



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN EQUIPO GENERADOR DE
BIOCARBÓN UTILIZANDO MATERIA ORGÁNICA RESIDUAL”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

GORDILLO GORDILLO JAIRO MAURICIO

jairo.gordillo@epn.edu.ec

DIRECTORA: Ing. ALMEIDA CRISTINA, M.Sc.

cristina.almeidan@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: Ing. SUNTAXI CARLOS, M.Sc.

segundo.suntaxi@epn.edu.ec

Quito, Marzo 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Jairo Mauricio Gordillo Gordillo, bajo mi supervisión.

Ing. Almeida Cristina, M.Sc.

DIRECTORA DE PROYECTO

Ing. Suntaxi Carlos, M.Sc.

CO-DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, Jairo Mauricio Gordillo Gordillo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Gordillo Gordillo Jairo Mauricio

DEDICATORIA

A mis padres, Mauro y Martha, que me inspiran siempre para alcanzar todo lo que
me propongo

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres Mauro y Martha, y a mi hermana Vanessa que gracias a su apoyo incondicional, su guía y sus consejos, me hicieron la persona que soy ahora. A todos mis amigos que de una u otra forma siempre estuvieron ahí apoyándome, distrayéndome, o con la sola certeza de que siempre estarán ahí cuando los necesite. A Sebastián, el mejor amigo que podría tener y a quien conozco de toda la vida. A Belén, que me ayudó y apoyó en todo, y siempre encuentra la manera de hacerme sentir mucho más de lo que soy. Y a todas las personas que he conocido, con los que aprendí de la vida misma.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
LISTADO DE FIGURAS.....	ix
LISTADO DE TABLAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Biomasa.....	3
1.1.1. Clasificación de la biomasa.....	3
1.1.2. Ventajas y desventajas de la utilización de biomasa	3
1.2. Residuos sólidos.....	4
1.2.1. Residuos sólidos orgánicos en el Ecuador.....	5
1.2.2. Ventajas de la utilización de residuos sólidos.....	5
1.2.3. Componentes principales de la biomasa residual.....	5
1.2.3.1. Celulosa.....	5
1.2.3.2. Hemicelulosa	6
1.2.3.3. Lignina	6
1.3. Biocarbón.....	7
1.3.1. Investigación del biocarbón.....	8
1.3.2. Aplicaciones del biocarbón.....	9
1.4. Procesos de pirolización	10

2.	METODOLOGÍA	13
2.1.	Establecimiento de las características que posee la biomasa residual.....	13
2.1.1.	Definición de las muestras	13
2.1.1.1.	Lugar de recolección.....	13
2.1.1.2.	Tiempo de recolección	14
2.1.1.3.	Estado de la biomasa residual	14
2.1.2.	Método de recolección	14
2.2.	Condiciones de operación del equipo.....	17
2.2.1.	Temperatura	17
2.2.2.	Tiempo de permanencia.....	17
2.2.3.	Tasa de calentamiento	17
2.2.4.	Tamaño y forma de la partícula.....	18
2.2.5.	Estado de la biomasa.....	18
3.	PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO	19
3.1.	Especificaciones del equipo	19
3.1.1.	Casa de la calidad.....	19
3.1.1.1.	Voz del usuario	19
3.1.1.2.	Voz del ingeniero	20
3.1.1.3.	Análisis de la casa de la calidad.....	20
3.1.1.4.	Conclusiones de la casa de la calidad.....	21
3.1.2.	Especificaciones técnicas	22
3.2.	Análisis funcional	23
3.2.1.	Definición del análisis funcional.....	23
3.2.2.	Determinación de módulos.....	25
3.3.	Alternativas de diseño para cada módulo.....	25
3.3.1.	Módulo 1: Sistema de triturado.....	25
3.3.1.1.	Alimentación de la biomasa al equipo	25
3.3.1.2.	Disminución de la granulometría de la biomasa	26

3.3.1.3. Alternativas de módulos	27
3.3.1.4. Evaluación y selección de alternativas del módulo 1	29
3.3.2. Módulo 2: Sistema de pirolización	32
3.3.2.1. Disposición de la biomasa.....	32
3.3.2.2. Generación de calor en el sistema	33
3.3.2.3. Alternativas de módulos	34
3.3.2.4. Evaluación y selección de alternativas del módulo 2	35
3.3.3. Módulo 3: Sistema de separación	37
3.3.3.1. Separar bioaceite y biogás.....	37
3.3.3.2. Evacuación de biocarbón	38
3.3.3.3. Alternativas de módulos	39
3.3.3.4. Evaluación y selección de alternativas del módulo 3	41
4. CÁLCULOS Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS	44
4.1. Diseño del sistema de triturado	44
4.1.1. Potencia del triturador	44
4.1.2. Sistema triturador	45
4.1.2.1. Placa base e Impulsadores	45
4.1.2.2. Aro desfibrador	46
4.1.2.3. Eje de apoyo	48
4.1.2.4. Diámetro del eje.....	53
4.1.2.5. Selección de elementos normalizados	53
4.1.3. Dimensionamiento de la tolva	55
4.2. Diseño del sistema de pirolización	58
4.2.1. Cámara interna	58
4.2.2. Soportes internos	60
4.2.3. Cámara externa	61
4.2.3.1. Espesor del material refractario.....	62
4.2.3.2. Pared externa	67

4.2.4.	Aporte de calor al sistema.....	67
4.2.4.1.	Energía necesaria para calentar el sistema.....	68
4.2.4.2.	Energía necesaria para mantener caliente al sistema	70
4.3.	Diseño de tuberías de alimentación	73
4.4.	Soportes externos	75
4.5.	Cálculo del aislante en la tubería	76
4.6.	Diseño del sistema de separación.....	77
4.6.1.	Transferencia de calor en la tubería	77
4.6.2.	Transferencia de calor en el condensador.....	79
5.	ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN	81
5.1.	Análisis de la biomasa.....	81
5.2.	Entorno de simulación OpenFoam	82
5.2.1.	Estructura de un caso	83
5.2.2.	Solucionador biomassGasificationFoam	84
5.2.3.	Ecuaciones gobernantes.....	86
5.3.	Comprobación del solucionador y resultados	92
5.3.1.	Comprobación.....	93
5.3.2.	Resultados	97
5.4.	Discusión	99
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
6.1.	Conclusiones	103
6.2.	Recomendaciones	104
	Bibliografía.....	106
	ANEXOS.....	112
	ANEXO I. Especificaciones y dimensiones de equipos trituradores de basura.....	113
	ANEXO II. Cálculos de diseño	124
	ANEXO III. Planos de diseño	142

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Componente unitario de celosa.....	6
Figura 1.2. Alcoholes que forman la lignina.	6
Figura 1.3. Composición microscópica del biocarbón.	7
Figura 1.4. Eficiencia en la conversión de biomasa a biocarbón.	8
Figura 1.5. Mapa del rio amazonas en Brasil mostrando algunos de los sitios conocidos (cuadrados blancos) e investigados (figuras negras) de Terra Preta.	8
Figura 1.6. Número total de artículos sobre biocarbón por el año de publicación.....	9
Figura 1.7. Horno tradicional para la generación de biocarbón por pirólisis lenta.....	12
Figura 3.1. Casa de la calidad para un equipo generador de biocarbón.....	21
Figura 3.2. Análisis funcional.	23
Figura 3.3. Diagrama funcional del equipo.....	24
Figura 3.4. Tolva trapezoidal.....	26
Figura 3.5. Tolva mixta.	26
Figura 3.6. Sistema triturador de R.S.....	27
Figura 3.7. Cuchilla trituradora.....	27
Figura 3.8. Alternativa 1 del módulo 1.....	28
Figura 3.9. Alternativa 2 del módulo 1.....	28
Figura 3.10. Alternativa 3 del módulo 1.....	29
Figura 3.11. Alternativa 4 del módulo 1.....	29
Figura 3.12. Reactor estático.	33
Figura 3.13. Horno de eje.	33
Figura 3.14. Generación de calor por combustible externo simple.....	34
Figura 3.15. Alternativa 1 del módulo 2.....	35
Figura 3.16. Alternativa 2 del módulo 2.....	35
Figura 3.17. Sistema reciclador.	38
Figura 3.18. Sistema simple.....	38
Figura 3.19. Sistema simple.....	39
Figura 3.20. Separador ciclónico.....	39
Figura 3.21. Alternativa 1 del módulo 3.....	40
Figura 3.22. Alternativa 2 del módulo 3.....	40
Figura 3.23. Alternativa 3 del módulo 3.....	40
Figura 3.24. Alternativa 4 del módulo 3.....	40
Figura 4.1. Partes del sistema triturador.	45
Figura 4.2. Placa base e impulsadores.	46

Figura 4.3. Aro desfibrilador.....	46
Figura 4.4. Aro desfibrilador.....	47
Figura 4.5. Eje de apoyo con cargas.....	48
Figura 4.6. Secciones del eje de apoyo.	50
Figura 4.7. Tolva superior	56
Figura 4.8. Tolva inferior	56
Figura 4.9. Mitad de sección de la tolva completa.....	57
Figura 4.10. Análisis de vibraciones en el equipo triturador.	58
Figura 4.11. Modelo de columna empotrado articulado.....	60
Figura 4.12. Disposición de los materiales y flujo de calor.	61
Figura 4.13. Perfil de temperaturas	62
Figura 4.14. Variación del número de Nusselt a lo largo de un tubo.	63
Figura 4.15. Análisis de resistencias térmicas para el flujo de calor perdido.	63
Figura 4.16. Análisis de resistencias térmicas en la sección externa del reactor sin material refractario.	65
Figura 4.17. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo	68
Figura 4.18. Análisis de resistencias para las pérdidas de calor.	69
Figura 4.19. Sistema de alimentación.	74
Figura 4.20. Disposición final de la tubería de alimentación.....	75
Figura 4.21. Análisis de resistencias en la tubería.	76
Figura 4.22. Análisis de pérdida de temperatura en la tubería.	78
Figura 4.23. Condensador.	80
Figura 4.24. Equipo completo.	80
Figura 5.1. Estructura básica de un caso en OpenFoam.	84
Figura 5.2. Estructura del solucionador biomassGasificationMedia.....	85
Figura 5.3. Secuencia de procesos en el proceso de conversión térmica de la biomasa .88	
Figura 5.4. Estructura del caso a solucionar.	89
Figura 5.5. Comparación de la masa perdida por Kwiatkowski et al. y la simulación del presente trabajo.....	93
Figura 5.6. Comparación de la tasa de pérdida de masa.	93
Figura 5.7. Comparación del cambio en la densidad de la celulosa en la simulación de este caso (azul) y en la simulación teórica (rojo).....	94
Figura 5.8. a) Cambio en la densidad de los componentes sólidos. b) Acercamiento al cambio de densidad de la lignina y de la humedad. c) Comparación del comportamiento de la densidad a diferentes tasas de calentamiento, donde “cell” y “char” están a una tasa de 10 °C/min y “cel30” y “char30” están a una tasa de 30 °C/min.	95

Figura 5.9. Puntos dentro del reactor.....	96
Figura 5.10. a) Temperatura del gas en diferentes puntos dentro de la biomasa residual. b) Temperatura del gas en diferentes puntos del sólido en la simulación teórica.	96
Figura 5.11. Porcentaje de biocarbón generado a diferentes temperaturas para 30 minutos.....	97
Figura 5.12. Fracción másica de los gases generados.	98
Figura 5.13. Fracción másica de CO ₂ a diferentes temperaturas.	98
Figura 5.14. a) Distribución de temperatura en el reactor. b) Generación de CO ₂ a una temperatura de 673 K.	99

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1. Características de los procesos de generación de biocarbón.....	11
Tabla 1.2. Rendimientos expresados en % de peso obtenido en función al proceso de pirólisis utilizada con madera como materia prima.	12
Tabla 2.1. Ejemplo de la alteración que sufre la densidad de la biomasa residual.	14
Tabla 2.2. Pesos de los crisoles.	15
Tabla 2.3. Calcinación de las muestras.	16
Tabla 2.4. Peso final de las muestras.	16
Tabla 2.5. Características aproximadas de la biomasa residual a utilizarse.....	16
Tabla 2.6. Condiciones iniciales de operación.	18
Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del equipo.	22
Tabla 3.2. Alternativas para la alimentación de la biomasa al equipo.	26
Tabla 3.3. Alternativas para la disminución de la granulometría de la biomasa.....	27
Tabla 3.4. Opciones del módulo 1.....	28
Tabla 3.5. Alternativas para el sistema de triturado.	28
Tabla 3.6. Evaluación de los criterios para el módulo 1.	30
Tabla 3.7. Criterio: Uniformidad de triturado.	30
Tabla 3.8. Criterio: Seguridad.	30
Tabla 3.9. Criterio: Resistencia mecánica.	31
Tabla 3.10. Criterio: Fácil ingreso de material.	31
Tabla 3.11. Criterio: Facilidad de diseño.	31
Tabla 3.12. Conclusiones módulo 1.....	32
Tabla 3.13. Alternativas para la alimentación de la biomasa al equipo.	33
Tabla 3.14. Alternativas para la generación de calor en el sistema.....	34
Tabla 3.15. Opciones del módulo 2.....	34
Tabla 3.16. Alternativas para el sistema de pirolización.....	35
Tabla 3.17. Evaluación de los criterios para el módulo 2.	36
Tabla 3.18. Criterio: Distribución de calor.	36
Tabla 3.19. Criterio: Disposición biomasa.	36
Tabla 3.20. Criterio: Facilidad de diseño.	36
Tabla 3.21. Criterio: Tamaño del sistema.....	37
Tabla 3.22. Conclusiones módulo 2.....	37
Tabla 3.23. Alternativas para separar bioaceite y biogás.	38
Tabla 3.24. Alternativas para sacar biocarbón.	39
Tabla 3.25. Opciones del módulo 3.....	40

Tabla 3.26. Alternativas para el sistema de separación.	40
Tabla 3.27. Evaluación de los criterios para el módulo 3.	41
Tabla 3.28. Criterio: Eficiencia del sistema.	42
Tabla 3.29. Criterio: Seguridad.	42
Tabla 3.30. Criterio: Tamaño del sistema.....	42
Tabla 3.31. Criterio: Facilidad de diseño.	43
Tabla 3.32. Conclusiones módulo 3.	43
Tabla 4.1. Benchmarking de equipos.	44
Tabla 4.2. Datos para el diseño del sistema triturador.	45
Tabla 4.3. Factor Kb para cada sección.	51
Tabla 4.4. Límite de resistencia a la fatiga Se para cada punto.	52
Tabla 4.5. Factores de concentración de esfuerzo para cada sección.	52
Tabla 4.6. Obtención de diámetros para cada sección.	53
Tabla 4.7. Factores de concentración de esfuerzo para cada sección.	54
Tabla 4.8. Características de motores monofásicos.	54
Tabla 4.9. Partes de la tolva trapezoidal.	56
Tabla 4.10. Análisis de la parte inferior de la tolva trapezoidal.	56
Tabla 4.11. Radio del material refractario.	66
Tabla 4.12. Características de la pared de material refractario.	67
Tabla 4.13. Características de la pared externa.	67
Tabla 4.14. Clasificación de los gases combustibles.	71
Tabla 4.15. Presiones de uso normal en los aparatos.	72
Tabla 4.16. Gas necesario para calentar el equipo.	73
Tabla 4.17. Propiedades los gases a 673 K.	77
Tabla 5.1. Datos típicos de un análisis elemental para biomasa residual.	82
Tabla 5.2. Propiedades físicas y constantes cinéticas de la biomasa residual usada en la simulación.	92

