las velocidades tangenciales más elevadas contribuyen a mantener las partículas más pesadas cerca de las paredes del ciclón, impidiendo su migración hacia el centro del vórtice ascendente. Este efecto es esencial para garantizar una separación eficiente, ya que evita la mezcla indeseada de partículas con el gas limpio que se dirige hacia la salida del ciclón.

En resumen, el diseño meticuloso de la sección cónica en un ciclón implica la manipulación deliberada del comportamiento de los vórtices descendente y ascendente para mejorar la eficiencia de la separación de partículas. El cambio de dirección controlado del vórtice descendente y el aumento de las velocidades tangenciales en el vórtice ascendente son elementos cruciales de esta estrategia, que busca optimizar la calidad del gas limpio obtenido y la efectividad general del proceso de separación en el ciclón.

2. Tipos de ciclones

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son:

- Ciclones de alta eficiencia
- Ciclones convencionales
- Ciclones de alta capacidad

Los márgenes de la eficiencia de remoción para los ciclones se basan, con frecuencia, en esa clasificación.

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de 5 μm con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar

mayores eficiencias con partículas más grandes. Estos tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas con partículas a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

Los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de $20\ \mu\text{m}$, aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Los multiciclones o ciclones con múltiples etapas han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95% partículas de $5\ \mu\text{m}$.

La Figura 54 identifica las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial. El diámetro del ciclón es la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones son una proporción de esta. La Tabla 18 presenta un resumen de las características de las familias de ciclones de entrada tangencial de alta eficiencia ya que es el ciclón elegido para el proyecto.

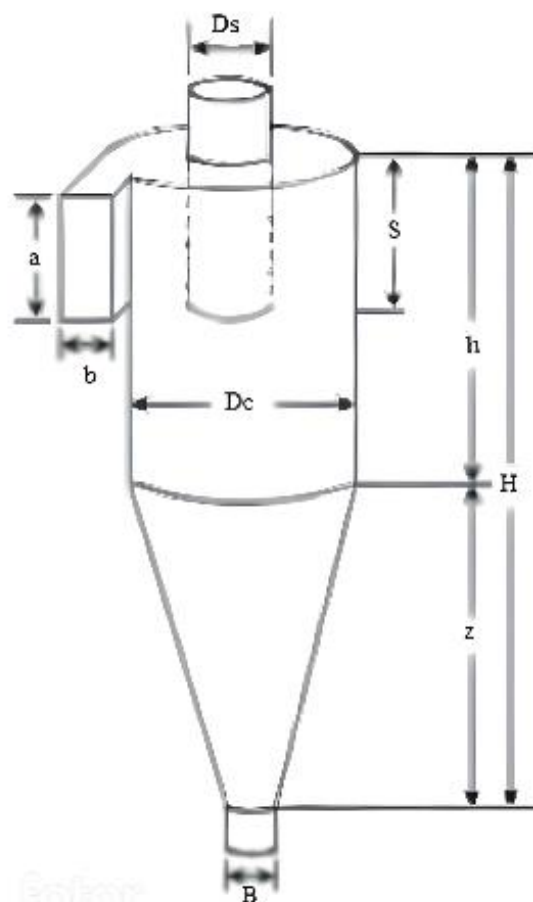


Figura 54 Dimensiones del ciclón de entrada tangencial

Tabla 18 Tabla de las características de los ciclones de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1	1	1
Altura de entrada	a/Dc	0,5	0,44	0,5
Ancho de entrada	b/Dc	0,2	0,21	0,2
Altura de salida	S/Dc	0,5	0,5	0,625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0,5	0,4	0,5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1,5	1,4	1,5
Altura parte cónica	z/Dc	2,5	2,5	2,5
Altura total del ciclón	H/Dc	4	3,9	4
Diámetro salida partículas	B/Dc	0,375	0,4	0,375
Factor de configuración	G	551,22	698,65	585,71
Número cabezas de velocidad	NH	6,4	9,24	6,4
Número de vórtices	N	5,5	6	5,5

2.1 Diseño del ciclón

Los ciclones se diseñan habitualmente de modo tal que se satisfagan las limitaciones bien definidas de caída de presión. Para las instalaciones ordinarias que operan aproximadamente a la presión atmosférica, como es el caso de este proyecto, las limitaciones dictaminan una caída de presión máxima permisible correspondiente a una velocidad de entrada al ciclón dentro del intervalo de 15,2 a 27,4 m/s. Por consiguiente, los ciclones se suelen diseñar para una velocidad de entrada de 22 m/s.

En la separación de partículas, la eficiencia de recolección puede cambiar sólo en una cantidad relativamente pequeña mediante una variación en las condiciones operacionales. El factor de diseño primario que se utiliza para controlar la eficiencia de recolección es el diámetro del ciclón. Un ciclón de diámetro más pequeño que funciona a una caída de presión fija alcanza la eficiencia más alta. Sin embargo, los ciclones de diámetro pequeño requieren varias unidades en paralelo para lograr una capacidad especificada. En tales casos, los ciclones individuales descargan el polvo en una tolva receptora común (Figura 55). El diseño final implica llegar a un término medio entre la eficiencia de recolección y la complejidad del equipo. Se acostumbra a diseñar un solo ciclón para una capacidad particular, recurriendo a varias unidades en paralelo solo cuando la eficiencia de recolección prevista es inadecuada para una sola unidad.

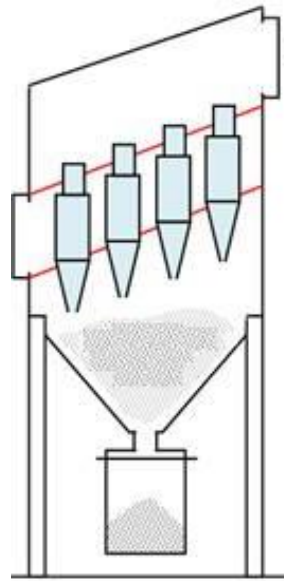


Figura 55 Multiciclones

Los ciclones en serie se justifican en aquellos casos que las partículas tienen las siguientes propiedades:

- Cuando tiene una distribución amplia de tamaños, incluyendo una porción importante de partículas más finas que $15\ \mu\text{m}$, en cuyo caso se utiliza un solo ciclón de diámetro grande para recoger la fracción de partículas gruesas y reducir la carga para una unidad con un diámetro más pequeño.
- Cuando tiene una tendencia marcada a flocularse en el equipo que precede a los ciclones, al igual que en estos mismos.

Cuando se reduce el diámetro del ducto de salida del gas se incrementa tanto la eficiencia de recolección como la caída de presión. Al aumentar la longitud del ciclón, generalmente se observa un incremento en la eficiencia de recolección.

Un ciclón operara bien, si el receptor de partículas es hermético. Es probable que la causa individual más importante para un funcionamiento deficiente del ciclón sea la fuga de aire hacia la salida de partículas del mismo. Una fuga ligera de aire en este punto provocara una reducción muy notable en la eficiencia de recolección.

Existen cuatro tipos de configuraciones diferentes de la entrada de un ciclón, la que se va a implementar en este trabajo es la entrada de sección circular ya que es la que provee el diseño más simple y más económico. Además, el área efectiva de la entrada de sección rectangular seria:

$$A_{\text{rectangulo}} = b * h \quad (74)$$

$$A_{\text{rectangulo}} = 50 * 23,5 = 1175 \text{ mm}^2 \quad (74a)$$

Mientras que para un diámetro de 40 mm se tiene:

$$A_{\text{circulo}} = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (75)$$

$$A_{\text{circulo}} = \frac{\pi * 40^2}{4} = 1256,6 \text{ mm}^2 \quad (75a)$$

El diseño del ciclón es de acero inoxidable austenítico, como la mayor parte de la estructura. La selección del material se basó principalmente para evitar la corrosión, al contener molibdeno aumenta su resistencia a la corrosión y también proporciona mayor resistencia a temperaturas elevadas. Además de los aceros inoxidables, el AISI 316 requiere una velocidad más lenta de soldadura por arco, se implementa el electrodo E23 12 L R 3 2 (Codificación según ISO 3581-A). Comercialmente el AISI 316 es uno de los aceros que tiene mayor disponibilidad en espesores y cuenta con una amplia gama de productos siderúrgicos.

Las dimensiones del mismo se encuentran en la Figura 56, en la Tabla 19 se aprecia una comparativa de las dimensiones, las cuales proporcionan un ciclón del tipo Swift de alta eficiencia.

Con el objetivo de simplificar el proceso de adquisición de materia prima y teniendo en cuenta que el componente en cuestión se encuentra sometido a tensiones térmicas similares a las del reactor, se decidió mantener el espesor de la chapa de acero inoxidable 316L en $3,2 \text{ mm}$. Esta elección se basa en la eficiencia de compra y en la consideración de que dicho espesor proporciona un nivel adecuado de resistencia a las condiciones de operación y carga térmica, sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad del componente.

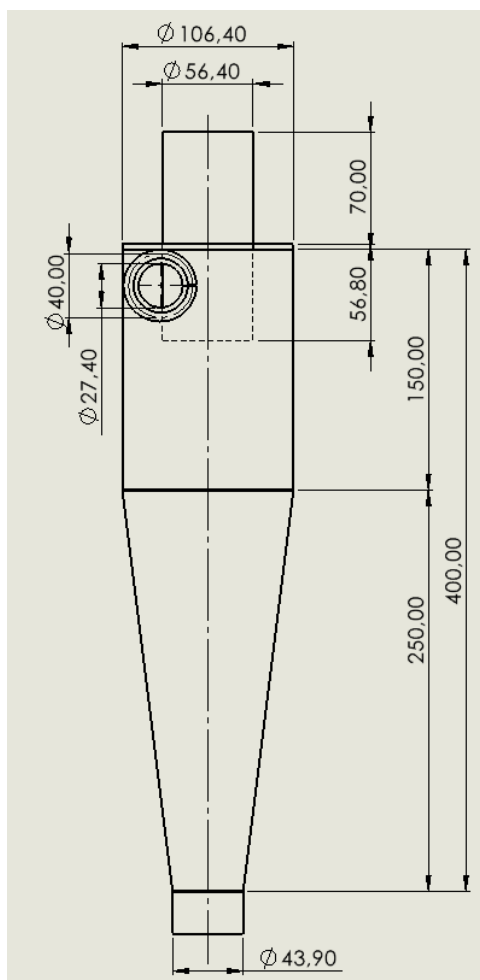


Figura 56 Medidas del ciclón

Tabla 19 Comparativa entre los valores reales obtenidos y el modelo teórico Swift

Dimensión	Nomenclatura	Valores propuestos	Relaciones	Valores Relaciones	Swift
Diámetro del ciclón	Dc	106,4	Dc/Dc	1	1
Altura de salida	S	56,8	S/Dc	0,53	0,5
Diámetro de salida	Ds	56,4	Ds/Dc	0,53	0,4
Altura parte cilíndrica	h	150,0	h/Dc	1,4	1,4
Altura parte cónica	z	250,0	z/Dc	2,4	2,5
Altura total del ciclón	H	400,0	H/Dc	3,75	3,9
Diámetro salida partículas	B	43,9	B/Dc	0,41	0,4

En la **Figura 57** se muestra el ciclón en una vista isométrica, el mismo está conformado como un conjunto soldado compuesto con las siguientes partes:

- 01. Cilindro exterior
- 02. Cilindro interior
- 03. Anillo superior
- 04. Cono
- 05. Cilindro inferior
- 06. Transición

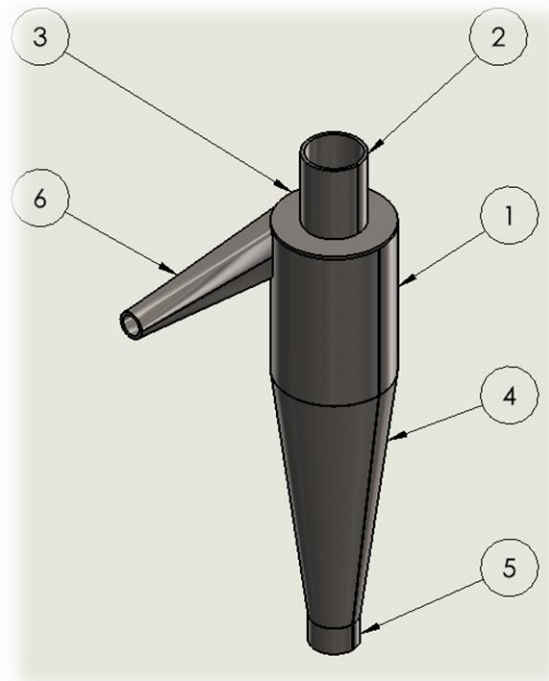


Figura 57 Vista isométrica del ciclón

En la Figura 58 se muestra la simulación realizada en SolidWorks, en la cual se aprecian los vórtices realizados por la trayectoria del fluido y las partículas sólidas depositadas en la parte inferior del ciclón. La velocidad máxima del fluido dentro de este componente se da en la entrada del mismo, y es de $V= 15,18 \text{ m/s}$. Planteando el principio de conservación de la masa, también conocido como la ecuación de continuidad, el cual establece que, para un flujo incompresible, la masa del fluido que entra en una sección de la tubería debe ser igual a la masa del fluido que sale de esa sección. Dado que la masa del fluido es constante, si el área de la sección transversal de la tubería se hace más grande, la velocidad del fluido debe aumentar para mantener constante el caudal. De esta manera se comprueba que la velocidad máxima se da en ese punto ya que el fluido venía de circular por un diámetro menor y al producirse un aumento en la sección de tubería la velocidad del fluido debe aumentar.

Por otra parte, es evidente que las partículas sólidas van a depositarse en la parte inferior del ciclón, ya que, como muestra la Figura 58 las vórtices en ese punto son las de menor velocidad y por lo tanto no tienen la suficiente energía cinética para continuar “arrastrando” las partículas sólidas por el circuito.

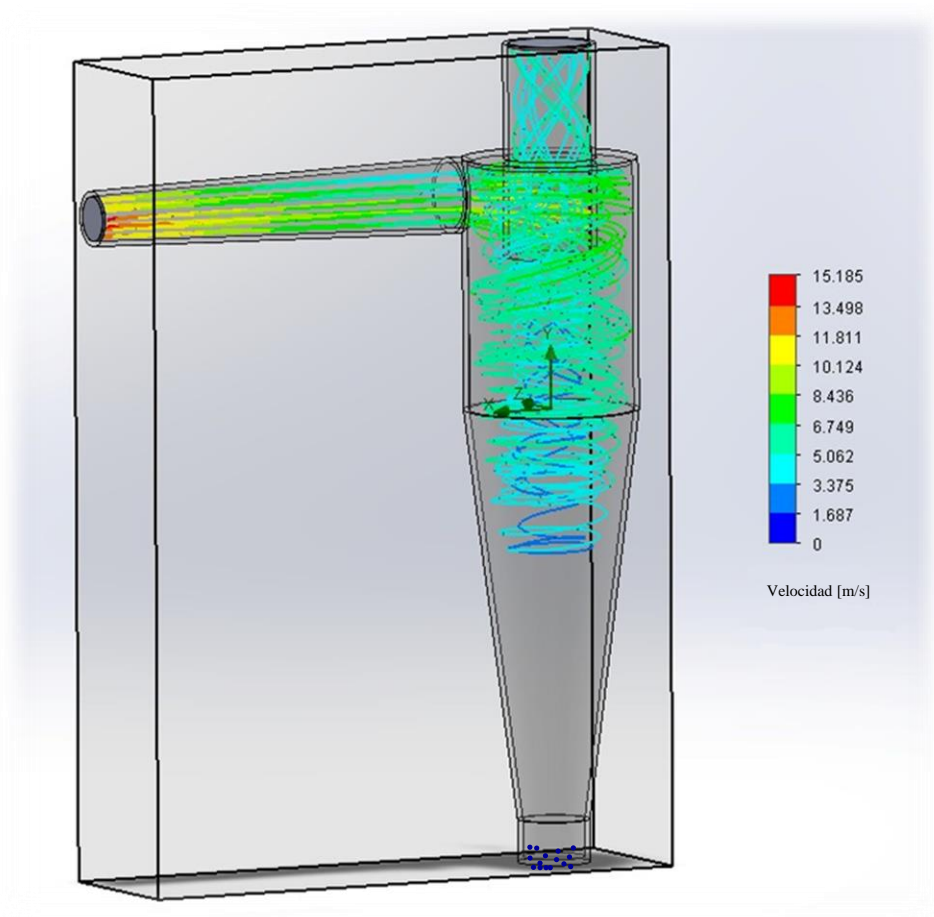


Figura 58 Trayectoria del flujo en el ciclón

Capítulo 6: Intercambiador de calor

Es un equipo que transfiere continuamente calor de un medio a otro. Hay dos tipos principales: directos e indirectos. En el caso de los primeros es donde ambos medios están en contacto directo entre sí. Se da por sentado que los medios no se mezclan. En el caso de los indirectos es donde ambos medios están separados por una pared a través de la cual se transfiere el calor. El diseño propuesto es del tipo indirecto.