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Término	Unidad SI
T	Torque	N·m
P_m	Potencia del motor	W
ω	Velocidad angular	rad/s
r	Radio	m
σ_{max}	Esfuerzo equivalente máximo	MPa
F_s, n	Factor de seguridad	
I	Inercia	kg·m ²
α	Aceleración angular	rad/s ²
$\Delta\omega$	Variación de la velocidad angular	rad/s
t	Tiempo	s
m	Masa	kg
F	Carga	N
S'_e	Límite de resistencia a la fatiga	MPa
S_{ut}	Resistencia a la tensión	MPa
S_y	Resistencia a la fluencia	MPa
S_e	Límite de resistencia a la fatiga en un punto crítico de la geometría	MPa
k_a	Factor de modificación por condición superficial	
k_b	Factor de modificación por tamaño	
k_c	Factor de modificación por carga	
k_d	Factor de modificación por temperatura	
k_e	Factor de modificación por confiabilidad	
a	Factor dependiente del tipo de superficie	
b	Factor exponente dependiente del tipo de superficie	
d	Diámetro del eje	mm
K_f	Factor de concentración del esfuerzo por fatiga.	
K_{fs}	Factor de concentración del esfuerzo por fatiga en corte.	
q_m	Sensibilidad de la muesca.	
q_{ms}	Sensibilidad de la muesca en corte.	
K_t	Factor de concentración de esfuerzos.	
K_{ts}	Factor de concentración de esfuerzos en corte.	
M_a	Momento amplitud	N·mm

M_m	Momento medio	N·mm
T_a	Torque amplitud	N·mm
T_m	Torque medio	N·mm
P_e	Potencia eléctrica	kW
SF	Factor de servicio	
Ne	Eficiencia nominal	
V	Volumen	m ³
H	Altura	m
P	Densidad	kg/m ³
P	Presión	MPa
n_m	Moles de gas	mol
R_g	Constante universal de los gases ideales	J/(K·mol)
T_a	Temperatura absoluta	K
m_m	Masa molecular de la mezcla de gases	g/mol
e	Espesor	mm
E	Eficiencia de soldadura	
σ	Esfuerzo	MPa
c	Perímetro de la base	m
P_{cr}	Peso crítico	N
E	Módulo de elasticidad	GPa
L_c	Altura de la columna	m
E_T	Módulo de elasticidad del acero a diferentes temperaturas	GPa
Q_{alim}	Flujo de calor de alimentación	W
Q_b	Flujo de calor a la biomasa	W
Q_p	Flujo de calor perdido con aislante	W
Q_{psr}	Flujo de calor perdido sin material refractario	W
T_i	Temperatura dentro de la cámara vacía	K
T_∞	Temperatura ambiente	K
R	Resistencia	K/W
λ	Conductividad térmica	W/(m·K)
L	Altura de la cámara externa	m
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección	W/(m ² ·K)
T_m	Temperatura media	°C
Nu	Número de Nusselt	
Gr	Número de Grashof	
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²

β	Coeficiente de expansión térmica volumétrica	K^{-1}
D	Diámetro de la cámara externa	m
Ra	Número de Rayleigh	
Pr	Número de Prandtl	
ε	Emisividad del acero	
θ	Constante stefan-boltzmann	$W/(m^2 \cdot K^4)$
R'	Resistencias sin material refractario	K/W
Q	Energía necesaria para calentar	MJ
C _e	Calor específico	J/(g·K)
n	Densidad relativa	
\dot{Q}	Caudal	m ³ /h
U	Coeficiente Global de Transferencia de Calor	$W/(m^2 \cdot K)$
A	Área	m ²
W _t	Peso total	kg
\dot{m}	Flujo másico	kg/s
T _e	Temperatura al llegar al condensador	°C
T _{sg}	Temperatura de salida del gas	°C
T _{cf}	Temperatura del gas a la salida del condensador	°C

Subíndices

Símbolo	Término
---------	---------

A	Análisis en el punto A del eje
t	Total
b	Biomasa
pb	Placa base
B	Análisis en el punto B del eje
m	Masa
i	Cámara interna
to	Tolva
g	Gas
r	Radial
ax	Axial
cd	Conducción
1	Pared vacía
2	Pared externa

mr	Material refractario
ac	Acero
s	Superficie
a	Aire
cv	Convección
rad	Radiación
GLP	Gas licuado de petróleo
tb	Tubería
ai	Aislante

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es el diseño detallado de un pirolizador que utiliza como materia prima residuos sólidos orgánicos con bajo contenido de humedad. Para el diseño térmico se realizó una simulación con el software OpenFoam que permitió manipular las variables del proceso tales como: la temperatura, el tamaño de partícula, la tasa de calentamiento, etc.

La simulación se realizó con tres temperaturas diferentes; 673, 773 y 873 K, a presión atmosférica (1 atm) y con un tiempo de retención de 30 minutos, en los tres casos. De la simulación del proceso de pirólisis se obtuvieron tres productos: biocarbón, biogás y bioaceite. Con los resultados obtenidos y utilizando ecuaciones principalmente de transferencia de calor y mecánica de materiales se dimensionó las partes del equipo, obteniendo un equipo móvil, lo más compacto (0,9 m de altura por 0,52 m de diámetro) y ligero posible (146 kg) para procesar una carga de 10 kg de biomasa, con capacidad para triturar dicha biomasa en una forma más homogénea antes del proceso de pirólisis, y con un sistema de pos procesamiento para la separación del biogás y bioaceite.

La simulación basada en el solucionador biomassGasificationFoam muestra que a menor temperatura se obtiene mayor cantidad de biocarbón, que la tasa de calentamiento influye más en reactores estáticos, y que este tipo de software es de gran ayuda para optimizar diseños de reactores termoquímicos. En estas condiciones la composición del producto resultante fue 17,5 % de biocarbón, 11 % de biogás y 71,5 % de bioaceite.

Palabras clave: Biocarbón, diseño y simulación, pirolizador, residuos sólidos orgánicos simulación OpenFoam, biomassGasificationFoam

ABSTRACT

The objective of this work is the detailed design of a pyrolyzer that uses organic solid waste with low moisture content as a raw material. For the thermal design, a simulation was carried out with the OpenFoam software that allowed to manipulate the variables of the process such as: temperature, particle size, heating rate, etc.

The simulation was performed with three different temperatures; 673, 773 and 873 K, at atmospheric pressure (1 atm) and with a retention time of 30 minutes, in all of this three cases. From the simulation of the pyrolysis process three products were obtained: biochar, biogas and bio-oil. With the results obtained and using mainly heat transfer and mechanic of materials equations, the parts of the equipment were dimensioned, obtaining a mobile equipment as compact (0,9 m high by 0,52 m in diameter) and light (146 kg) as possible, to process a load of 10 kg of biomass, with the capacity to crush said biomass in a more homogenous form before the pyrolysis process and with a post-processing system for the separation of biogas and bio-oil.

The simulation based on the solver biomassGasificationFoam shows that at a lower temperature, a greater amount of biochar is obtained, that the heating rate has a greater influence in static reactors, and that this type of software is of great help in optimizing designs of thermochemical reactors. Under this conditions, the composition of the resulting products was 17,5 % biochar, 11 % biogas and 71,5 % bio-oil.

Keywords: Biochar, design and simulation, pyrolysis, solid organic waste, OpenFoam simulation, biomass GasificationFoam

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN EQUIPO GENERADOR DE BIOCARBÓN UTILIZANDO MATERIA ORGÁNICA RESIDUAL”

INTRODUCCIÓN

Entre los problemas ambientales del mundo actual están; el cambio climático, la erosión y contaminación de los suelos, entre otros. Algunas de las causas son las emisiones producidas por la combustión de combustibles fósiles, el uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas en cultivos, y la inadecuada gestión de residuos sólidos (R.S.).

Los efectos del cambio climático son cada vez más notables, de hecho nuestro planeta se está calentando a una tasa comparable con los peores escenarios planteados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. El acuerdo de París para no incrementar la temperatura del planeta en más de 2 °C permite emitir 1000 billones de toneladas de CO₂ como máximo hasta mediados de este siglo, pero tan sólo en el 2013 ya se superó el 40% de este valor (Lehmann y Joseph, 2009).

A esto se suma una crisis de la seguridad alimentaria debido a la erosión del suelo a causa del mal manejo del mismo. “La erosión se lleva de 25 a 40 000 millones de toneladas de la capa arable del suelo cada año, las pérdidas anuales en la producción de cereales debido a la erosión se calculan en 7,6 millones de toneladas. Si no se toman medidas para reducir la erosión, las proyecciones indican una reducción de producción de más de 253 millones de toneladas en 2050. Esta pérdida de rendimiento sería equivalente a eliminar 1,5 millones de km² de tierras agrícolas, o aproximadamente toda la tierra cultivable en la India.”(FAO, 2017)

“Aproximadamente un 8% de todo el CO₂ en la atmósfera es absorbido por plantas cada año. Si sólo una pequeña porción del carbono capturado por las plantas puede ser pirolizado y transformado a biocarbón, los prospectos de la humanidad serán mucho mejores en la transición a una economía de bajas emisiones” Lehmann y Joseph, 2009. Además, el biocarbón incrementa la eficiencia en la productividad agrícola y reduce la cantidad de carbono, absorbido por las plantas, que se libera a la atmósfera.

Objetivo general

Diseñar y simular un equipo generador de biocarbón utilizando materia orgánica residual.

Objetivos específicos

- Determinar las condiciones de trabajo óptimas para obtener los parámetros físico-químicos ideales para producción de biocarbón.
- Proponer el diseño de un equipo generador de biocarbón que cumpla con las condiciones identificadas.
- Simular el sistema propuesto y determinar la eficiencia teórica que se puede alcanzar en el equipo generador de biocarbón para obtener información que complemente el diseño realizado.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Biomasa

La Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 cataloga la biomasa como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”.

La biomasa contiene energía, la misma que proviene de la energía solar que se transforma a energía química en el proceso de fotosíntesis. La energía se acumula en los enlaces de los compuestos orgánicos de los que está formada. La materia prima se forma a partir de carbono, hidrógeno, fósforo, potasio, etc.

1.1.1. Clasificación de la biomasa

Una de las formas para clasificar a la biomasa es en; biomasa vegetal cuando proviene de la actividad fotosintética de los vegetales, y biomasa animal o excremento, que se produce por medio de animales que utilizan en su alimentación biomasa vegetal.

También puede clasificarse en dos grupos dependiendo de si el hombre influye en su forma de generación:

- Biomasa natural: Es la que se produce en la naturaleza y en la que los humanos no intervienen.
- Biomasa residual: Es el residuo sólido generado en las actividades ganaderas, agrícolas, silvícolas, en la industria agroalimentaria y residuos sólidos urbanos.

1.1.2. Ventajas y desventajas de la utilización de biomasa

El uso de biomasa para diferentes actividades presenta ventajas y desventajas con relación al uso de fuentes tradicionales. Entre las ventajas se presentan:

- Es una fuente inagotable en cuanto proviene de la energía solar en su totalidad. Sólo en Europa, en el año 2014 el consumo de bioenergía alcanzó los 105.489 Ktoe (unidad de energía que genera mil toneladas de petróleo) según la asociación europea de biomasa AEBIOM.
- Se puede tener un aprovechamiento o transformación completa al reusar la biomasa, obteniendo principalmente bioelectricidad, biocombustibles, material para generar biocalor y biofertilizantes.
- Reduce el deterioro medioambiental.

Las desventajas de utilizar biomasa vegetal son:

- Se necesitan de grandes volúmenes de biomasa para que su comercialización sea viable por lo que sería necesario mezclar diferentes tipos de biomasa vegetal. Además, presenta una baja densidad lo que la hace muy difícil para manejar y almacenar para obtener un buen aprovechamiento energético.
- Necesita de acondicionamiento o algún tipo de transformación para que su uso sea factible.
- Demanda muchos costos de operación.

1.2. Residuos sólidos

Se definen como los desperdicios o sobrantes de las actividades humanas, por su origen se clasifican en residuos sólidos (R.S.) orgánicos e inorgánicos.

Los R.S. orgánicos presentan la característica de degradarse o desintegrarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica, mientras que los R.S. inorgánicos sufren una descomposición natural muy lenta que no puede ser aprovechada a menos que se recicle por medio de procesos químicos o mecánicos, en muchos casos no pueden ser reaprovechados.

En el reporte "What a waste: A global review of solid waste management" del banco mundial realizado en el año 2012 se habla de una generación global de R.S. de 1.3 billones de toneladas en el año 2010 y que podría llegar a más de 2.2 billones de toneladas por año para el año 2025 (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012). Para el año 2018 el valor promedio está en 1.9 billones de toneladas (Atlas d-waste, 2018).

La ineficiencia en la gestión de los R.S. provoca varios problemas, entre estos: producción de gases de efecto invernadero (CH_4 , CO_2) que se liberan directamente a la atmósfera, contaminantes más complejos como los lixiviados debido a la mezcla de diferentes residuos por la falta de clasificación de los mismos, apareamiento de vectores (ratas, cucarachas, mosquitos, etc., que pueden transmitir enfermedades infecciosas), generación de malos olores, disminución del tiempo de vida útil del relleno sanitario, entre otros.

En este proyecto de titulación se utiliza el término de biomasa residual para definir a los residuos sólidos orgánicos urbanos, es decir, desechados en las ciudades, los cuales van a ser utilizados como materia prima para la generación de biocarbón.

1.2.1. Residuos sólidos orgánicos en el Ecuador

La disposición final de los R.S. orgánicos en nuestro país aún es ineficiente. En Ecuador se produce más de 11000 toneladas de R.S. al día, de los cuales un 53,81 % son orgánicos. La disposición final de los R.S. por región muestran para la región costa un 43,4 % de R.S. que son dispuestos a cielo abierto, 41 % es controlado y un 15,6 % es colocado en rellenos sanitarios, para la sierra el 49,5 % de todos los R.S. tienen como destino final rellenos sanitarios, el 9,7 % a cielo abierto y 40,9 % son controlados, en la amazonia el 14,6 % es colocado en cielo abierto, el 24,4 % es controlado y el 61 % es colocado en rellenos sanitarios, y para la región insular se tiene un 33 % colocado a cielo abierto, 33 % controlado y un 33 % enviado a rellenos sanitarios (Estadísticas de información ambiental económica en gobiernos autónomos descentralizados municipales, 2014).

1.2.2. Ventajas de la utilización de residuos sólidos

- Los R.S. pueden ser utilizados como una fuente de energía al ser incinerados, como ocurre en países como Noruega. "Cuatro toneladas de residuos tienen la misma energía que una tonelada de combustible", dice Pal Mikkelsen, director de la agencia Waste-to-energy.
- La biomasa residual no se mezclaría con otros tipos de residuos disminuyendo el riesgo medioambiental y el riesgo sobre la salud.
- La clasificación genera empleo y mejores condiciones de trabajo para las personas que trabajan en este campo.
- El uso de biomasa residual transformada a biocarbón no sólo permitirá la mejora de la calidad del suelo agrícola al ser utilizado como biofertilizante, sino además, la reducción de la contaminación atmosférica con el aprovechamiento de los gases de combustión generados en su producción.

1.2.3. Componentes principales de la biomasa residual

Los principales componentes de la biomasa son la celulosa, hemicelulosa y lignina.

1.2.3.1. Celulosa

Normalmente es el componente más abundante de la materia con biomasa lignocelulosa. Está compuesta de unidades repetidas de celobiosa, cada unidad presenta dos unidades de anhidroglucosa y están hechas por azúcares de condensación lineal, como se muestra

en la figura 1.1, presenta una estructura cristalina que consiste en cadenas lineares unidas por enlaces de hidrógeno y fuerzas de van der Waal.