Se plateó un intercambiador tipo casco y tubos, también llamado de coraza y tubos, el cual tiene como ventaja generar grandes áreas de intercambio en espacios reducidos. El calor se transfiere entre el fluido que circula por el interior de la coraza y otro que circula por los tubos. Un factor crucial a considerar es si ambos fluidos ingresan al equipo desde el mismo extremo, fluyen en paralelo y salen por el extremo opuesto, que se conoce como flujo paralelo. Aunque termodinámicamente no es la configuración más eficiente, se utiliza cuando los materiales son altamente sensibles a la temperatura debido a que produce una distribución más uniforme de la misma. En contraste, cuando los fluidos entran desde extremos opuestos y fluyen en direcciones contrarias, se trata de un flujo en contracorriente. Esta disposición es termodinámicamente más efectiva, por lo que se prefiere esta última opción.

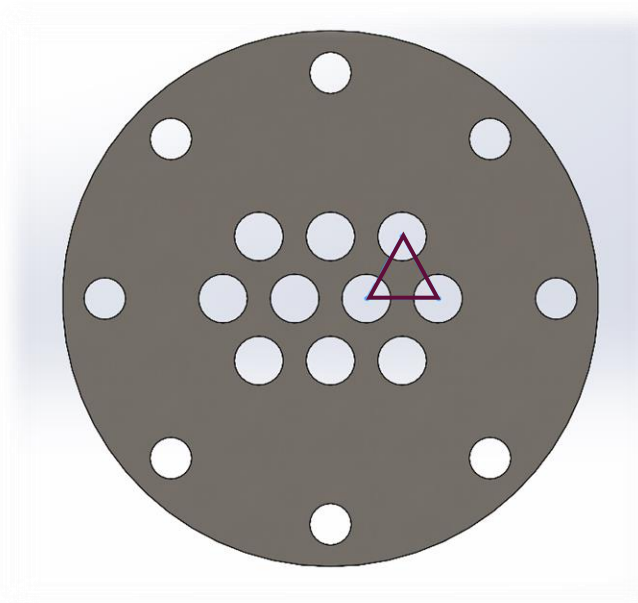


Figura 59 Disposición triangular en los tubos

Por cuestiones de dimensionamiento se decidió que el intercambiador sea de un solo paso, ya que si fuera de dos pasos por ejemplo simplificaría el diseño de uno de los cabezales, pero dificultaría el de los tubos. Se propuso que el fluido frío sea agua y circule dentro de

los tubos, además, el arreglo de los mismos se fijó como triangular (Figura 59); mientras que el fluido caliente que circula por la coraza está compuesto por hidrocarburos de cadenas largas y cortas, y aromáticos. Esta disposición se propuso de así porque el objetivo del presente trabajo es que los hidrocarburos condensen a distintas temperaturas y se depositen en un recipiente conectado a la parte inferior del intercambiador (Figura 60), por lo tanto, es más sencillo si este circula por la coraza.

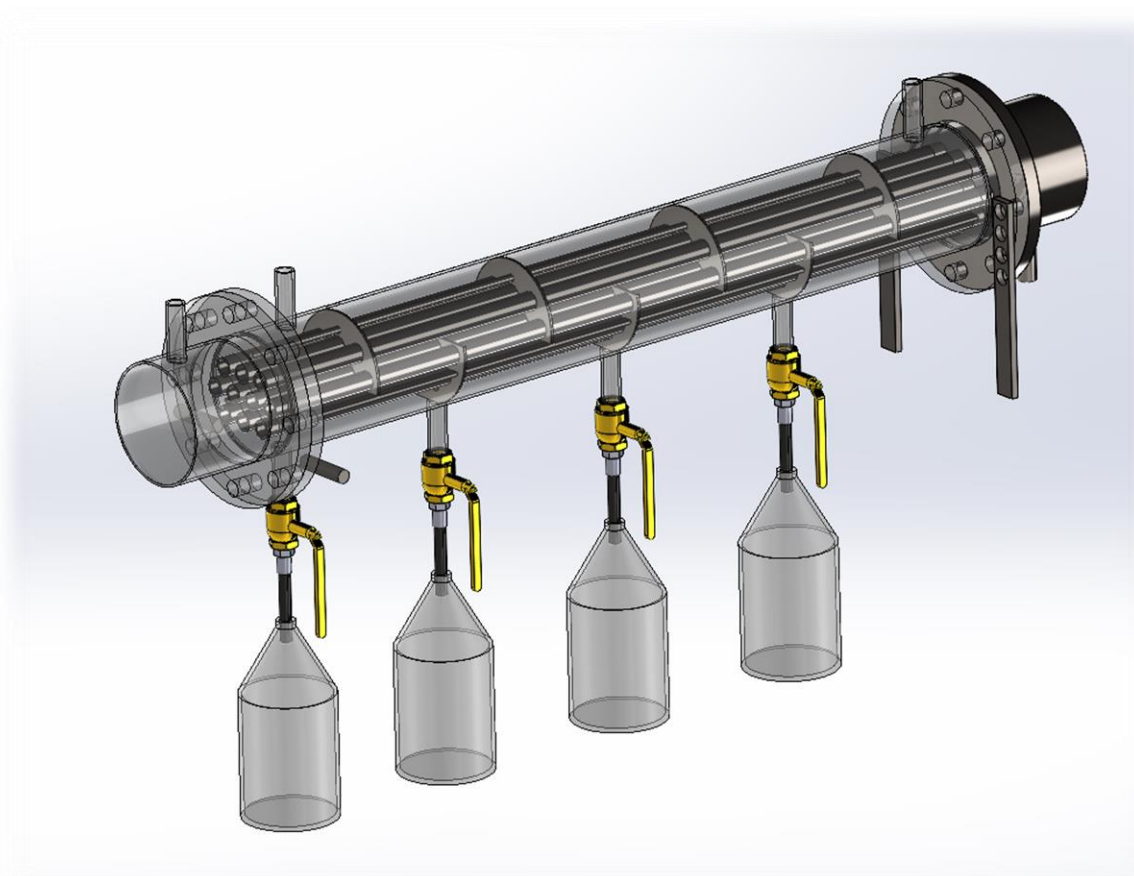


Figura 60 Esquema del intercambiador de calor propuesto

1. Diseño y verificación en Excel

Para el diseño del intercambiador de calor se decidió implementar el software Aspen Hysys, el cual es una de las herramientas de simulación de procesos químicos más utilizadas debido a su potencia, simpleza y eficiencia. Permite realizar modelos matemáticos de cualquier proceso químico. En la Figura 61 se presentan cuatro potenciales resultados generados por el software en cuestión. Tras un análisis exhaustivo, se ha determinado que la opción más apropiada es la alternativa “C”. Dicha elección se sustenta en consideraciones relacionadas con las dimensiones del sistema, donde dicha opción es la que sobresale. Además, es importante destacar que la opción “C” se

Capítulo 7: Estructura soporte de componentes

Es un conjunto estable de elementos resistentes de una construcción con la finalidad de soportar cargas y transmitir las, para llevar finalmente estos pesos o cargas al suelo.

Esto es, un conjunto capaz de recibir cargas externas, resistirlas internamente y transmitir las a sus apoyos. El suelo es por último quien recibe todos los efectos producidos por estas fuerzas.

La estructura tendrá entonces *forma* y *dimensiones*, óptimas y estará constituida por un *material* apto para resistir (como el hormigón, madera, acero, etc.) y tendrá presente la existencia de vínculos entre los distintos elementos que la componen.

1. Factores a tener en cuenta en el proyecto

Economía: con racionalización modulada para proyecto de la obra y como regla general descargas al terreno de las acciones actuantes lo más directas posibles con el menor recorrido.

Resistencia: a través de adecuadas dimensiones de los elementos estructurales para poder absorber los esfuerzos al que están sometidos.

Durabilidad: será mayor que los demás componentes de la construcción.

Estética: agradable a la vista, sobre todo en los casos en que quedará expuesta en su totalidad por cuestiones de proyecto.

2. Análisis estructural

Ese estudio consiste en la determinación de los esfuerzos y deformaciones a que quedan sometidas, por la acción de agentes externos (cargas gravitatorias, fuerzas sísmicas, de vientos, variaciones térmicas, etc.)

2.1 Conceptos fundamentales

Fuerzas

Entendemos por fuerza toda acción sobre un objeto que tiende a modificar el estado de reposo o movimiento de dicho objeto, o que puede deformarlo de forma permanente o transitoria.

Momentos

Podemos calcular el momento de una fuerza respecto de un punto, como el producto de valor de dicha fuerza por la distancia. El momento tiende a hacer girar un cuerpo, cuanto mayor sea la fuerza o mayor la distancia, mayor será el momento.

2.2 Solicitaciones que soportan los elementos que componen las estructuras

Esfuerzo de compresión

Cuando se aplican dos fuerzas intentando acortar el elemento, reducir su longitud; con términos científicos, un elemento está sometido al esfuerzo de compresión cuando actúan sobre él dos fuerzas que poseen:

- La misma dirección (sobre una misma línea);
- Sentido contrario, son convergentes.

Es decir, están dirigidas hacia un mismo punto.

La forma del elemento, es decir, su sección y su longitud, influye en el comportamiento a compresión de un elemento, concretamente el factor denominado esbeltez. La esbeltez es la relación que existe entre la longitud del elemento y la superficie que hay en un corte perpendicular (sección recta). Si un elemento es muy largo con relación a la sección, cuando intentemos comprimirlos, se arqueará, efecto que se denomina *PANDEO*.

Esfuerzo de tracción

Se denomina así al esfuerzo interno al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto y tienden a estirarlo.

Esfuerzo de corte

Es aquel esfuerzo que actúa tangente a la sección. Se produce cuando se aplican fuerzas perpendiculares a la pieza, haciendo que las partículas del material tiendan a resbalar o desplazarse las unas sobre las otras. Los puntos sobre los que apoyan las vigas están sometidos a corte o cizallamiento.

A diferencia del esfuerzo normal, es más difícil de apreciar en las vigas ya que su efecto es menos evidente.

Esfuerzo de torsión

Las fuerzas de torsión son las que hacen que una pieza tienda a retorcerse sobre su eje central. Torsión es la sollicitación que se presenta cuando se aplica un momento sobre el

eje longitudinal de un elemento constructivo y genera un esfuerzo cortante. Están sometidos a esfuerzos de torsión los ejes, las manivelas y los cigüeñales.

Flexión

Es una combinación de compresión y tracción. Mientras que las fibras superiores de la pieza sometida a un esfuerzo de flexión se alargan, las inferiores se acortan, o viceversa.

En un elemento constructivo sometido a flexión se generan tensiones normales, σ , de sentido opuesto en la zona comprimida y en la zona traccionada, que generan un momento interior que equilibra el momento exterior aplicado.

2.3 Elementos estructurales

Columna o pilar

Es una barra apoyada verticalmente, cuya función es la de soportar cargas o el peso de otras partes de la estructura. Los principales esfuerzos que soporta son de compresión y pandeo. Suelen ser de forma geométrica regular (cuadrada o rectangular) y también de sección circular.

Viga

Es una pieza o barra horizontal, con una determinada forma en función del esfuerzo que soporta. Están sometidas a esfuerzos de flexión.

3. Cálculo estructural

Para la realización del cálculo estático de la estructura soporte de componentes (Figura 72), se realizó de manera manual, y luego se verificó el mismo con una aplicación “*FrameDesign*”.

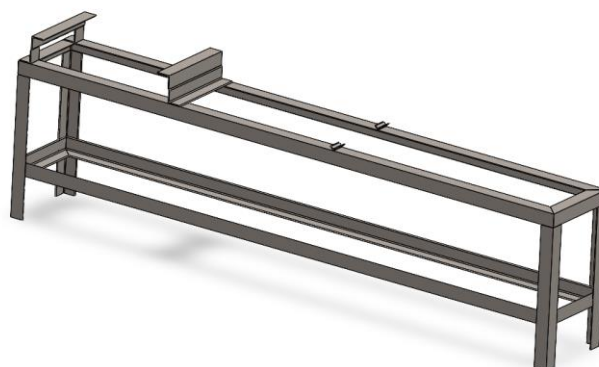


Figura 72 Esquema de la estructura soporte de componentes

El cálculo estructural se dividirá en dos partes, en un primer momento se hablará de apoyos haciendo referencia a donde se encuentran apoyados el reactor, ciclón y el intercambiador de calor. Estos apoyos en la segunda parte del cálculo, se tomarán como fuerzas, que serán las fuerzas que se ejercen sobre la estructura, para calcular las reacciones en los apoyos de la estructura, es decir en las patas de la estructura. Para el cálculo de las fuerzas que se transmiten se consideraron los siguientes factores:

- El largo propuesto de la estructura se estableció de 2405 mm.
- El peso propio del reactor (Conj. Mont. Reactor) es de 18 kg, el cual se distribuye en cuatro apoyos. Dos en cada eje, separados una distancia de 242mm entre sí.
- El peso de la carga de los plásticos para pirolizar, como máximo es de 9 kg, el cálculo se realiza con el máximo valor. Se planteó una carga distribuida de forma triangular. Por lo tanto, la carga triangular es de 9 kg distribuidos en 435 mm (Figura 73). Sabiendo que este tipo de carga tiene el baricentro a $2/3$ del largo total, es decir, se tiene una carga puntual de 9 kg a 290 mm, la cual está dividida en dos.
- El peso propio del ciclón el cual es de 4 kg. Se divide en dos apoyos puntuales, a una distancia de 990 mm del cero establecido en el origen de la estructura soporte.
- El intercambiador de calor es el que posee mayor peso propio, el cual es de 82 kg, el mismo se distribuye en cuatro apoyos. Separados una distancia de 1155 mm entre sí, el último soporte se encuentra en el final de la estructura soporte.
- Dentro del intercambiador de calor se va a tener en cuenta el peso del agua en el caso más solicitado que se plantea suponiendo que la misma está en toda la cañería.