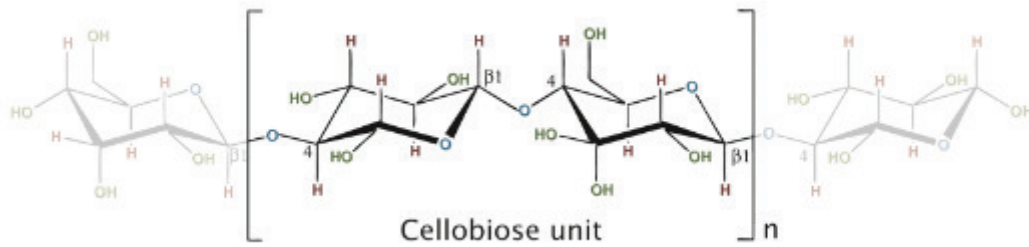


Figura 1.1. Componente unitario de celosa.
(Fuente: Thomsen, 2011)

1.2.3.2. Hemicelulosa

Es un polímero mucho menos uniforme que la celulosa, y está compuesta de una larga variedad de hexosas, pentosas y deoxihexosas. Las derivaciones y variaciones en la composición hacen que la hemicelulosa tenga una estructura menos cristalina que la celulosa y que tenga polímeros mucho más pequeños. Al ser, también, una estructura mucho más amorfa presenta una estabilidad química y térmica más baja.

1.2.3.3. Lignina

Está construida por tres alcoholes diferentes que contienen un aro aromático. Estos alcoholes se muestran en la figura 1.2.

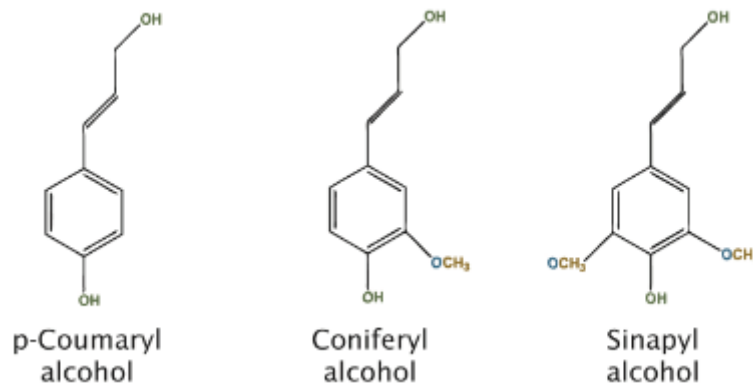


Figura 1.2. Alcoholes que forman la lignina.
(Fuente: Thomsen, 2011)

La lignina tiene una estructura muy amorfa y sus estructuras individuales pueden unirse de muchas maneras diferentes. A diferencia de la celulosa y de la hemicelulosa, la lignina no puede ser despolimerizada a sus monómeros originales. Las diferencias en la composición y estructura de la lignina cambian dependiendo de la biomasa, y cambia dentro del material, haciendo que sea muy difícil describir su descomposición térmica.

1.3. Biocarbón

El término “biocarbón” se introdujo en el año 1999 como un término para diferenciar entre carbón activado hecho de combustibles fósiles y el carbón activado hecho con biomasa.

El biocarbón es utilizado para aplicaciones medioambientales y en mejoramiento de suelos, que es la principal diferencia con el carbón normal, el cual es utilizado en su mayoría para la obtención de energía calórica o eléctrica, uso doméstico, etc.; y sus variedades como hollín, carbón activado, etc., otra diferencia característica es que el biocarbón no se inflama tan fácilmente.



Figura 1.3. Composición microscópica del biocarbón.
(Fuente: Ok y Uchimiya, 2015)

El proceso de pirólisis genera un material que reduce entre el 25-75 % la masa orgánica inicial del material y cambia su composición, generando una cierta cantidad de carbono orgánico, el cual no sólo sirve como un medio para mitigar los gases de efecto invernadero liberados al ambiente, sino también contribuye a las propiedades del biocarbón en sí, como la absorción o mineralización. Además, cambian los porcentajes de otros elementos como: fósforo (P), calcio (C), magnesio (Mg) e incluso nitrógeno (N).

Aunque estos sean los elementos más comunes que se consiguen al generar biocarbón, no se puede asegurar que es un material concretamente definido, ya que sus propiedades pueden variar dependiendo de múltiples factores.

Estas características lo convierten en un biofertilizante no contaminante que mejora la calidad de los suelos, también aumenta la productividad de los cultivos (Lehmann, 2011)

y evita el uso de agroquímicos, ya que en el año 2014 en nuestro país se utilizaron 362 kg de fertilizante por hectárea de tierras cultivables (Banco Mundial, 2016).

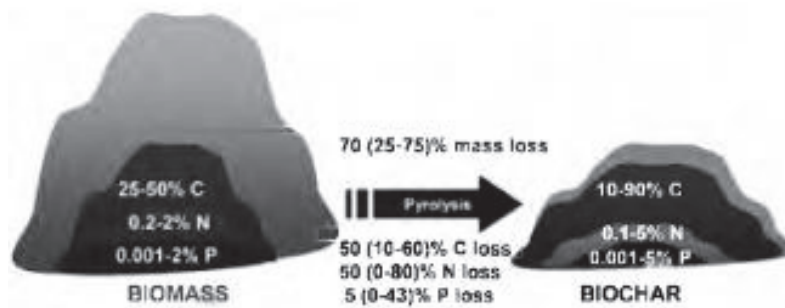


Figura 1.4. Eficiencia en la conversión de biomasa a biocarbón.
(Fuente: Lehmann y Joseph, 2009)

1.3.1. Investigación del biocarbón

Se han encontrado evidencias de la aplicación de biocarbón algunos siglos atrás en una comunidad de la región amazónica de Brasil conocida como Terra Petra (figura 1.5). Estas tierras se caracterizan por tener un alto contenido de carbón, por eso se afirma que las primeras formas de investigación fueron en su mayoría por observación de la forma en que las plantas se desarrollaban bajo efectos del carbón (Lehmann, 2011).

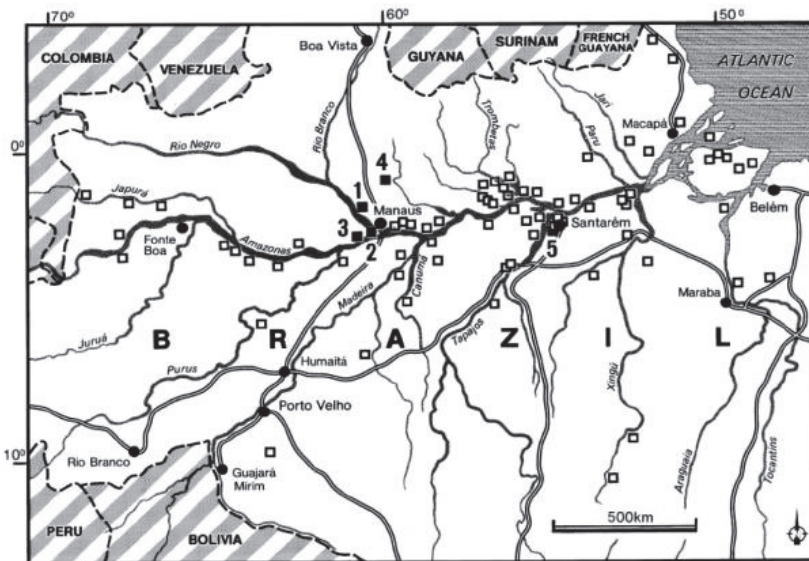


Figura 1.5. Mapa del río Amazonas en Brasil mostrando algunos de los sitios conocidos (cuadrados blancos) e investigados (figuras negras) de Terra Preta.
(Fuente: Brewer, 2012)

Las primeras aplicaciones documentadas sobre biocarbón en libros de agricultura datan a mediados del siglo XIX, con un incremento de publicaciones que se fue reduciendo a mediados del siglo XX, probablemente debido al desarrollo de fertilizantes inorgánicos.

En años recientes se han descubierto pruebas de que el biocarbón no sólo es más estable que cualquier otro añadido al suelo, sino también que incrementa mucho más la disponibilidad de nutrientes que al hacer uso de fertilizantes (Lehmann, 2011; Laird et al., 2010).

El rápido crecimiento de la investigación del biocarbón llegó a la creación de la “Iniciativa Internacional del Biocarbón” en el año 2006 donde varios representantes de diferentes áreas ayudan, comparten y presentan nueva información con el fin de lograr producir un billón de toneladas de biocarbón al año dentro de los siguientes 50 años. En Scopus, se muestran todos los avances en la investigación global del biocarbón. La Investigación ha incrementado rápidamente en los últimos años (figura 1.6).

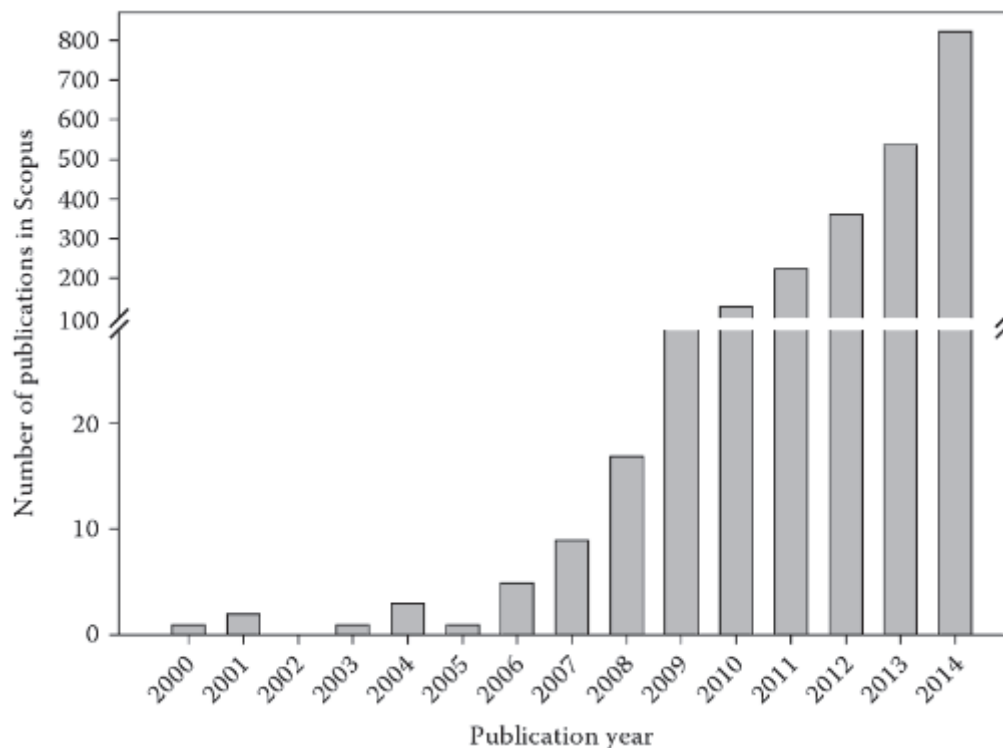


Figura 1.6. Número total de artículos sobre biocarbón por el año de publicación.
(Fuente: Ok y Uchimiya, 2015)

1.3.2. Aplicaciones del biocarbón

Las aplicaciones del biocarbón en suelos y en sistemas de agua son las más investigadas (Lehmann, 2011; Ahmad et al., 2013) pero otras aplicaciones aún siguen siendo investigadas como su utilización en la alimentación de animales que influye en su aparato digestivo absorbiendo toxinas (Avantaggiatoa et al., 2003) o su mezcla con diferentes sustancias como estiércol que pueden mejorar la eficiencia de su aplicación (Major, 2010). Se han encontrado evidencias de que gracias a la microporosidad y su

gran área superficial se tienen resultados positivos con respecto a la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos. (Mohan et al., 2011). Las características de absorción de contaminantes dependen principalmente de las condiciones en las que la pirólisis que se haya realizado y del tipo de biomasa. Por ejemplo, en Corea, el biocarbón producido por la maleza de búfalo (*Ambrosia trifida* L.), una planta invasiva, se ha usado para remover el tricloroetileno de aguas contaminadas (Ahmad et al., 2013). Los absorbentes magnéticamente activados del biocarbón pueden ser separados para remover metales pesados, por ejemplo, el arsénico (Zhang et al., 2013).

El biocarbón también ha sido propuesto para la mitigación del cambio climático al absorber carbón y depositarlo en el suelo. Este tipo de investigación está empezando a incrementarse por sus resultados, se ha estudiado los efectos de flujos de óxido nitroso, dióxido de carbono y metano en presencia de biocarbón en suelos cultivables de Finlandia (Karhu et al., 2011). En otros estudios (Kimetu & Lehmann, 2010; Lu et al., 2010) se han encontrado tanto una eliminación de flujos de CO₂ como ningún efecto específico al añadir biocarbón en los suelos, es decir, se han encontrado efectos tanto positivos como no influyentes, los cuales pueden ser debidos a la naturaleza del biocarbón, los suelos donde se lo aplica y variaciones en los estudios.

El análisis de biocarbón generado por biomasa residual urbana ha sido estudiado por Moses Duku et al. en Ghana en el año 2011, donde se tiene un 68% de basura sólida municipal (MSW, por sus siglas en inglés) que puede ser utilizada como materia prima para generar biocarbón, sin embargo se advierte de la posible presencia de metales pesados en la MSW lo que presentaría un problema para su utilización, por David Granatstein et al. en la universidad estatal de Washington en Estados Unidos en el año 2009 donde se encontró que se puede obtener hidrocarburos poliaromáticos y dioxinas con niveles de toxicidad muy bajas para una mejor aplicación en suelos, entre otros.

1.4. Procesos de pirolización

El biocarbón es el producto sólido de procesos termoquímicos como pirólisis o carbonización, en el cual una cantidad de biomasa, de cualquier tipo, es calentada por encima de 250 °C en ausencia o con limitada cantidad de oxígeno. Bajo estas condiciones los polímeros constitutivos de la biomasa toman una forma carbónica.

Los procesos termoquímicos tienen los siguientes pasos:

1. Secado de la biomasa: La mayoría de biomasa generada por residuos de comida orgánica mezclada contiene entre un 50 y 80% de humedad. Se debe eliminar la presencia de agua ya que se necesita de más energía para trabajar con biomasa húmeda porque la evaporación del agua es un proceso endotérmico.
2. Volatilización o pirólisis: El término pirólisis proviene de dos términos, “pyro” que es la acción de enviar calor y de “lysis” que se da cuando los enlaces térmicos se rompen. En este proceso ocurren dos tipos de reacciones, el proceso en el que los enlaces térmicos del material se rompen, formando bioaceites y gases, y la reacción de policondensación la cual es la responsable de formar biocarbón.
3. Si existe demasiado oxígeno se genera sólo dióxido de carbono y agua, pero si no hay suficiente oxígeno, se pueden obtener gases pesados o alquitrán.
4. Cuando todas las partes volátiles de la biomasa se oxidan y se eliminan queda una cascara dura y caliente que aún reacciona con el oxígeno en un proceso mucho más lento y sin llamas. A esto se denomina oxidación de la fase sólida, aquí la mayoría del carbón se oxida generando dióxido de carbono y queda sólo ceniza del material mineral no combustible.

El proceso depende principalmente de la temperatura, tiempo de permanencia en el que las partículas de biocarbón estén en la atmósfera oxidante, tasa de calentamiento, el tamaño y forma de las partículas, y de la presión que se introduzca al medio. En la tabla 1.1 se presenta las características de los procesos de generación de biocarbón.