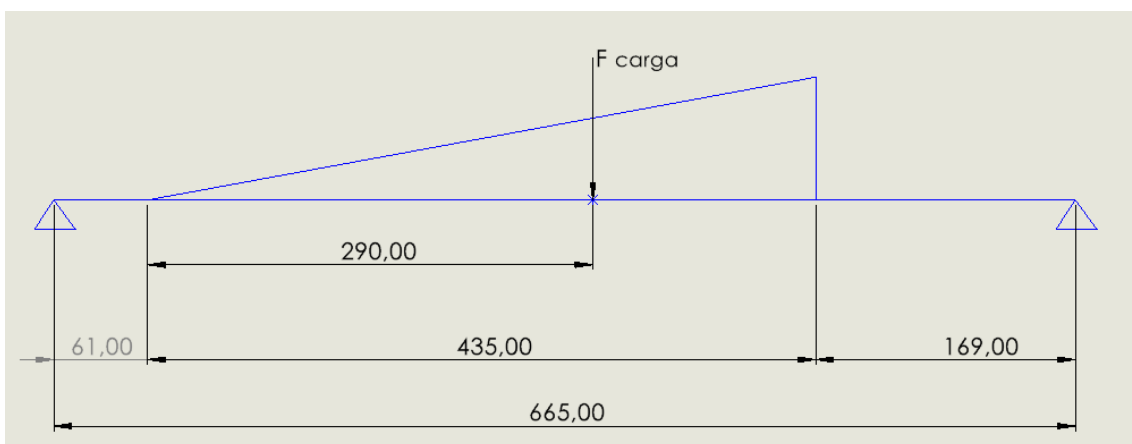


Figura 73 Diagrama de la fuerza distribuida de la carga de plástico

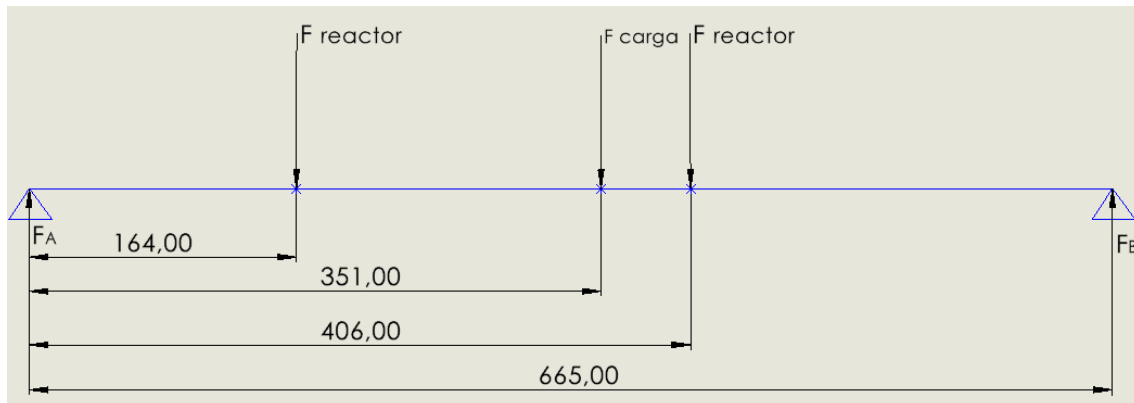


Figura 74 Diagrama de las fuerzas de la carga del plástico y del reactor

Las fuerzas F_A y F_B son las reacciones de las fuerzas del reactor y de la carga de plástico, las cuales están en los rodamientos. Dichas fuerzas son las que se aplican sobre la estructura soporte de componentes. El cálculo se realiza a continuación.

$$\Sigma F = F_A + F_B - F_{reactor} - F_{carga} - F_{reactor} = 0 \quad (103)$$

$$\Sigma M_A = -0,164 F_{reactor} - 0,351 F_{carga} - 0,406 F_{reactor} + 0,665 F_B = 0 \quad (104)$$

Recordando que el valor de la carga total es de 9 kg, pero como se dijo con anterioridad, está dividido en dos apoyos, por lo tanto, $F_{carga}=4,5$ kg. Por otra parte, el peso del reactor es de 18 kg, el cual está dividido en cuatro apoyos, entonces $F_{reactor}=4,5$ kg. Reemplazando estos valores en la ecuación 96.

$$F_B = \frac{0,164 * 4,5 + 0,351 * 4,5 + 0,406 * 4,5}{0,665} = 6,232 \text{ kg} \quad (104a)$$

$$F_A = 4,5 + 4,5 + 4,5 - 6,232 = 7,268 \text{ kg} \quad (103a)$$

La fuerza que ejerce el peso del ciclón, como se dijo anteriormente, es de 4 kg que está dividida en dos apoyos, por lo tanto, se va a plantear como $F_C = 2$ kg.

Planteando el cálculo del intercambiador de calor se debe tener en cuenta por un lado el peso propio del mismo y por otro lado el peso del agua que circula, como se mencionó con anterioridad, se va a calcular el caso más solicitado, esto significa que el volumen de ambas tapas y los diez tubos están llenos de agua. Primero se va a calcular el peso que ocupa el volumen del agua.

$$\text{Volumen} = \pi * r^2 * h \quad (105)$$

$$V_{tubo} = \pi * 0,01029^2 * 1,2 = 0,0004 \text{ m}^3 \quad (105a)$$

$$V_{tapa} = \pi * 0,08075^2 * 0,125 = 0,0026 \text{ m}^3 \quad (105b)$$

Para obtener el peso en kg, primero se convierten los m^3 a litros y luego, sabiendo que la densidad del agua es igual a 1, se obtiene el valor en kg.

Teniendo en cuenta que los tubos son diez, el valor del volumen de los tubos se multiplica por diez. Entonces,

$$F_{tubos} = 10 * 0,4 = 4 \text{ kg} \quad (106)$$

$$F_{tapa} = 2,6 \text{ kg} \quad (107)$$

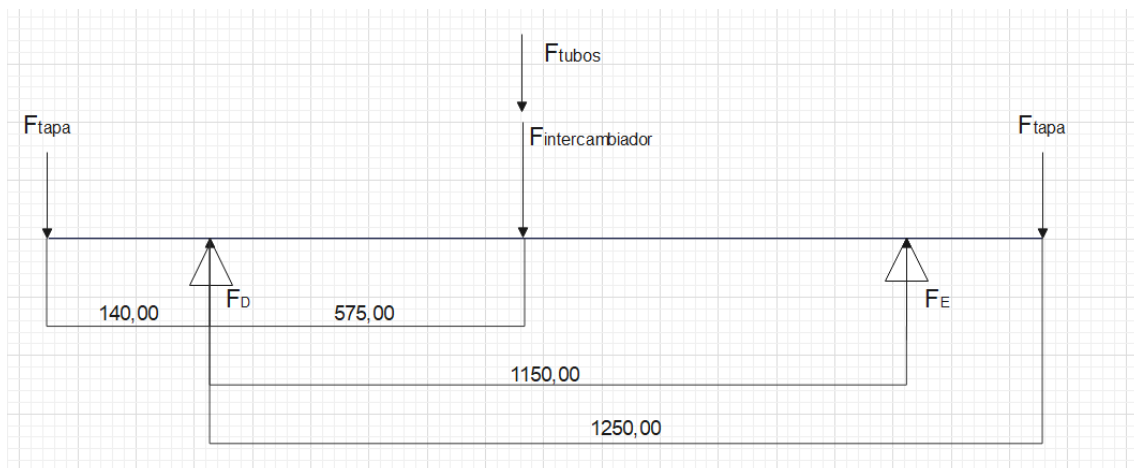


Figura 75 Diagrama de las fuerzas que genera el intercambiador de calor

Se aprecia en el diagrama de la Figura 75 que las fuerzas ejercidas por el peso del volumen de agua ocupados en ambas tapas y en los tubos se planteó en el centro de gravedad de las partes.

$$\Sigma F = F_D + F_E - F_{tapa} - F_{int} - F_{tubos} - F_{tapa} = 0 \quad (108)$$

$$\Sigma M_D = 0,14F_{tapa} - 0,575F_{int} - 0,575F_{tubos} + 1,15F_E - 1,25F_{tapa} = 0 \quad (109)$$

Teniendo en cuenta que el peso del intercambiador es de 82 kg, que anteriormente se mencionó que el peso del mismo está distribuido en cuatro apoyos y el diagrama que se

muestra en la Figura 76 es en dos dimensiones, se entiende que en realidad existen dos F_D y dos F_E . Por cuestión de simplificación de cálculos se plantea que F_{int} es de la mitad del valor neto. Es decir, $F_{int}=41$ kg.

$$F_E = \frac{-0,14 * 2,6 + 0,575 * 41 + 0,575 * 4 + 1,25 * 2,6}{1,15} = 25 \text{ kg} \quad (109a)$$

$$F_D = 2,6 + 41 + 4 + 2,6 - 25 = 25,2 \text{ kg} \quad (108a)$$

Teniendo todos los valores de las fuerzas que se producen puedo realizar el cálculo de las reacciones y los diagramas de los momentos flectores que se producen en la estructura soporte de componentes.