Tabla 1.1. Características de los procesos de generación de biocarbón.

Proceso Termoquímico	Rango de temperatura (°C)	Tasa de calentamiento	Presión	Tiempo de residencia	Producto Primario
Pirólisis lenta	350-800	Lenta (<30 °C/min)	Atmosférica	Horas - Días	Biocarbón
Torrefacción	200-300	Lenta (<10 °C/min)	Atmosférica	Minutos - horas	Biomasa estable y friable
Pirólisis rápida	400-600	Muy rápida (1000 °C/seg)	Vacío - Atmosférica	Segundos	Bioaceite
Pirólisis Flash	300-800	Rápida	Elevada	Minutos	Biocarbón, ceniza
Gasificación	700-1500	Moderada - muy rápida	Atmosférica - elevada	Segundos - minutos	Biogás

(Fuente: Brewer, 2012, p. 32)

En el presente trabajo se utilizará el proceso de pirólisis lenta, la cual se caracteriza por presentar tasas de calentamiento lentas y tiempos relativamente largos de permanencia, este proceso genera un producto carbonizado sólido de alta densidad energética y con

gran cantidad de carbono, y también genera como coproducto un ácido líquido denominado ácido piroleñoso y gas combustible.

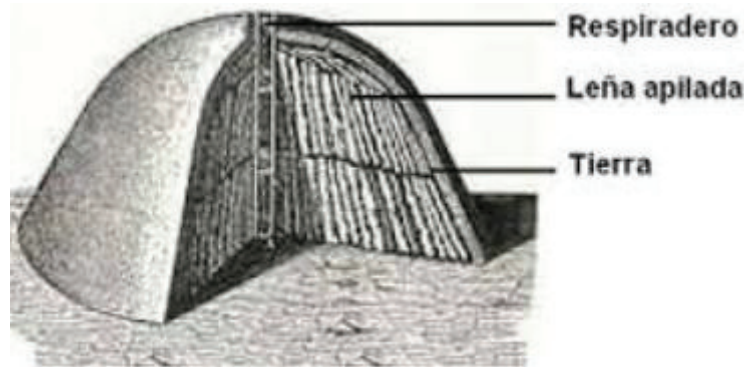


Figura 1.7. Horno tradicional para la generación de biocarbón por pirólisis lenta.
(Fuente: EcuRed, 2015)

Uno de los problemas con la generación tradicional de biocarbón es que lo único que se aprovecha es el biocarbón, las fracciones generadas de bioaceite y de biogás no se utilizan, y al ser enviadas al medio ambiente, éste se contamina, lo que incluso puede causar problemas a la salud, por ejemplo, si la biomasa tiene un alto contenido de sílice, la pirólisis puede formar partículas cristalinas que al ser inhaladas pueden generar silicosis (fibrosis pulmonar) (Shackley y Sohi, 2010).

Todos los procesos generan tres tipos de productos: sólidos (biocarbón y ceniza), líquidos (bioaceite y alquitrán) y gases (biogás). Las condiciones con las que se trabajen obtienen diferente cantidad y calidad de los productos generados.

La tabla 1.2 muestra los rendimientos típicos de los procesos de pirólisis más comunes al trabajar con madera.

Tabla 1.2. Rendimientos expresados en % de peso obtenido en función al proceso de pirólisis utilizada con madera como materia prima.

Proceso	Rendimiento (%)		
	Bioaceites	Biocarbón	Gas
Pirólisis lenta	30	35	35
Pirólisis rápida	75	12	13
Flash pirólisis	50	20	30
Gasificación	5	10	85

(Fuente: Urien A., 2013, p. 21).

2. METODOLOGÍA

2.1. Establecimiento de las características que posee la biomasa residual

Antes de establecer cualquier tipo de definición de datos que ayuden para poder diseñar el equipo se debe tener en claro lo que se quiere generar con el mismo, como se ha visto en el capítulo anterior, se puede definir al proceso de pirólisis para obtener una producción de biocarbón, bioaceite y gas en rangos específicos. Este trabajo de titulación apunta al estudio del biocarbón, creado con biomasa residual, y al análisis de las características óptimas del reactor que va a producirlo para presentar una mejor producción.

El problema es que el biocarbón no es un material perfectamente definido como lo sería un fertilizante comercial, esto se debe principalmente a que la composición y proporción que presenta la biomasa residual no es homogénea, lo que causa una variación significativa en los porcentajes de calidad de producción de biocarbón. Para reducir la incertidumbre de las propiedades que va a presentar el biocarbón es necesario primero definir las características que debe tener la biomasa residual antes de entrar al proceso de pirólisis. Una vez concretadas las características que presentará la biomasa residual se procede a definir las condiciones con las que el equipo va a trabajar puesto que las unas influirán directamente sobre las otras.

2.1.1. Definición de las muestras

Las muestras de la biomasa residual pueden cambiar sus características en un periodo muy corto de tiempo y de igual forma los porcentajes de los componentes de los residuos pueden variar dependiendo del lugar geográfico, del tiempo en el que se las recoja y la estación del año, por ello es importante definir rangos en los que se van a analizar los residuos para que sus características no difieran tanto y que el análisis sea más limitado.

2.1.1.1. Lugar de recolección

La biomasa residual, como se definió, debe ser obtenida de un área urbana, siendo esta el Distrito Metropolitano de Quito. Existen varias formas en las que se pueden obtener estos residuos, en estaciones de transferencia, botaderos de basura, casas, mercados, etc. Para evitar la mezcla con otros tipos de R.S y su posterior clasificación, se optó por la recolección directa desde casas de clase media.

2.1.1.2. Tiempo de recolección

El tiempo de recolección se define por los siguientes factores:

- Estado de descomposición de la biomasa residual: Un hogar promedio de 4 personas desecha sus R.S cada 2 días por lo que la biomasa residual tendrá una ligera descomposición.
- Condiciones climáticas: La ciudad del Distrito Metropolitano de Quito presenta 2 estaciones, la lluviosa y la seca, o invierno y verano respectivamente. El verano va desde junio a septiembre y el invierno de octubre a mayo, pero su clima es muy variable (In-quito, 2016).

Estos valores mostrarían una variación poco influyente en la calidad de biomasa residual recolectada ya que el tiempo de espera y la forma de recolección ayudan a que el estado de la biomasa residual sea generalmente bueno.

2.1.1.3. Estado de la biomasa residual

La densidad, la composición y la cantidad de la biomasa residual serán definidas por las actividades de recolección y tratamiento de la misma como se observa en el ejemplo de la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Ejemplo de la alteración que sufre la densidad de la biomasa residual.

Etapa	Densidad (kg/m ³)
Biomasa residual en recipientes	500
Biomasa residual en camiones compactadores de basura	800
Biomasa residual suelta en estaciones de transferencia	700
Biomasa residual recién rellenada	900
Biomasa residual estabilizada en los rellenos	1100

(Fuente: Propia, 2017)

El estado de la biomasa residual en el punto de recolección influenciará en el análisis de laboratorio y en la cantidad de biomasa que se transformará en biocarbón.

2.1.2. Método de recolección

La recolección de las muestras para su análisis se empezó el día 15 de marzo y terminó el día 17 de marzo de 2017. Se recogió, en 2 diferentes hogares, aproximadamente 2 kg de biomasa residual la cual estaba deliberadamente separada de cualquier residuo

inorgánico. A estas muestras se las trabajó inmediatamente en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional para su análisis.

La metodología de análisis de la biomasa residual se detalla a continuación:

Se decidió tomar cuatro muestras diferentes de la biomasa residual para realizar el estudio, en cuatro crisoles diferentes, por lo que primero se realizó un tarado de los crisoles. Para el tarado primero se realizó una limpieza de los crisoles con agua y jabón, y luego con agua destilada, luego se los introdujo por dos horas en una estufa a 80 °C, después se los colocó en una mufla a 550 °C, que es la temperatura a la cual se va a trabajar con las muestras, por 30 minutos, pasado este tiempo los crisoles fueron colocados en un desecador para absorber la humedad restante. Una vez terminado el proceso y enfriados los crisoles en el desecador a temperatura ambiente se los pesó en una balanza digital, obteniendo los valores mostrados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Pesos de los crisoles.

Crisol	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso Promedio (g)
1	35,8331	35,8345	35,8338
2	35,6055	35,6068	35,6062
3	36,0498	36,0512	36,0505
4	32,1769	32,1780	32,1775
5	285,2	285,6	285,4

(Fuente: Propia, 2017)

Determinados los pesos de los crisoles se procedió a realizar el análisis de las muestras. Para colocar las muestras primero se las trituró para que tengan un tamaño más compacto y se puedan colocar de mejor manera en los crisoles. Cada uno de los crisoles tiene una cantidad aproximada de cuatro gramos de material. Los crisoles con las muestras fueron colocados en la estufa a una temperatura de 70 °C por dos horas, luego se las enfrió por 15 minutos y pesó nuevamente, esta parte del proceso sirve para determinar la cantidad de humedad en la biomasa residual. Luego se los calcinó en la mufla por dos horas a 550 °C, con una rampa de calentamiento de 30 °C/min, se los enfrió y pesó obteniendo los siguientes valores mostrados en la tabla 2.3 y en la tabla 2.4.

Tabla 2.3. Calcinación de las muestras.

Crisol	Peso total (g)	Peso muestras (g)	Peso muestras secas (g)	Contenido de humedad (%)
1	39,5320	3,6982	1,9157	48,1991
2	40,2795	4,6733	1,7853	61,7989
3	40,2859	4,2354	1,8950	55,2581
4	36,4529	4,2754	1,7814	58,3349
5	337,1	51,7	24,1	53,3849
			Promedio	55,3952

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 2.4. Peso final de las muestras.

Crisol	Peso material inerte (g)	Contenido de materia inerte (%)
1	0,0858	4,4788
2	0,0847	4,7444
3	0,1219	6,4327
4	0,0797	4,4769
5	0,7	2,9046
	Promedio	4,6

(Fuente: Propia, 2017)

La tabla 2.5 muestra, en resumen, las características teóricas de la biomasa residual con las que se trabajarán.

Tabla 2.5. Características aproximadas de la biomasa residual a utilizarse.

Característica	Valor real (valor teórico)
Densidad (kg/m ³)	300 (120-480)
Contenido de humedad (%)	55 (50-80)
Contenido de material inerte (%)	4,6 (2-8)
Carbono (%)	48
Oxígeno (%)	37,6
Nitrógeno (%)	2,6

(Fuente Propia, 2017. Chandrappa, R., & Brown, J., 2012)

Ya que la densidad de la biomasa residual varía, se tomó en cuenta el promedio de los valores, es decir 300 kg/m³ como valor para el diseño del equipo. También se asume que la biomasa pasará previamente por un proceso de secado dejando un contenido de humedad de 0,1 %.

Como se puede observar en los valores promedio de las tablas 2.3 y 2.4, y al compararlas con la tabla 2.5 se observa que el contenido de humedad y de materia inerte analizados caen dentro de los valores teóricos lo que reafirma la utilización de estos valores para el estudio a realizar.

2.2. Condiciones de operación del equipo

Una vez definidas las características que podría presentar la biomasa residual, se deben definir las condiciones bajo las que el equipo va a trabajar, esta parte es puramente teórica y se debe realizar un análisis conjunto con la simulación para poder mejorar la producción del biocarbón en un rango aceptable.

2.2.1. Temperatura

Seguramente la más importante de las condiciones que debe cumplir el equipo es la temperatura que alcanza. Esta no sólo definirá los niveles de carbono dentro del biocarbón sino también los costos de manipulación del mismo. Si se trabaja a altas temperaturas (entre 873 a 1173 K) se reduce el porcentaje de carbono, lo que reduce varios beneficios del biocarbón, también disminuye el tamaño de partícula del biocarbón haciendo que su manipulación sea más compleja lo que aumentaría en los costos (Srinivasarao et al., 2013) y reduciría la cantidad de interacciones entre el biocarbón y el suelo. En general los análisis hechos al biocarbón muestran que la temperatura óptima para la producción del mismo, está en un rango entre los 673 y 873 K, según Brewer, 2012. Para el análisis en este trabajo de titulación se utilizarán 3 temperaturas diferentes: 673, 773 y 873 K.

2.2.2. Tiempo de permanencia

El tiempo de permanencia se refiere al tiempo que se deja a la biomasa dentro del equipo una vez alcanzada la temperatura deseada, este valor puede variar desde segundos hasta días, pero para tener una producción enfocada a la obtención de biocarbón se definió que el tiempo de permanencia debería ser entre 10 y 30 minutos según varios estudios (Antal et al., 2003; Granatstein et al., 2009; Şensöz et al., 2000), ya que para este tiempo el rendimiento de carbono fijo alcanza su límite de equilibrio termoquímico. Este valor también influirá directamente en la capacidad de producción del equipo. Se decidió por un tiempo de 30 minutos, que es el más comúnmente analizado ya que se aprecia con más claridad la diferencia en la generación de biocarbón a diferentes temperaturas, y es un tiempo razonable para la simulación.

2.2.3. Tasa de calentamiento

La tasa de calentamiento define, en parte, las propiedades que tendrá el biocarbón. Si su tasa de calentamiento es muy pequeña, no se tienen grandes cambios morfológicos, en cambio a tasas de calentamiento muy altas las estructuras moleculares se destruyen por la calcinación. Por lo que se establecen sus valores en un rango promedio de 30 °C/min.

2.2.4. Tamaño y forma de la partícula

El tamaño de la partícula de la biomasa determinará la transferencia de calor y las reacciones químicas que se tendrán dentro del equipo, y el tamaño de partícula final que tendrá el biocarbón. Partículas grandes alcanzarían temperaturas internas mayores que complican los modelos de pirólisis (Lu et al., 2010). Para la mayoría de modelos estudiados se han analizado partículas con diámetros $\geq 2\text{mm}$ (Lu et al., 2010; Sarkar & Wassgren, 2010).

Diferentes formas de partículas también pueden influenciar en la transferencia de calor y en las tasas de oxidación y desvolatilización. Los modelos se pueden estudiar en formas de partículas diferentes: esférica, cilíndrica y plana (Saastamoinen, 2006), que puede predecir los efectos en la humedad, tamaño, forma, densidad y humedad de las partículas; y en modelos de partícula prismática, cilíndrica y plana (Liliedahl & Sjöström, 1998) cuyo análisis se puede ajustar de una manera sencilla a datos experimentales para el cilindro y computacionales para la esfera, y ofrecen resultados aceptables para el prisma en diámetros menores a 0,3 cm. La forma de las partículas a analizar en este trabajo de titulación es cilíndrica de tamaños menores a 2 mm.

2.2.5. Estado de la biomasa

El estado de la biomasa presenta una característica importante en el análisis y eficiencia del equipo. Una biomasa residual húmeda incrementa el consumo de energía (energía necesaria para secar el material) (Antal & Grønli, 2003), esto haría ineficiente el proceso de pirólisis. Por lo que se consideró diseñar el pirolizador utilizando biomasa seca, para el proceso de secado se consideraron equipos diseñados en la Escuela Politécnica Nacional (Jaramillo & Narváez, 2012; Andrade & Rodríguez, 2009, entre otros).

La tabla 2.6 muestra las condiciones iniciales a las que la máquina trabajará:

Tabla 2.6. Condiciones iniciales de operación.

Condición de operación	Valor
Temperatura (K)	673, 773, 873
Tiempo de permanencia (min)	30
Tasa de calentamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	30
Tamaño de la partícula (mm)	2
Forma de la partícula	Cilíndrica
Estado de la biomasa (%)	Baja humedad, 0,1

(Fuente: Propia, 2017)

3. PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO

3.1. Especificaciones del equipo

La finalidad de este capítulo es determinar las funciones que cumple el equipo, no sólo con respecto al producto a obtener sino también al diseño y complejidad del mismo. Estas funciones, se dividen en principales (por las cuales se adquiere el equipo) y secundarias (las que ayudan a cumplir las funciones principales); se agrupan en conjuntos denominados módulos, cuya finalidad es tener un diseño fácil y organizado.

La selección de las funciones y especificaciones se las analizará utilizando el Diseño para la Calidad o QFD (Quality Function Deployment), que forma parte del diseño concurrente el cual considera los requisitos del usuario y los traduce en requerimientos técnicos para su posterior diseño.

3.1.1. Casa de la calidad

La casa de la calidad es una herramienta en forma de matriz que forma parte del QFD, su objetivo es el relacionar la voz del usuario y la voz del ingeniero mediante correlaciones y evaluaciones técnicas. Entre los beneficios de la implantación del QFD se encuentran los siguientes (Riba, 2002, p. 182):

- Define de forma muy consistente el producto.
- Requiere pocos cambios durante el desarrollo.
- Elimina procesos que no añaden valor.
- Identifica procesos que requieren mejoras.
- Elimina reclamaciones de los usuarios.

3.1.1.1. Voz del usuario

Recoge los requisitos, opiniones y deseos del cliente, estos pueden ser: básicos (tienen relación directa con la satisfacción del cliente), unidimensionales (su mejora aumenta la satisfacción del cliente), y estimulantes (son adiciones poco influyentes en la satisfacción del cliente). Los requisitos por parte del cliente para el equipo generador de biocarbón son:

- Fácil operación
- Buen rendimiento
- Fácil limpieza

- Tamaño manejable
- Liviano
- Seguro
- Bajo costo
- Eficiente
- Buena capacidad de carga

3.1.1.2. Voz del ingeniero

La voz del ingeniero tiene el objetivo de convertir a los requisitos establecidos por la voz del usuario en parámetros técnicos que puedan resolver los requisitos planteados. Los parámetros técnicos escogidos son:

- Mantenimiento, ensamble
- Volumen, dimensiones
- Peso
- Capacidad total admisible
- Temperatura superficial externa
- Costo del equipo
- Tiempo de trabajo
- Temperatura de trabajo

Con los parámetros ya definidos, se procede a realizar la matriz desarrollada, denominada casa de la calidad, en base a la voz del usuario y la voz del ingeniero.

3.1.1.3. Análisis de la casa de la calidad

Como se observa en la figura 3.1, la voz del usuario (necesidad del cliente) y la del ingeniero (características técnicas) se introducen en la matriz haciendo una evaluación objetiva de las características.

La casa de la calidad pone en perspectiva las consideraciones tomadas y por medio de un análisis de los parámetros técnicos se les asigna un valor cuya ponderación indica la importancia que deberían tener dichos parámetros, luego se relacionan las necesidades del usuario con los requerimientos técnicos, se expresa la dificultad que presentaría cada requerimiento y finalmente se las relaciona entre sí para visualizar que le sucedería a una característica cuando otra varía. El análisis de la competencia se basa en comparar el

enfoque e importancia que se le va a dar a cada característica, y como estas se comparan con equipos existentes en otros países.

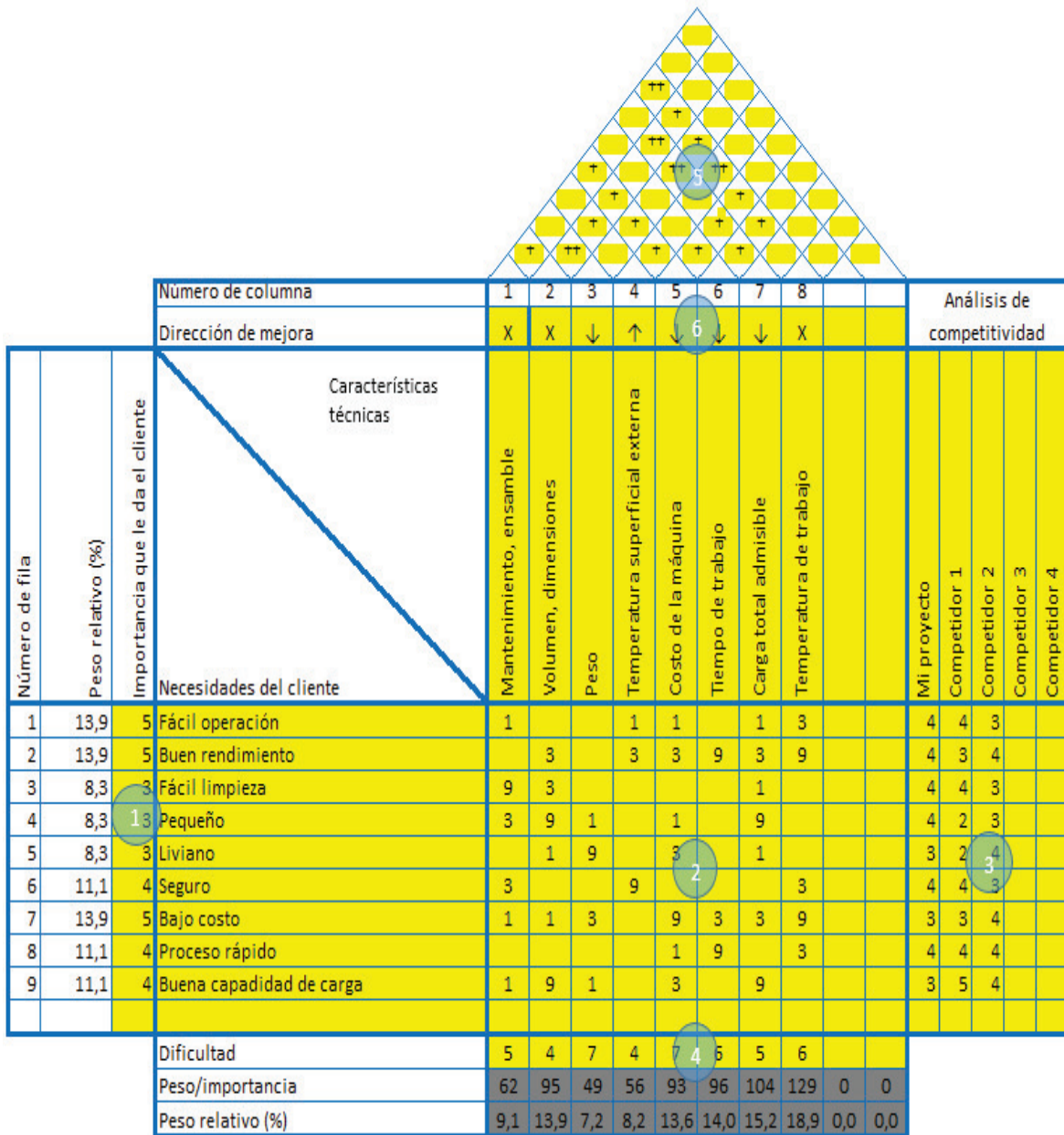


Figura 3.1. Casa de la calidad para un equipo generador de biocarbón.
(Fuente: Propia, 2017)

3.1.1.4. Conclusiones de la casa de la calidad

Los resultados de la casa de la calidad muestran que los valores con mayor peso porcentual para el equipo son:

- Proceso rápido: Determinado para que se genere al menos un lote de biocarbón cada 60 minutos.

- Buen rendimiento: El rendimiento del proceso dependerá del tipo de pirólisis con la que se trabaje, la que mayor cantidad de biocarbón genera es la pirólisis lenta.
- Buena capacidad de carga: La capacidad de carga se determina por la cantidad de biocarbón que se necesite obtener, para un rendimiento mínimo del 10 % de biocarbón se define una capacidad de 10 kg de biomasa residual a ser pirolizada.
- Que sea pequeño: El equipo se lo realiza para espacios reducidos y específicamente para análisis en laboratorios, con el volumen de biomasa residual que ingresa. En el apartado 4.2.1, se calculó que el equipo interno presentará una dimensión mínima de 0,4 m de diámetro y de 0,4 cm de altura.

Estos cuatro parámetros abarcan el 62 % de los deseos del cliente, y considerando el análisis presentado en el capítulo anterior, muestran ser los parámetros a considerar en el diseño del mismo.

3.1.2. Especificaciones técnicas

En la tabla 3.1, considerando la casa de la calidad, se establecen las especificaciones técnicas que definen al equipo:

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del equipo.

DISEÑADOR		PRODUCTO		Fecha inicial:	xxxxxxx
Gordillo Mauricio		Diseño de un equipo generador de biocarbón		Última revisión:	xxxxxxx
				Página:	1 de 1
ESPECIFICACIONES					
CONCEPTO	FECHA	PROPONE	R/D	DESCRIPCIÓN	
Mantenimiento		C	D	De fácil montaje y desmontaje para mantenimiento	
Dimensiones		I	R	Dimensión máxima 0,5 x 1 m (diámetro, altura)	
Peso		C	D	Peso máximo de 200 kg	
Capacidad total		I	R	Carga admisible máxima de 10 kg	
Seguridad		C	D	Temperatura externa máxima de 100 °C	
Velocidad		I	R	Producción de 1 kg por hora	
Temperatura		I	R	Temperatura máxima de 600 °C	

Propone: C=Cliente, I=Ingeniería.

Tipo R/D: R=Requerimiento, D=Deseo.

(Fuente: Propia, 2017)

3.2. Análisis funcional

3.2.1. Definición del análisis funcional

El análisis funcional propuesto inicialmente por Lawrence Miles, consiste en definir la función principal del equipo, luego separar e identificar las sub-funciones de forma más detallada y específica para así poder identificar varias soluciones a un mismo problema, obteniendo mejores productos por un menor costo.

Es necesario primero identificar claramente las funciones primarias y secundarias del equipo, mencionadas anteriormente. Una vez establecidas se procede a plantear soluciones competentes para cada una de las funciones, y luego se seleccionan las más útiles según el diseñador.

El diseño modular comprende un agrupamiento de dichas funciones y sub-funciones en módulos capaces de cumplir funciones determinadas. Este diseño modular se lo realiza mediante diagramas de flujo en los que se representa la función a cumplir en el cuadro principal. Estos cuadros tienen tres tipos de entradas y salidas: material, energía y señal de control. Estos diagramas de flujo se representan en varios niveles, comenzando con el nivel 0 o función principal como se muestra en la figura 3.2. Estos niveles dependen de la complejidad del equipo o hasta donde convenga realizarlos.

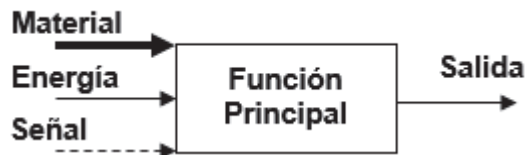


Figura 3.2. Análisis funcional.
(Fuente: Propia, 2017)

Los diagramas de flujo se representan en la figura 3.3.

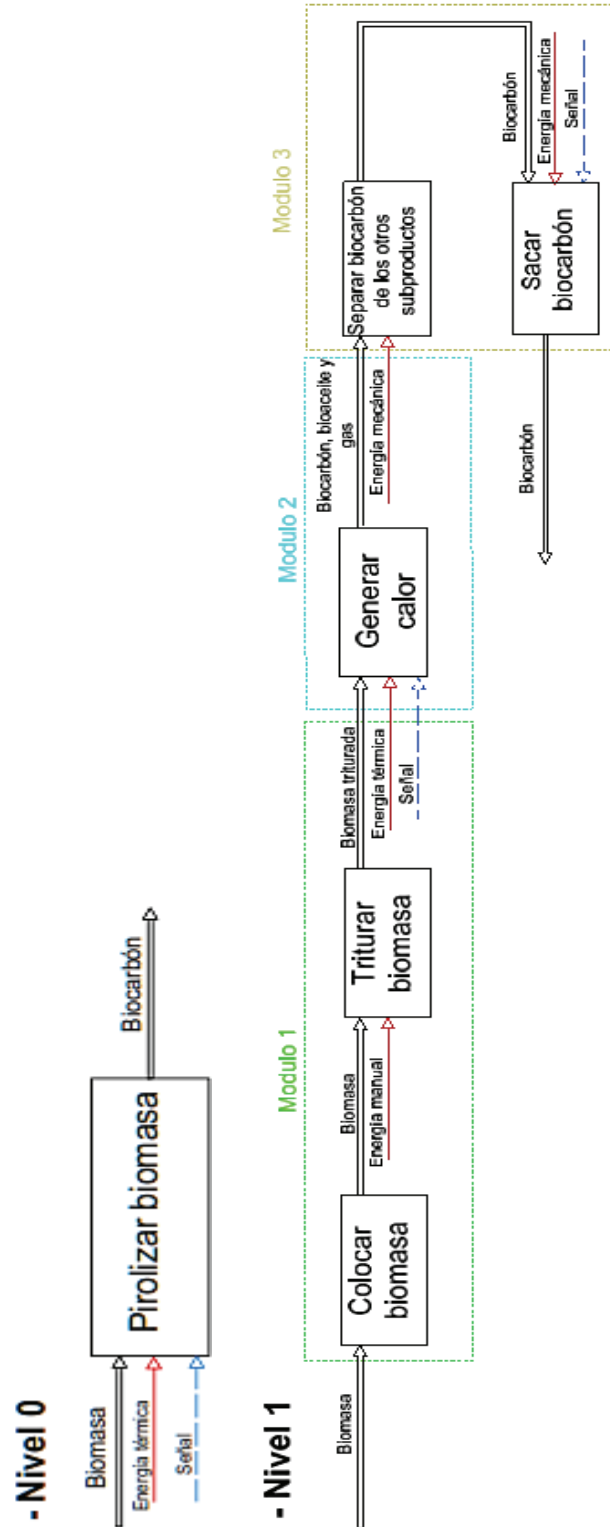


Figura 3.3. Diagrama funcional del equipo.
(Fuente: Propia, 2017)

3.2.2. Determinación de módulos

El diagrama funcional del equipo, mostrado en la figura 3.3, muestra dos niveles, con tres módulos diferentes que definen las funciones del equipo:

- Módulo 1: Sistema de triturado.

El sistema de triturado se refiere a la forma en que la biomasa residual ingresa al equipo, ya que primero esta se tritura y luego pasa al proceso de pirolizado. Este sistema se utiliza para tener granulometrías manejables y homogéneas, con la finalidad de que toda la materia se transforme en biocarbón de forma semejante.

- Módulo 2: Sistema de pirolización.

El sistema de pirolización genera las condiciones de temperatura, tasa de calentamiento y transferencia de calor necesarias para la generación de biocarbón.

- Módulo 3: Sistema de separación.

El sistema de separación se ocupa de separar los subproductos generados por el proceso de pirólisis (bioaceites y gases) del biocarbón.

3.3. Alternativas de diseño para cada módulo

3.3.1. Módulo 1: Sistema de triturado

Las funciones a cumplir de este módulo son:


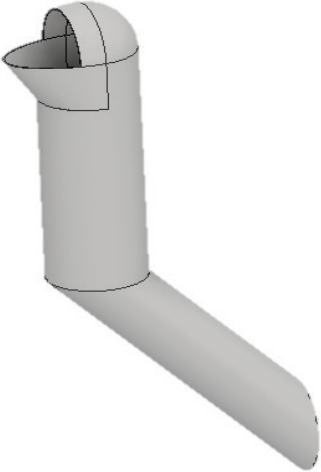
- Alimentación de la biomasa al equipo.
- Disminución de la granulometría de la biomasa.