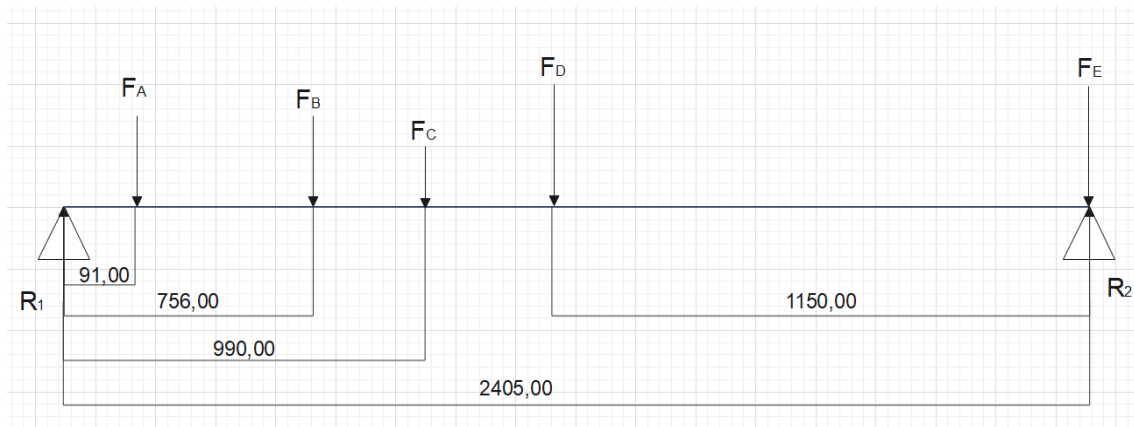


Figura 76 Diagrama de fuerzas de la estructura soporte de componentes

Con los valores obtenidos anteriormente de las fuerzas, $F_A=7,268$ kg, $F_B=6,232$ kg, $F_C=2$ kg, $F_D=25,2$ kg y $F_E=25$ kg, se calculan las reacciones R_1 y R_2 .

$$\Sigma F = R_1 + R_2 - F_A - F_B - F_C - F_D - F_E = 0 \quad (110)$$

$$\Sigma M_1 = 0,091F_A + 0,756F_B + 0,99F_C + 1,255F_D + 2,405F_E - 2,405R_2 = 0 \quad (111)$$

$$R_2 = \frac{0,091 * 7,268 + 0,756 * 6,232 + 0,99 * 2 + 1,255 * 25,2 + 2,405 * 25}{2,405} \quad (111a)$$

$$R_2 = 41,21 \text{ kg} \quad (111b)$$

$$R_1 = 7,268 + 6,232 + 2 + 25,2 + 25 - 41,21 = 24,49 \text{ kg} \quad (110a)$$

A continuación, se presentan los diagramas de corte y momento flector de la viga realizados en la aplicación *FrameDesign*.

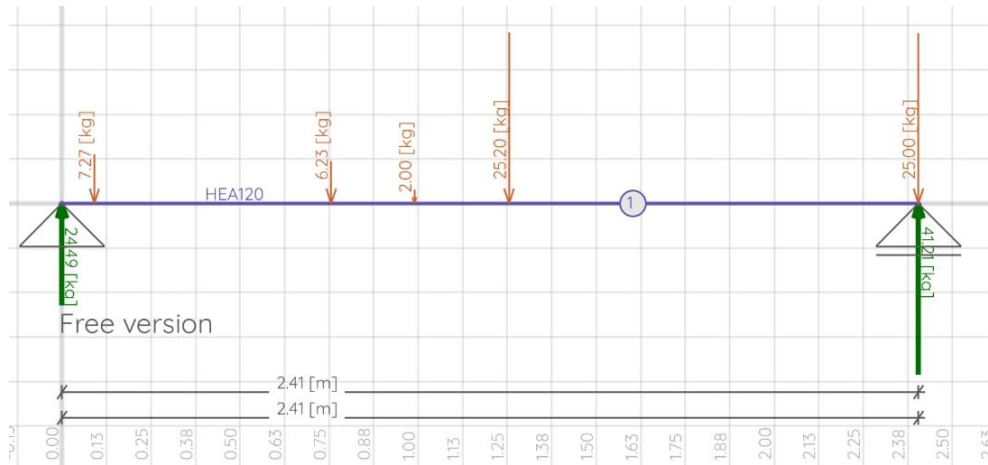


Figura 77 Diagrama de cargas

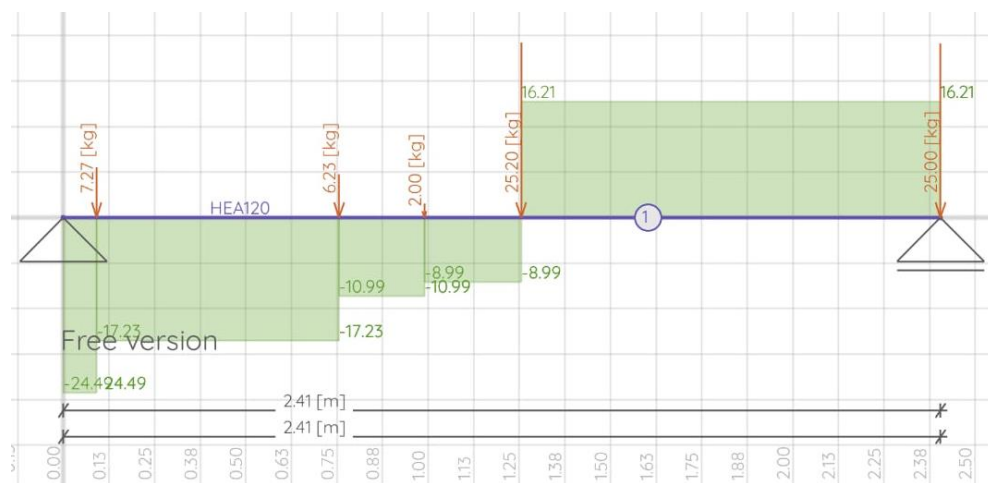


Figura 78 Diagrama de esfuerzos de corte

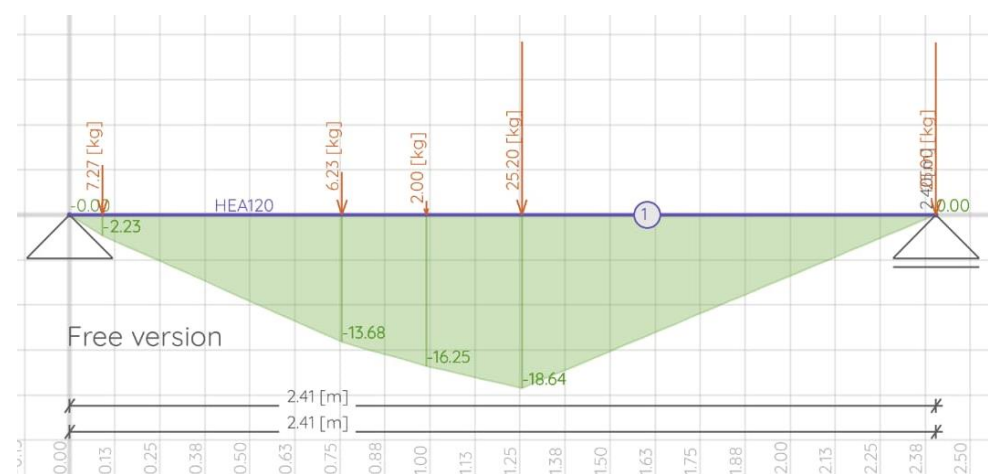


Figura 79 Diagrama de momento flector

Se puede observar que el mayor momento flector se da a los 1255 mm el origen de la viga, donde se encuentra la primera fuerza que ejerce el intercambiador de calor.

La Figura 80 muestra los datos técnicos del ángulo 2 ½” x 3/16” (63,5x4,76 mm), el cual es el planteado para la estructura soporte de componentes. Se tendrá en cuenta el momento de inercia para verificar si puede resistir las cargas expuestas con anterioridad.



Figura 80 Datos técnicos del perfil utilizado para la estructura soporte de componentes

El perfil se posicionó con el eje principal de inercia x-x de forma vertical; las cargas que se ejercen sobre el mismo son a lo largo de dicho eje. En la Figura 81 se presenta un esquema para explicar visualmente lo anteriormente mencionado.

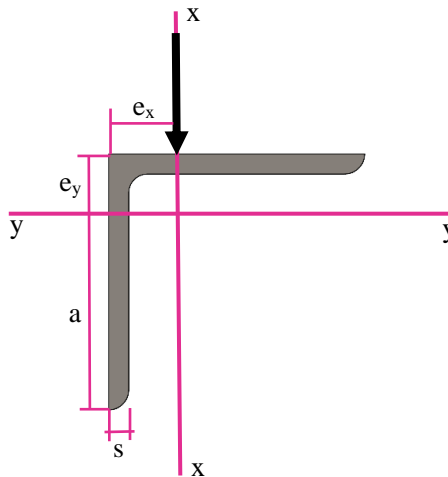


Figura 81 Disposición del perfil utilizado

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \tag{112}$$

Para calcular el esfuerzo máximo usamos la Ecuación 112, teniendo en cuenta que el valor de $M=18,64 \text{ kg.m}$, $c=0,0172 \text{ m}$, $I=2,27 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$.

$$\sigma = \frac{18,64 * 0,0172}{2,27 * 10^{-7}} = 1,41 * 10^6 \text{ kg/m}^2 = 13,851 \text{ MPa} \quad (112a)$$

Sabiendo que la Tensión máxima admisible del acero es de $\sigma_{adm}=250 \text{ MPa}$, verificamos que el perfil planteado resiste las cargas estáticas.