A continuación, se proponen alternativas que posibiliten cada una de las funciones expuestas anteriormente:

3.3.1.1. Alimentación de la biomasa al equipo

El sistema más común para la alimentación del equipo es una tolva, en la que se deposita y canaliza la biomasa, lo cual facilita su manejo. Para cumplir esta función se proponen dos tipos diferentes de tolvas: la tolva trapezoidal y la tolva mixta, como se observa en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Alternativas para la alimentación de la biomasa al equipo.



Alternativa	Esquema	Análisis
<p>Tolva trapezoidal</p> <p>La tolva trapezoidal traslada por gravedad la materia prima desde una boca principal más amplia a un conducto más estrecho (figura 3.4).</p>	 <p>Figura 3.4. Tolva trapezoidal. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Admite una gran cantidad de materia prima. • Facilita el acceso de la materia prima. • Fácil de construir. • Diseño económico. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • La trituración puede expulsar partículas que se dispersarían por la habitación. • La trituradora puede tener problemas al recibir mucha materia prima.
<p>Tolva mixta</p> <p>La tolva mixta (figura 3.5) es una combinación entre la tolva trapezoidal y la circular, la cual traslada la materia prima al conducto por una boca ligeramente más amplia, pero recubierta.</p>	 <p>Figura 3.5. Tolva mixta. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aspecto ergonómico. • Evita que las partículas expulsadas se dispersen por la habitación. • Alimentación limitada por su diseño lo que ayuda en la trituración. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño costoso. • Proceso de fabricación complejo. • Mayor dificultad de alimentación manual.

(Fuente: Propia, 2017)

3.3.1.2. Disminución de la granulometría de la biomasa

Esta operación debe triturar la biomasa y seleccionar las partículas que tengan un tamaño adecuado para pasar a la siguiente función del equipo. La tabla 3.3 propone diferentes maneras para triturar la biomasa.

Tabla 3.3. Alternativas para la disminución de la granulometría de la biomasa.

Alternativa	Esquema	Análisis
<p>Sistema triturador de acero inoxidable</p> <p>La función de este tipo de sistema triturador es el de reducir a partículas más pequeñas la biomasa. Consta de tres elementos principales: los impulsores giratorios que son las que desplazan la biomasa a las paredes, las paredes trituradoras de acero inoxidable que trituran la biomasa, y la placa base que retiene a los R.S. y permite el paso sólo a partículas trituradas. El sistema se muestra en la figura 3.6.</p>	 <p>Figura 3.6. Sistema triturador de R.S. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • El sistema puede triturar cualquier tipo de R.S. orgánicos. • Buena resistencia al desgaste. • Puede procesar cantidades considerables de material a la vez. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • El material se puede atascar en las paredes parando el sistema. • Mayor complejidad de ensamble. • Genera mucho ruido. • Mayor costo.
<p>Cuchilla trituradora</p> <p>La cuchilla trituradora (figura 3.7) muele material orgánico en toda su extensión, las cuales giran en sentido horario. Estas tienen un lado afilado que ayuda a la trituración, también consta de una placa base que retiene al material orgánico hasta que las partículas sean tan pequeñas que puedan avanzar.</p>	 <p>Figura 3.7. Cuchilla trituradora. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Difícilmente se obstruye. • Ensamble fácil y rápido. • No genera tanto ruido. • Costo moderado. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las cuchillas tienen limitaciones en el tipo de material a triturar. • El filo de las cuchillas necesita mantenimiento constante. • Las cuchillas presentan un mayor riesgo de trabajo.

(Fuente: Propia, 2017)

3.3.1.3. Alternativas de módulos

Se realizan combinaciones de todas las soluciones presentadas para cada función con la finalidad de obtener la opción más indicada para el módulo 1, este análisis se muestra en la tabla 3.4.

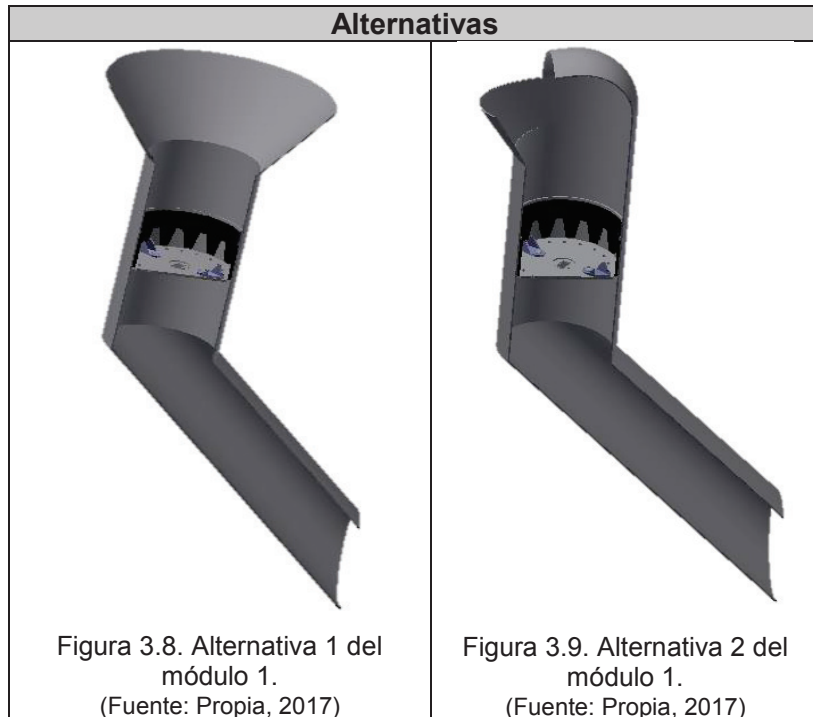
Tabla 3.4. Opciones del módulo 1.

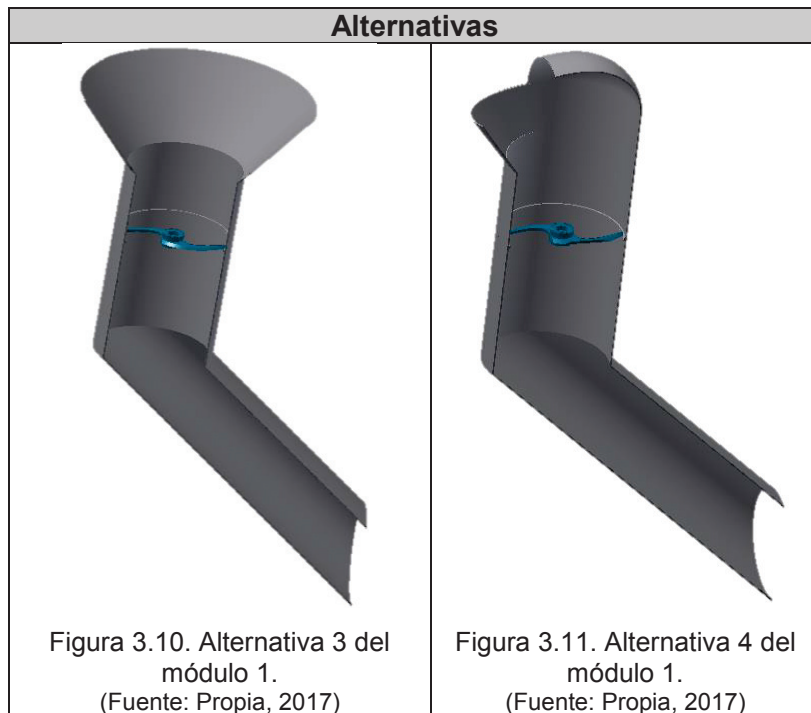
Funciones	Soluciones			
<p>Ingresar la biomasa residual en el equipo</p>	<p>Tolva trapezoidal</p>		<p>Tolva mixta</p>	
<p>Triturar la biomasa residual</p>	<p>Sistema triturador de acero inoxidable</p>		<p>Cuchilla trituradora</p>	
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4

(Fuente: Propia, 2017)

Los esquemas representando a cada una de las soluciones se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Alternativas para el sistema de triturado.





(Fuente: Propia, 2017)

3.3.1.4. Evaluación y selección de alternativas del módulo 1

Para determinar la alternativa más conveniente del módulo 1 se utiliza la matriz de criterios ponderados en donde se evalúa cada alternativa con los criterios a cumplir de éste módulo.

Los criterios más determinantes se listan a continuación:

- Facilidad de diseño.
- Facilidad de ingreso del material.
- Resistencia mecánica, esto significa que el equipo debe poder triturar toda la biomasa residual sin ningún problema.
- Uniformidad de triturado, esto significa que las partículas obtenidas tengan tamaños dentro del rango considerado.
- Seguridad, ya que se debe tener precaución al colocar la biomasa residual.

Una vez determinados los criterios, se evalúan las alternativas para cada uno de los criterios como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 3.6. Evaluación de los criterios para el módulo 1.

CRITERIO	Fácil diseño	Fácil ingreso	Resistencia	Uniformidad triturado	Seguridad	Suma + 1	Ponderación
Fácil diseño		0,5	0,5	0	0	2	0,13
Fácil ingreso	0,5		0,5	0	0	2	0,13
Resistencia	0,5	0,5		0,5	0,5	3	0,20
Uniformidad triturado	1	1	0,5		0,5	4	0,27
Seguridad	1	1	0,5	0,5		4	0,27
				SUMA		15	1

Uniformidad de triturado = Seguridad > Resistencia mecánica > Fácil ingreso de material = Facilidad de diseño

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.7. Criterio: Uniformidad de triturado.

Uniformidad triturado	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1	1	3,5	0,35
Alternativa 2	0,5		1	1	3,5	0,35
Alternativa 3	0	0		0,5	1,5	0,15
Alternativa 4	0	0	0,5		1,5	0,15
				SUMA	10	1

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3 = Alternativa 4

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.8. Criterio: Seguridad.

Seguridad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0	2	0,2
Alternativa 2	1		1	1	4	0,4
Alternativa 3	0	0		0	1	0,1
Alternativa 4	1	0	1		3	0,3
				SUMA	10	1

Alternativa 2 > Alternativa 4 > Alternativa 1 > Alternativa 3

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.9. Criterio: Resistencia mecánica.

Resistencia mecánica	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1	1	3,5	0,35
Alternativa 2	0,5		1	1	3,5	0,35
Alternativa 3	0	0		0,5	1,5	0,15
Alternativa 4	0	0	0,5		1,5	0,15
SUMA					10	1

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3 = Alternativa 4

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.10. Criterio: Fácil ingreso de material.

Fácil ingreso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	1	3,5	0,35
Alternativa 2	0		0	0,5	1,5	0,15
Alternativa 3	0,5	1		1	3,5	0,35
Alternativa 4	0	0,5	0		1,5	0,15
SUMA					10	1

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2 = Alternativa 4

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.11. Criterio: Facilidad de diseño.

Fácil diseño	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		1	0	0,5	2,5	0,25
Alternativa 2	0		0	0	1,0	0,10
Alternativa 3	1	1		1	4,0	0,40
Alternativa 4	0,5	1	0		2,5	0,25
SUMA					10	1

Alternativa 3 > Alternativa 1 = Alternativa 4 > Alternativa 2

(Fuente: Propia, 2017)

Para concluir se realiza una tabla resumiendo todos los valores obtenidos de las alternativas en cada uno de los criterios y se las multiplica por la ponderación de cada uno de estos criterios de la tabla 3.6, los resultados se muestran en la tabla 3.12:

Tabla 3.12. Conclusiones módulo 1.

CONCLUSIÓN	Regularidad triturado	Seguridad	Resistencia mecánica	Fácil ingreso	Facilidad Diseño	Suma + 1	Prioridad
Alternativa 1	0,09	0,06	0,07	0,05	0,03	1,30	1
Alternativa 2	0,09	0,10	0,07	0,02	0,01	1,29	2
Alternativa 3	0,04	0,03	0,03	0,05	0,05	1,20	4
Alternativa 4	0,04	0,08	0,03	0,02	0,03	1,20	3

Alternativa 2 = Alternativa 1 > Alternativa 4 = Alternativa 3

(Fuente: Propia, 2017)

Como conclusión del primer módulo se obtiene que la alternativa 1 es la más adecuada y la que mejor se ajusta a los criterios determinados.

3.3.2. Módulo 2: Sistema de pirolización

El sistema de pirolización es el más importante dentro de la máquina pues es aquí donde se genera el biocarbón, las funciones a cumplir de este módulo son:

- Disposición de la biomasa.
- Generación de calor en el sistema.

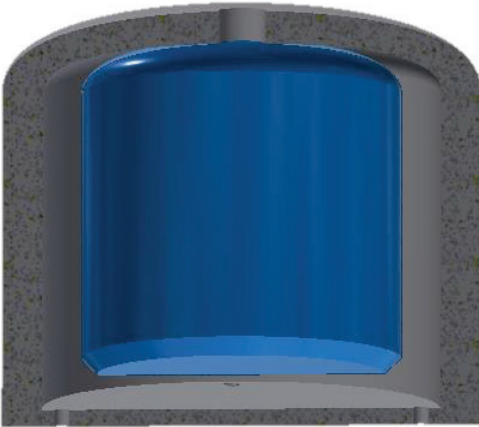
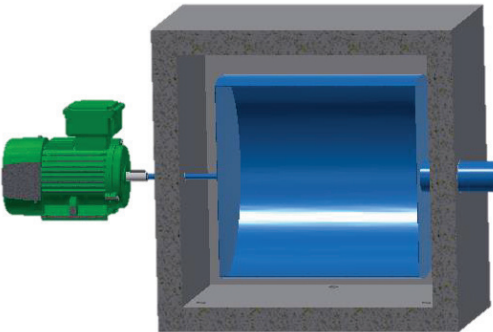
A continuación, se proponen alternativas que posibiliten cada una de las funciones expuestas anteriormente:

3.3.2.1. Disposición de la biomasa

Esta función es la que proporciona al equipo la manera en que la biomasa residual va a estar expuesta al calor. Debe ser capaz de generar una pirolización homogénea para toda la biomasa.

Las maneras más comúnmente usadas para la disposición de la biomasa durante la pirólisis, se muestran en la tabla 3.13:

Tabla 3.13. Alternativas para la alimentación de la biomasa al equipo.

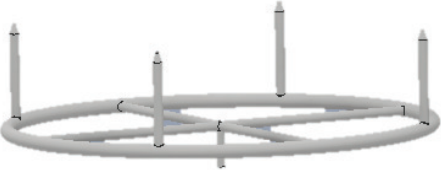
Alternativa	Esquema	Análisis
<p>Reactor estático</p> <p>Es un reactor donde la biomasa permanece sin movimiento durante toda la pirólisis. Consta de dos cámaras, una interna donde se deposita la biomasa residual y otra externa que es por donde se transfiere el calor. El reactor se muestra en la figura 3.12.</p>	 <p>Figura 3.12. Reactor estático. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fácil diseño • Tamaño reducido • Ligero • Fácil mantenimiento • Bajo costo <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presenta focos de calor donde la temperatura es mayor que en otras áreas. • Distribución de la biomasa de forma manual.
<p>Horno de eje</p> <p>Consta de un sistema que permite girar sobre su propio eje, generando así un movimiento en toda la biomasa. Al igual que el reactor estático consta de dos cámaras, la interna donde se deposita el material y se genera el movimiento giratorio, y la externa, donde se transfiere el calor. El horno se muestra en la figura 3.13.</p>	 <p>Figura 3.13. Horno de eje. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Buena distribución de la biomasa residual. • El calor se distribuye por toda la pared interna. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Difícil alimentación de la biomasa residual. • Costoso. • Diseño complejo. • Mantenimiento complejo.

(Fuente: Propia, 2017)

3.3.2.2. Generación de calor en el sistema

Esta función es la que permite que la biomasa residual se transforme en biocarbón, debe ser capaz de alcanzar todo el borde de la pared interna y generar suficiente calor para pirolizar toda la biomasa residual. En la tabla 3.14 se especifica la opción para generar calor dentro del sistema.

Tabla 3.14. Alternativas para la generación de calor en el sistema.

Alternativa	Esquema	Análisis
<p>Por combustible externo</p> <p>La transferencia de calor se puede dar por la combustión de combustible externo al reactor. Como material combustible se pueden reutilizar los subproductos obtenidos en el mismo proceso de pirólisis. El sistema de generación de calor se muestra en la figura 3.14.</p>	 <p>Figura 3.14. Generación de calor por combustible externo simple. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño simple. • Se puede utilizar cualquier tipo de combustible puede ser de materiales sólidos, líquidos o gaseosos para la generación de calor. • Tamaño reducido. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño poco eficiente porque no aprovecha el calor del sistema. • Alto gasto de combustible. • Aprovechamiento indirecto de subproductos.

(Fuente: Propia, 2017)

3.3.2.3. Alternativas de módulos

Se realizan combinaciones de todas las soluciones presentadas para cada función con la finalidad de obtener la opción más indicada para el módulo 2, este análisis se muestra en la tabla 3.15.

Tabla 3.15. Opciones del módulo 2.

Funciones	Soluciones
Situar la biomasa	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Reactor estático</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Horno de eje</div> </div>
Generar calor en el sistema	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Combustible externo</div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Alternativa 1 Alternativa 2 </div>

(Fuente: Propia, 2017)

Los esquemas representando a cada una de las soluciones se presentan en las siguientes figuras:

Tabla 3.16. Alternativas para el sistema de pirólisis.

Alternativas	
<p>Figura 3.15. Alternativa 1 del módulo 2. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Figura 3.16. Alternativa 2 del módulo 2. (Fuente: Propia, 2017)</p>

(Fuente: Propia, 2017)

3.3.2.4. Evaluación y selección de alternativas del módulo 2

Para determinar la alternativa más conveniente del módulo 2 se utiliza la matriz de criterios ponderados. Los criterios más determinantes se listan a continuación:

- Facilidad de diseño.
- Tamaño del sistema.
- Disposición de la biomasa residual, ya que distintas formas de colocarla resultarán en una transformación a biocarbón en rangos diferentes.
- Distribución de calor, debido a que este debe influir en todo el equipo lo más uniformemente posible.

Una vez determinados los criterios, se evalúan las alternativas como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 3.17. Evaluación de los criterios para el módulo 2.

CRITERIO	Facilidad diseño	Tamaño del sistema	Disposición biomasa	Distribución calor	Suma + 1	Ponderación
Facilidad diseño		1	1	0,5	3,5	0,35
Tamaño del sistema	0		1	0	2	0,20
Disposición biomasa	0	0		0,5	1,5	0,15
Distribución calor	0,5	1	0,5		3	0,30
SUMA					10	1

Distribución del calor = Disposición de biomasa residual > Facilidad de diseño > Tamaño del sistema

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.18. Criterio: Distribución de calor.

Distribución calor	Alternativa 1	Alternativa 2	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0	1,5	0,5
Alternativa 2	1		1,5	0,5
SUMA			3	1

Alternativa 1 = Alternativa 2

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.19. Criterio: Disposición biomasa.

Disposición biomasa	Alternativa 1	Alternativa 2	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
SUMA			3	1

Alternativa 2 > Alternativa 1

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.20. Criterio: Facilidad de diseño.

Facilidad Diseño	Alternativa 1	Alternativa 2	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
SUMA			3	1

Alternativa 1 > Alternativa 2

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.21. Criterio: Tamaño del sistema.

Tamaño del sistema	Alternativa 1	Alternativa 2	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
		SUMA	3	1

Alternativa 1 > Alternativa 2

(Fuente: Propia, 2017)

En la tabla 3.22 se presenta un resumen de los valores obtenidos para las alternativas, multiplicadas por la ponderación de cada criterio obtenido en la tabla 3.17:

Tabla 3.22. Conclusiones módulo 2.

CONCLUSIÓN	Distribución calor	Disposición biomasa	Tamaño del sistema	Facilidad Diseño	Suma + 1	Prioridad
Alternativa 1	0,10	0,05	0,13	0,23	1,52	1
Alternativa 2	0,20	0,10	0,07	0,12	1,48	2

(Fuente: Propia, 2017)

Como conclusión del segundo módulo se obtiene que la alternativa 1 es la más adecuada y la que mejor se ajusta a los criterios determinados.

3.3.3. Módulo 3: Sistema de separación

Las funciones a cumplir en este módulo son:



- Separar bioaceite y biogás.
- Sacar biocarbón.

Las alternativas propuestas para cada función son:

3.3.3.1. Separar bioaceite y biogás

En este proceso se separan los subproductos de la pirólisis, los cuales son comúnmente bioaceite y biogás, para su posterior disposición. Para las alternativas propuestas su recolección y aplicación no forma parte del diseño, por lo que sólo se consideran las alternativas de separación de la mezcla de gas generado por la pirólisis, como se muestra en la tabla 3.23.

Tabla 3.23. Alternativas para separar bioaceite y biogás.



Alternativa	Esquema	Análisis
<p>Sistema reciclador</p> <p>Consta de un sistema de enfriamiento en donde se separa el biogás del bioaceite y de un sistema de tuberías que recolecta el gas generado al calentar el reactor y el gas generado por el proceso de pirólisis. Se muestra en la figura 3.17.</p>	 <p>Figura 3.17. Sistema reciclador. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amigable con el medio ambiente. • Mayor eficiencia, debido a que se recolecta más gas. • Fácil almacenamiento. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo. • Diseño más complejo • Mayor tamaño.
<p>Sistema simple</p> <p>Este sistema al igual que el anterior consta de un sistema de enfriamiento en donde se separa el biogás del bioaceite. Además, consta de una tubería que dispersa el gas remanente al ambiente. El sistema simple se muestra en la figura 3.18.</p>	 <p>Figura 3.18. Sistema simple. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño simple. • Costo de diseño menor. • Menor tamaño. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menor eficiencia al no recolectar todo el gas generado. • Los gases que se emiten pueden ser peligrosos para la salud y el ambiente.

(Fuente: Propia, 2017)

3.3.3.2. Evacuación de biocarbón

Una vez separados los subproductos se retira el biocarbón generado, esto se realiza en el reactor al terminar el proceso. Se puede utilizar un separador ciclónico para recolectar el material particulado que se mezcla con el gas al momento de la pirólisis, las alternativas se muestran a continuación:

Tabla 3.24. Alternativas para sacar biocarbón.

Alternativa	Esquema	Análisis
<p>Separador simple</p> <p>El separador simple consta de una tapa que cubre la parte superior del reactor estático elegido en el módulo anterior, por aquí se retira el biocarbón generado. Posee un sistema de tuberías que dirige el gas al sistema reciclador. El separador simple se muestra en la figura 3.19.</p>	 <p>Figura 3.19. Sistema simple. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo. • Diseño simple. • Sistema pequeño. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene un biogás de baja calidad. • Se obtiene una menor cantidad de biocarbón.
<p>Separador ciclónico</p> <p>El separador ciclónico tiene los mismos elementos que el separador simple sumado un sistema que separa el gas del material particulado generado en el proceso de la pirólisis. El separador ciclónico se muestra en la figura 3.20.</p>	 <p>Figura 3.20. Separador ciclónico. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene un biogás de buena calidad. • Genera mayor cantidad de biocarbón. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño complejo. • El sistema ocupa mayor espacio para la separación del material particulado. • Costo de diseño mayor.

(Fuente: Propia, 2017)

3.3.3.3. Alternativas de módulos

Se realizan combinaciones de todas las soluciones presentadas para cada función con la finalidad de obtener la opción más indicada para el módulo 3, este análisis se muestra en la tabla 3.25.



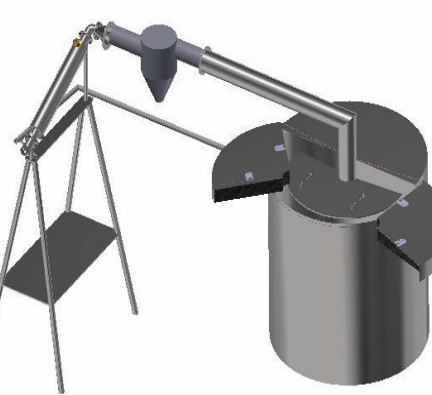

Tabla 3.25. Opciones del módulo 3.

Funciones	Soluciones			
Separar bioaceite y biogás	Sistema reciclador		Sistema simple	
Sacar biocarbón	Separador simple		Separador ciclónico	
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4

(Fuente: Propia, 2017)

Los esquemas representando a cada una de las soluciones se presentan en las figuras de la tabla 3.26:

Tabla 3.26. Alternativas para el sistema de separación.

Alternativas	
	
<p>Figura 3.21. Alternativa 1 del módulo 3. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Figura 3.22. Alternativa 2 del módulo 3. (Fuente: Propia, 2017)</p>
	
<p>Figura 3.23. Alternativa 3 del módulo 3. (Fuente: Propia, 2017)</p>	<p>Figura 3.24. Alternativa 4 del módulo 3. (Fuente: Propia, 2017)</p>

(Fuente: Propia, 2017)

3.3.3.4. Evaluación y selección de alternativas del módulo 3

Para determinar la alternativa más conveniente del módulo 3 se utiliza la matriz de criterios ponderados en donde se evalúa cada alternativa con los criterios a cumplir de éste módulo. Los criterios más son:

- Facilidad de diseño.
- Tamaño del sistema, ya que este módulo es el que más volumen ocupa.
- Eficiencia del sistema, por la forma como se tratan los materiales producidos por la pirólisis.
- Seguridad, ya que el gas generado alcanza altas temperaturas.

Una vez evaluados los criterios, se evalúan las alternativas para cada uno de los criterios como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 3.27. Evaluación de los criterios para el módulo 3.

CRITERIO	Facilidad Diseño	Tamaño del sistema	Eficiencia del sistema	Seguridad	Suma + 1	Ponderación
Facilidad Diseño		0,5	0	0	1,5	0,15
Tamaño del sistema	0,5		0	0	1,5	0,15
Eficiencia del sistema	1	1		1	4	0,40
Seguridad	1	1	0		3	0,30
				SUMA	10	1

Eficiencia sistema > Seguridad > Tamaño del sistema > Facilidad de diseño (Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.28. Criterio: Eficiencia del sistema.

Eficiencia del sistema	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	1	3,5	0,35
Alternativa 2	0		0	1	2	0,20
Alternativa 3	0,5	1		1	3,5	0,35
Alternativa 4	0	0	0		1	0,10
SUMA					10	1

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 4

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.29. Criterio: Seguridad.

Seguridad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	1	3,5	0,35
Alternativa 2	0		0	1	2	0,20
Alternativa 3	0,5	1		1	3,5	0,35
Alternativa 4	0	0	0		1	0,10
SUMA					10	1

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 4

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.30. Criterio: Tamaño del sistema.

Tamaño del sistema	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	1	3	0,3
Alternativa 2	1		1	1	4	0,4
Alternativa 3	0	0		0	1	0,1
Alternativa 4	0	0	1		2	0,2
SUMA					10	1

Alternativa 2 > Alternativa 1 > Alternativa 4 > Alternativa 3

(Fuente: Propia, 2017)

Tabla 3.31. Criterio: Facilidad de diseño.

Facilidad Diseño	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Suma + 1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	1	3	0,3
Alternativa 2	1		1	1	4	0,4
Alternativa 3	0	0		0	1	0,1
Alternativa 4	0	0	1		2	0,2
SUMA					10	1

Alternativa 2 > Alternativa 1 > Alternativa 4 > Alternativa 3

(Fuente: Propia, 2017)

En la tabla 3.32 se muestra el resumen de los valores obtenidos para los criterios de las alternativas, multiplicadas por la ponderación de cada uno de estos criterios de la tabla 3.27:

Tabla 3.32. Conclusiones módulo 3.

CONCLUSIÓN	Eficiencia del sistema	Seguridad	Tamaño del sistema	Facilidad Diseño	Suma + 1	Prioridad
Alternativa 1	0,14	0,11	0,05	0,05	1,34	1
Alternativa 2	0,08	0,06	0,06	0,06	1,26	3
Alternativa 3	0,14	0,11	0,02	0,02	1,28	2
Alternativa 4	0,04	0,03	0,03	0,03	1,13	4

(Fuente: Propia, 2017)

Como conclusión del tercer módulo se obtiene que la alternativa 1 es la más adecuada y la que mejor se ajusta a los criterios determinados.

En base a la casa de la calidad y al análisis funcional se opta por diseñar un equipo con un sistema triturador de tolva trapezoidal, un reactor estático de combustible externo y un sistema reciclador con separador de residuos simple.

4. CÁLCULOS Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS

4.1. Diseño del sistema de triturado

4.1.1. Potencia del triturador

Para el diseño del triturador se tomó como base el modelo de trituradores de basura orgánicos que se encuentran en el mercado, por lo que se realizó un benchmarking de estos equipos, de varias marcas, de donde se obtienen sus características principales necesarias para el triturador, como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Benchmarking de equipos.

Marca/Modelo	Potencia (HP)	ω (RPM)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Hertz (Hz)	Capacidad (kg)
GE / GFB760V	3/4	2700	120	6	60	1,20
GE / GFB720V	3/4	3500	120	6	60	1,20
GE / GFC525V	1/2	2800	120	6	60	1,02
FRANKE / WD1001	1	2800	120	6	60	1,20
FRANKE / WD751	3/4	2700	120	6	60	1,20
KITCHENAID / KCDB250G	1/2	1725	120	6	60	0,75
INSINKERATOR / EVOLUTION COMPACT	3/4	1725	120	8	60	0,98
INSINKERATOR / EVOLUTION ESSENTIAL XTR	3/4	1725	120	8	60	0,98
INSINKERATOR / EVOLUTION EXCEL	1	1725	120	10	60	1,20

(Fuente: Propia, 2017)

La complejidad que se presenta al realizar un análisis con las propiedades de cada uno de los diferentes materiales orgánicos que se pueden encontrar en la biomasa residual hace que sea imposible generar un modelo matemático para llegar a calcular la potencia del triturador. Estas propiedades varían como ya se ha dicho en capítulos anteriores por el tamaño, el tipo de material, el tiempo de descomposición, su humedad, y muchos otros factores, cuyo análisis no está contemplado en el alcance de este proyecto. El benchmarking realizado brinda una guía clara de los parámetros de trabajo que debe tener el triturador y de esta manera obtener los datos necesarios para su diseño, esto se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Datos para el diseño del sistema triturador.

Potencia (kW)	ω (rad/s)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Hertz (Hz)	Capacidad (kg)
0,6	283,0	120,0	6,0	60,0	1,20

(Fuente: Propia, 2017)

4.1.2. Sistema triturador

Como ya se mencionó, el sistema estará basado en un triturador de basura por lo que se adoptó también el sistema de triturado que utilizan estos equipos, el cual coincide con la alternativa obtenida en el módulo 1 del capítulo 3. Tal sistema está compuesto de una placa base, dos impulsadores, y un aro desfibrador. La figura 4.1 muestra los componentes del sistema triturador a ser analizados.