Se emplean dos vigas simétricas.

Por último, se debe verificar las patas de la estructura al esfuerzo de pandeo. Se verificará en el extremo 2, ya que es el que soporta mayor fuerza, $R_2=41,21 \text{ kg}$.

$$P < P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(\beta * L)^2} \quad (113)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (114)$$

De la Ecuación 114 despejo el valor de P , sabiendo que el valor de la tensión es la misma que antes. El área la obtengo de la Figura 80.

$$P = 250 * 10^6 * 6 * 10^{-4} = 150 * 10^3 \text{ N} = 150 \text{ kN} \quad (114a)$$

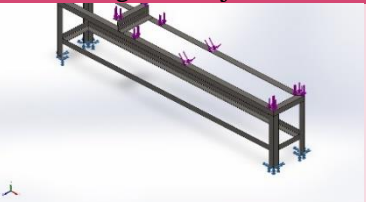
Se plantea que la columna está empotrada en el extremo inferior y articulada en el extremo superior. Lo que da un valor de $\beta=0,7$. El módulo elástico del acero es $E=210 \text{ GPa}$. El largo de la columna es $L=0,725 \text{ m}$. Reemplazando los valores en la Ecuación 113, se obtiene:

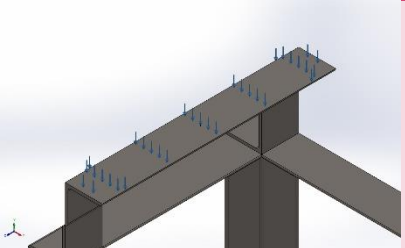
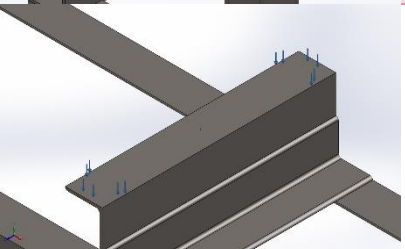
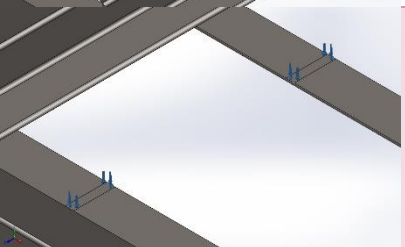
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * 210 * 10^9 * 2,27 * 10^{-7}}{(0,7 * 0,725)^2} = 1,83 * 10^6 \text{ N} \quad (113a)$$

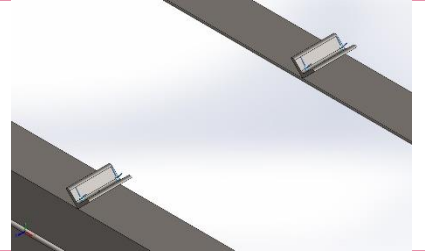
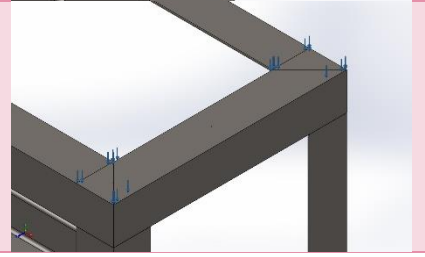
Como se mencionó anteriormente, el valor de P debe ser menor que el valor de P_{cr} . Siendo $150 \text{ kN} < 1830 \text{ kN}$, se comprueba que las columnas verifican al pandeo.

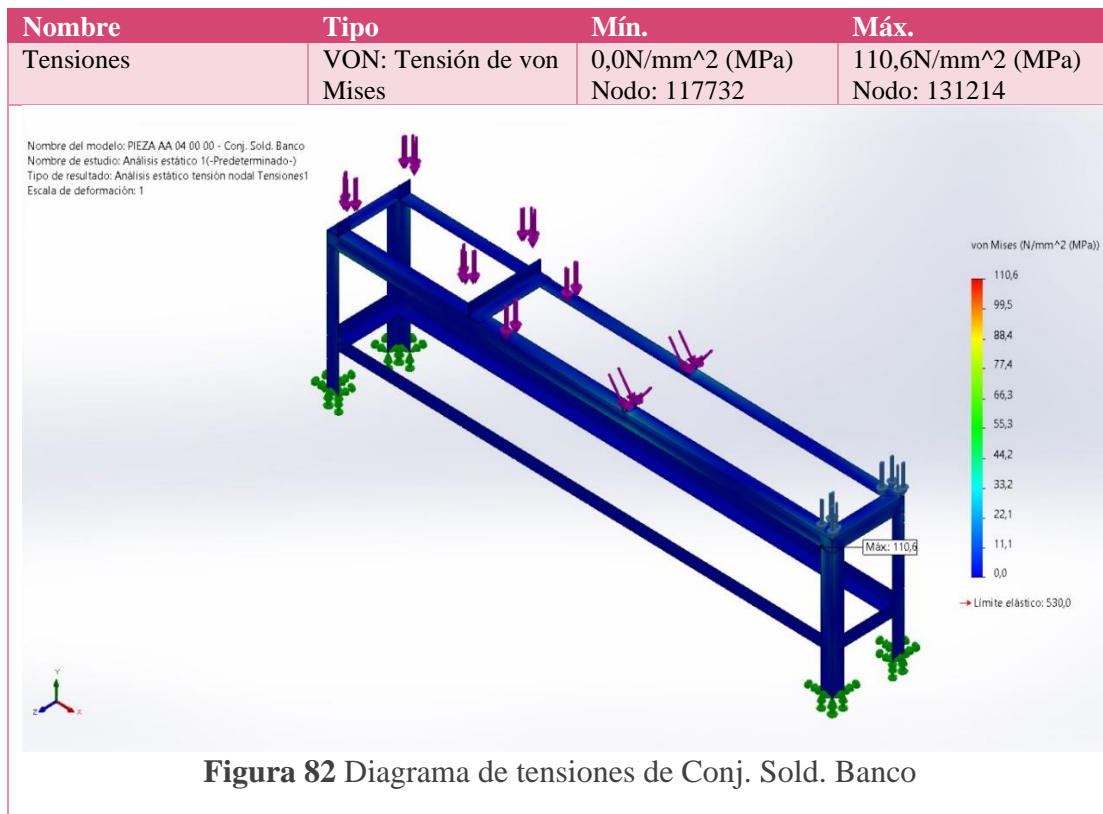
4. Resultados del estudio

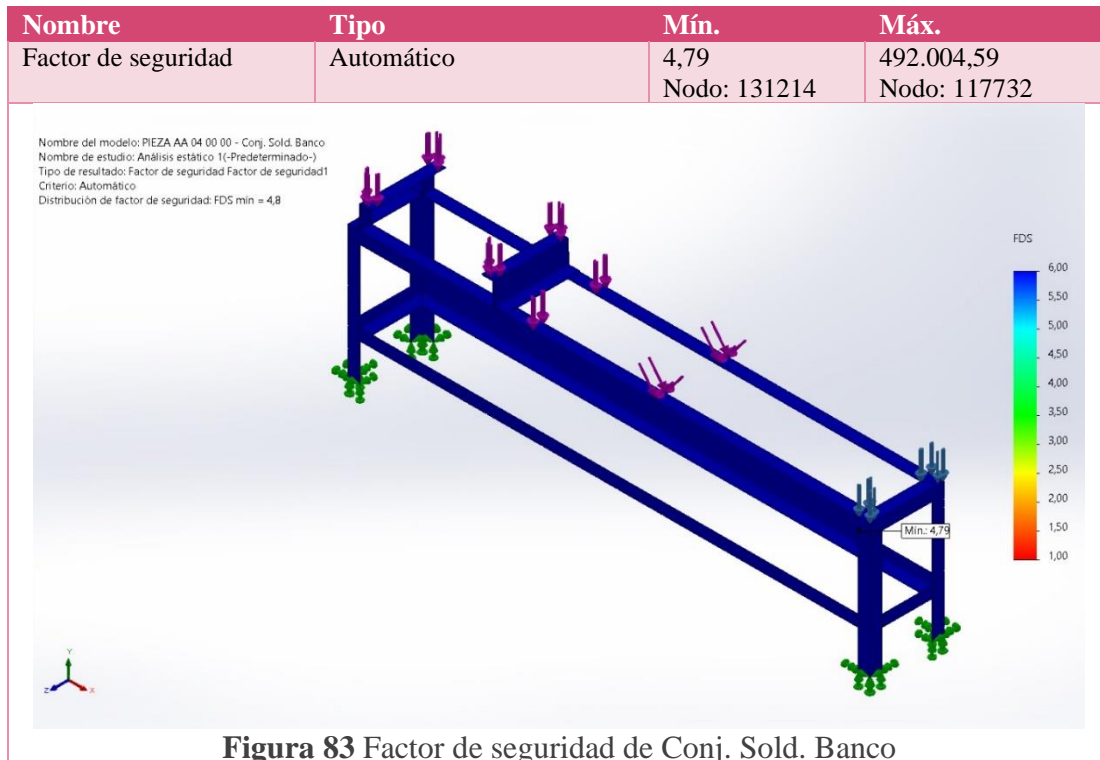
4.1 Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades:	4 cara(s)	
		Tipo:	Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0,0373979	2.417,74	-0,000173569	2.417,74
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		Entidades:	1 cara(s)
		Tipo:	Aplicar fuerza normal
		Valor:	14,536 kgf
Fuerza-2		Entidades:	1 cara(s)
		Tipo:	Aplicar fuerza normal
		Valor:	12,464 kgf
Fuerza-3		Entidades:	2 cara(s)
		Tipo:	Aplicar fuerza normal
		Valor:	4 kgf

<p>Fuerza-4</p>		<p>Entidades: 2 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 50,4 kgf</p>
<p>Fuerza-5</p>		<p>Entidades: 3 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 50 kgf</p>





De este informe resulta que, según el criterio de rotura adoptado (Von Mises), la tensión máxima a la que se encuentra sometida la estructura soporte de componentes es de 110,6 MPa (N/mm²), valor que está por debajo de la tensión de fluencia del material que es de 530 MPa. Dando por resultado un coeficiente de seguridad de $N = 4,76$.

Capítulo 8: Sistema de planimetría y codificación

1. Introducción

En este capítulo se detalla el sistema de codificación creado para lograr una eficaz organización de la documentación de ingeniería.

Dicha documentación se encuentra en el presente trabajo en el anexo. La misma está conformada por los planos de:

- El pirolizador completo.
- El conjunto del reactor y sus mecanismos.
- El ciclón.
- El intercambiador de calor y sus componentes.
- El banco de trabajo.

2. Sistema de codificación

Todo plano debe recibir un *número de identificación*. Este número debe ser único, al menos dentro de la organización del propietario legal, ya que se utiliza como referencia del plano.

La numeración exigirá una codificación específica, de forma que el número de identificación deberá estar compuesto por varios grupos de cifras y/o letras. Aunque el sistema de numeración de planos depende de las normas internas de cada empresa, se expone a continuación el sistema de codificación de planos de conjuntos, subconjuntos y piezas implementado.

Se va a implementar dos letras y una serie de seis números separados entre sí de a dos, con el siguiente significado:

- LETRAS: La primera letra representa la máquina y la segunda letra representa el modelo.
- PRIMERA CIFRA: representa el número asignado al conjunto del aparato, dispositivo, utillaje, máquina, etc.; de tal forma que en esta numeración ordinal deberán estar catalogados todos los planos de conjunto que se desee archivar.
- SEGUNDA CIFRA: representa el número ordinal de uno de los subconjuntos que componen el conjunto. Las máquinas suelen descomponerse en varios subconjuntos que, independientemente considerados, forman una unidad en sí mismos. El montaje de todos estos subconjuntos formará el conjunto total de la máquina.

- TERCERA CIFRA: representa el número de orden de cada uno de los planos que componen el subconjunto o normalmente coincidirá con el número de marca asignado a cada pieza.

AA	Máquina y modelo
00	Conjunto
00	Subconjunto
00	Pieza

- Máquina y modelo

Estos dígitos identifican la máquina que se describe y su respectivo modelo. A continuación, se muestra el código para el pirolizador.

AA	00	00	00
----	----	----	----

- Conjunto

Se distinguen los siguientes conjuntos:

Números	Conjuntos
01	Reactor
02	Ciclón
03	Intercambiador de calor
04	Banco

Ejemplo: El conjunto del intercambiador de calor del pirolizador, se identificará con los siguientes dígitos.

AA	03	00	00
----	----	----	----

Subconjunto

Es la subdivisión de los conjuntos, estos se componen por lo general de piezas soldadas.

Ejemplo: El subconjunto soldado tapa del reactor del pirolizador, se identificará de la siguiente manera.

AA	01	21	00
----	----	----	----

- Pieza

Finalmente, el sistema de numeración completo identifica a las piezas del modo que se plasma en el siguiente ejemplo:

Baffle inferior del intercambiador del pirolizador,

AA	03	30	02
----	----	----	----

Bibliografía

- Daugherty R. L. & Ingersoll A. C. (1964) Mecánica de los fluidos. Argentina. HASA.
- Kern, D. Q. (1965) Procesos de transferencia de calor. México. CECSA.
- Faires, V.M. (1999) Diseño de Elementos de máquina. España. Montaner y Simón S.A.
- Gieck, K & Gieck R (2000) Manual de fórmulas técnicas. Alemania. Alfaomega.
- Shigley J. E. & Uicker J. J. (2001) Teoría de máquinas y mecanismos. Mc Graw Hill.
- ACRR et al. (2004). Para el reciclaje de los residuos plásticos una guía por y para las autoridades locales y regionales. Europa: Asociación de Ciudades y Regiones para el Reciclaje. ACRR.
- Almeida Gamarra, N. (2006). Ensayos preliminares de pirólisis de residuos sólidos municipales para obtención de biocombustibles. Bogotá. La Granja.
- Mott, R. L. (2006) Diseño de elementos de máquinas. Pearson. Cuarta edición.
- Aracil Sáez, I. (2008). Formación de contaminantes y estudio cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP). Tesis doctoral. Alicante: Universidad de Alicante.
- Bahamondes Santos J. L. (2008) Diseño y construcción de un separador ciclónico para la industria naval. Universidad Austral de Chile. Chile
- Chiaravalotti, A., Ravera & Laidi (2008). Nuevas Determinaciones en Combustibles y Lubricantes. II Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales. Buenos Aires: Asociación Argentina de Materiales.
- Lee, K.-H., & Cheon Oh, S. (2009). Kinetics of the thermal degradation of wax materials obtained from Pyrolysis of mixed waste plastics. Cheonan.
- Basu, Prabir. (2010). Biomass gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical Design and Theory. Estados Unidos. Academic Press.
- Myszka D. H. (2012) Máquinas y mecanismos. Pearson. Cuarta edición.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). Tecnología de Polímeros. Alicante: Universidad de Alicante.

Comisión Europea. (2013). Libro Verde: sobre una estrategia europea frente a los residuos de plásticos en el medio ambiente. Bruselas.

Espinoza, J. E., & Naranjo, T. M. (2014). Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca.

Campoverde Jara, X. M. (2016) Obtención y valoración de combustible líquido por medio de pirólisis, a partir de residuos sólidos domésticos. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Ecuador.

Inmaico S.A.S. Aislamientos térmicos. (2016) Sistemas para el uso eficiente y racional de la energía. Bogotá.

Norma DIN 3990. (Sin fecha) Cálculo de engranajes. Alemania.

Norma ANSI/AGMA 2101-D04. (Sin fecha) Cálculo de engranajes. Estados Unidos

Norma DIN 6886. (Sin fecha) Cálculo de chavetas. Alemania

Norma ISO 11469 (2016) Identificación genérica y marcado de productos plásticos. Inglaterra.

Norma CIRSOC 301 (2016) Reglamento argentino de estructuras de acero para edificios. Argentina.

Anexo