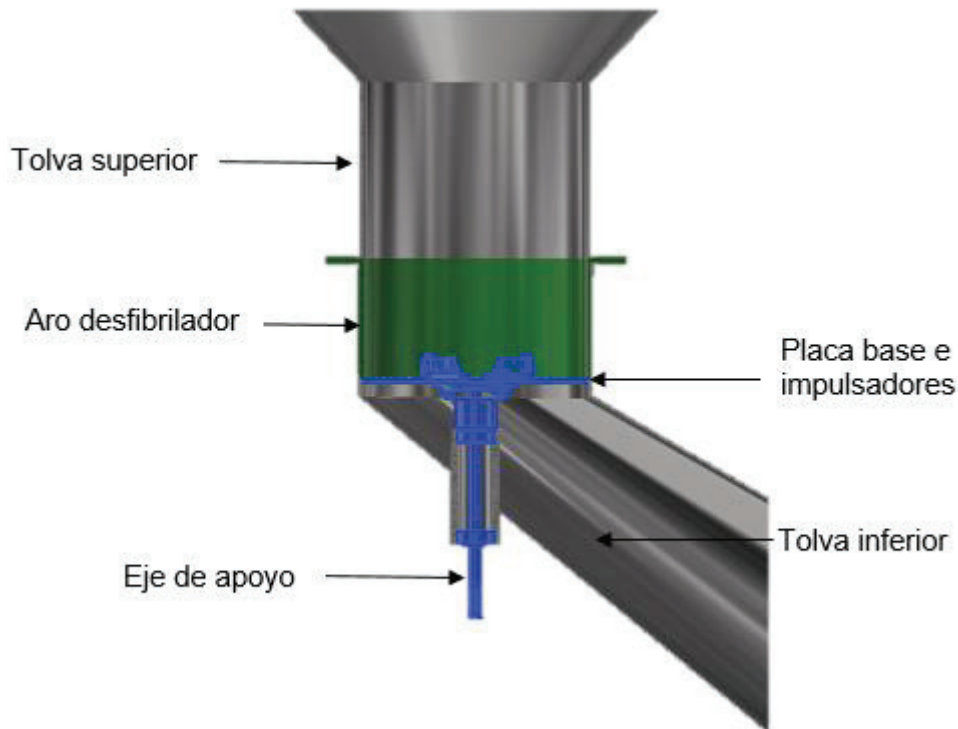


Figura 4.1. Partes del sistema triturador.
(Fuente: Propia, 2017)

4.1.2.1. Placa base e Impulsadores

El análisis de estas partes es muy complicado debido a la complejidad de la biomasa, y por el tipo de elementos con los que se va a trabajar el cual demandaría de un análisis por elementos finitos con muchos valores a suponer, ya que se quiere evitar al máximo cualquier tipo de suposiciones, y al saber que existen sistemas de trituración ya diseñados se optó que estos elementos sean seleccionados de un stock que provee

partes para el arreglo de equipos trituradores de basura, en donde se encontró que la placa base y los impulsores se venden en conjunto, como muestra la figura I.3 del anexo I. Las dimensiones de la placa base las cuales ayudarán para el dimensionamiento del eje de apoyo se muestran en la figura 4.2.

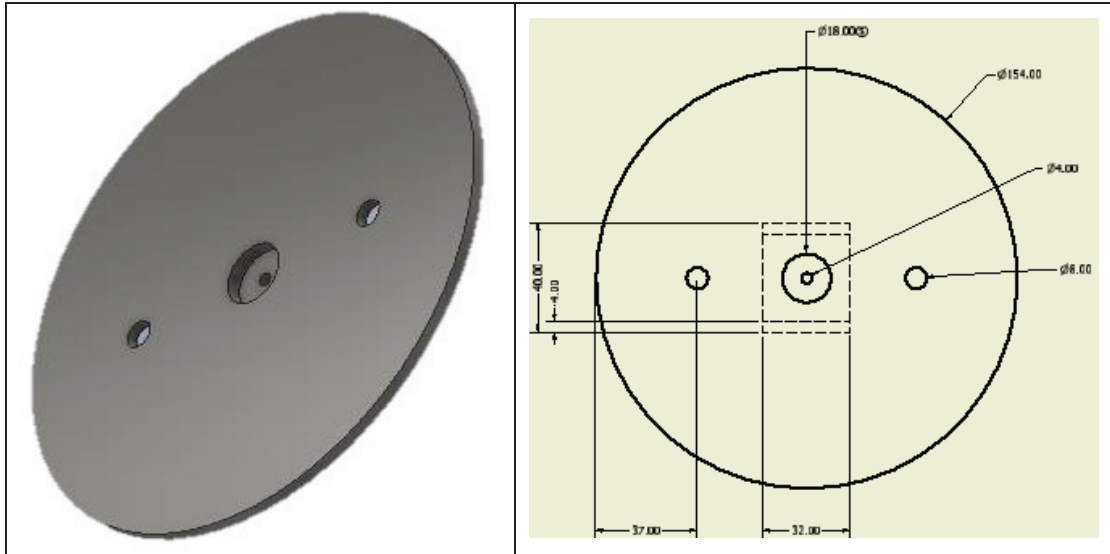


Figura 4.2. Placa base e impulsores.
(Fuente: Propia, 2017)

4.1.2.2. Aro desfibrador

El aro desfibrador no es más que una pared cuya base consta de diente los cuales trituran la biomasa residual y permiten el paso de este material triturado a su siguiente etapa. Este aro determina el tamaño de las partículas a entrar, y como este valor es específico para este proyecto no se lo puede seleccionar en el mercado.

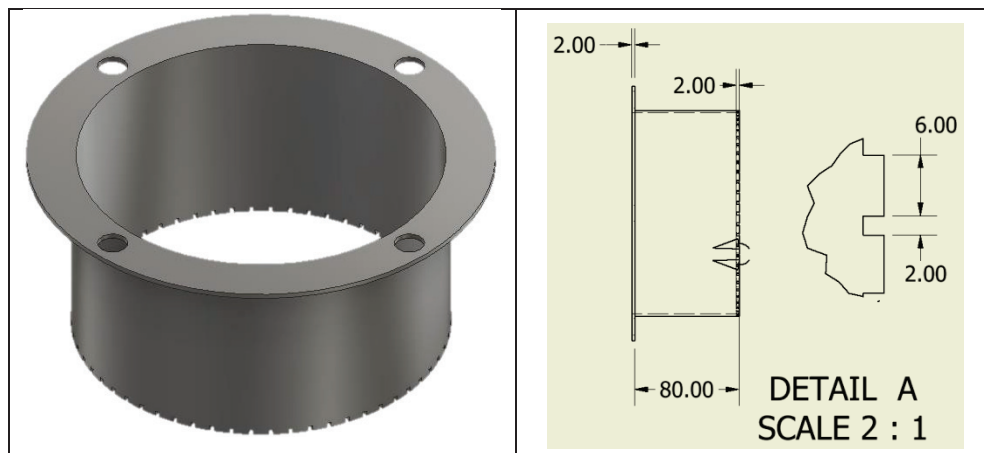


Figura 4.3. Aro desfibrador.
(Fuente: Propia, 2017)

Como las fuerzas de aplicación son muy bajas, el diseño del aro desfibrador sólo dependerá del área que ocupe el mismo, ya que su diseño no se puede simplificar, se lo trabaja con el método de elementos finitos para determinar los esfuerzos a los que se sometería.

La fuerza para que el equipo funcione normalmente se calcula a partir de las especificaciones dadas por los equipos analizados en el benchmarking para la capacidad de 1,2 kg.

$$P_m = 560 \text{ W}$$

$$\omega = 2700 \text{ rpm} = 283 \text{ rad/s}$$

$$r_{pb} = 0,077 \text{ m}$$

Para obtener el torque:

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (4.1)$$

$$T = 2 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

La fuerza que se aplica en el sistema es:

$$F = \frac{T}{r_{pb}} \quad (4.2)$$

$$F = 26 \text{ (N)}$$

Aplicando esta fuerza para cada uno de los dientes del aro desfibrilador, se obtuvieron los siguientes datos, mostrados en la figura 4.4.

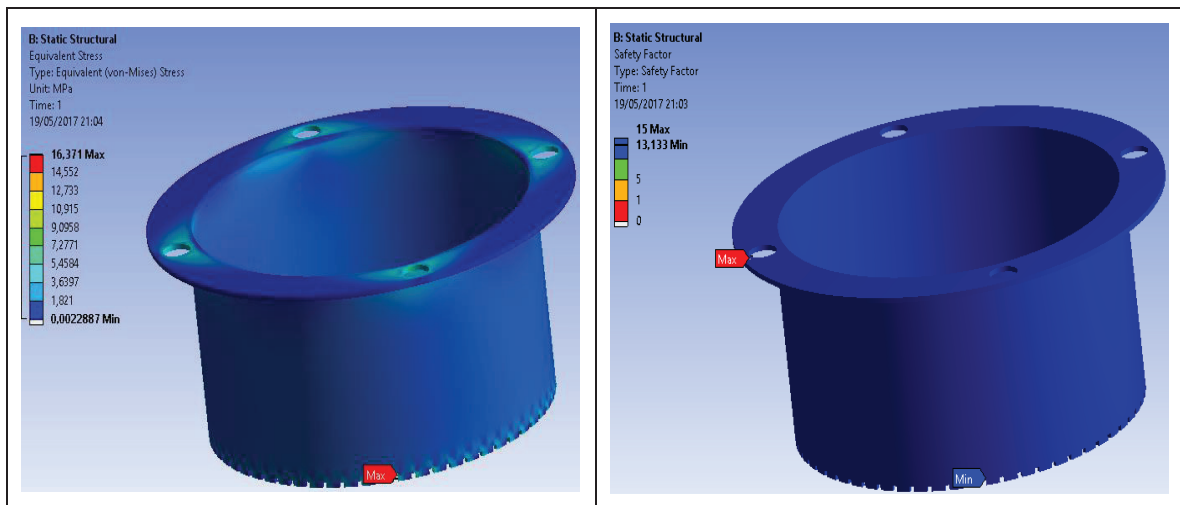


Figura 4.4. Aro desfibrilador.
(Fuente: Propia, 2017)

$$\sigma_{max} = 16,3 \text{ MPa}$$

$$F_s = 13,3$$

Como se ha visto antes, este valor del factor de seguridad muestra que el material escogido y su espesor tienen valores aptos para esta aplicación.

4.1.2.3. Eje de apoyo

El eje de apoyo es el eje que transmite la potencia del motor a la placa base y que además sirve como apoyo para el sistema.

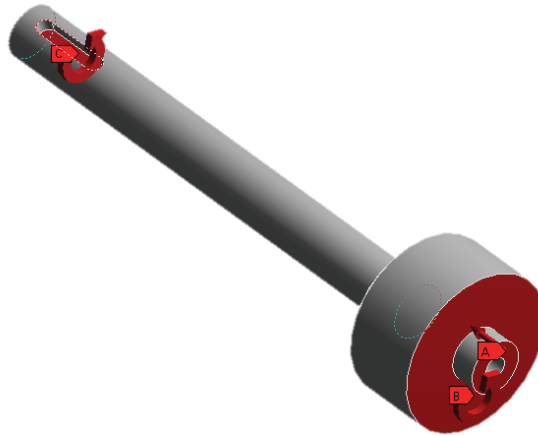


Figura 4.5. Eje de apoyo con cargas.
(Fuente: Propia, 2017)

El eje de apoyo soporta 3 cargas, A que es el torque total generado por la biomasa y placa base, B es la carga axial causada por el peso de la biomasa y el peso de la placa base, y C es el torque generado por el motor.

El material con el que se trabajará es el acero AISI 1040 as rolled, el cual presenta buenas propiedades mecánicas para este tipo de trabajo, las características a tomar en cuenta son: resistencia a la Fluencia, $S_y = 415$ MPa y resistencia a la Tensión, $S_{ut} = 620$ MPa. El resto de propiedades se las puede encontrar en la figura I.4 del anexo I. Las cargas a aplicarse se determinan a continuación.

Punto A

En el punto A se realizan los cálculos para vencer la inercia que se genera por la placa base y por la biomasa presente, entonces el torque generado será:

$$T_A = I_t * \alpha \quad (4.3)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{t} \quad (4.4)$$

La variación de velocidad angular hace referencia a la velocidad angular final a la que llega el sistema triturador (2700 rpm = 283 rad/s) menos la velocidad angular inicial que se la considera nula, y el tiempo es un valor extremadamente pequeño ya que las cargas son muy ligeras, por lo que se toma un valor de 0,8 segundos, entonces:

$$\alpha = 353(\text{rad}/\text{s}^2)$$

La placa base al presentar una forma irregular, su inercia se obtiene mediante el calculador de propiedades incorporado en el software Inventor 2017, que para un acero inoxidable del que está compuesto toda la placa base con los impulsadores, sus tornillos, tuercas y arandelas presenta una inercia en el plano de giro de:

$$I_p = 1697,8 (\text{kg} \cdot \text{mm}^2) = 0,00169 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

Para calcular la inercia de la biomasa se considera a esta como un cilindro, cuyo radio es el radio de la placa base.

$$I_b = \frac{1}{2} m_b r_{pb}^2 \quad (4.5)$$

$$I_b = 0,00355 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

La inercia total es:

$$I_t = I_p + I_b \quad (4.6)$$

$$I_t = 0,00524 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

Con lo que el torque en el punto A es:

$$T_A = 1,85 (\text{N} \cdot \text{m})$$

Punto B

Para este punto se considera el peso combinado de la placa base con el peso de la biomasa a triturar, donde:

$$m_{pb} = 0,609 (\text{kg})$$

Que es el peso de la placa base con los impulsadores y sus sistemas de sujeción.

La carga que experimenta el eje es entonces:

$$F = m_{pb} + m_b \quad (4.7)$$

$$F = 1,81 \text{ (kg)} * \frac{9,8 \text{ (N)}}{1 \text{ (kgf)}} = 17.7 \text{ (N)}$$

Punto C

El punto B es el punto donde se transmite la potencia del motor al eje, aquí no existen momentos flexionantes, por lo que el diámetro se calcula sólo por la torsión que ejerce, como ya se calculó anteriormente:

$$T_B = 2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Secciones del eje

Para el eje de apoyo se decidió estudiar 3 secciones, A donde se encuentra la cuña, B y C que presentan cambios de sección.

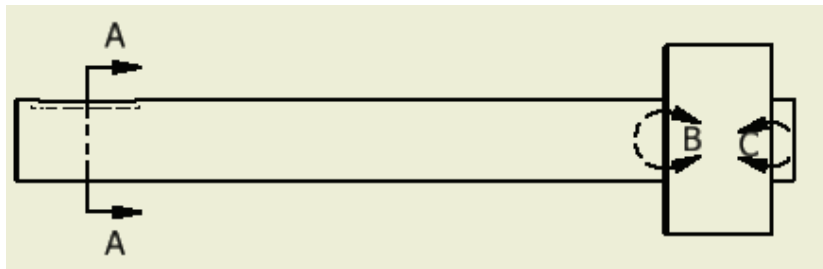


Figura 4.6. Secciones del eje de apoyo.
(Fuente: Propia, 2017)

Límite de resistencia a la fatiga

El límite de resistencia a la fatiga se calcula mediante la ecuación planteada en Budynas et al, 2012 para aceros con resistencia a la tensión menor a 1400 MPa.

$$S'_e = 0,5 * S_{ut} \quad (4.8)$$

Para el acero AISI 1040 as rolled,

$$S'_e = 310 \text{ (MPa)}$$

Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

El análisis teórico de un elemento a fatiga se lo realiza en laboratorio bajo condiciones muy controladas, por lo que para la parte teórica se necesitan analizar estos factores que influyen en el límite de resistencia a la fatiga. La ecuación planteada en Budynas et al, 2012 se presenta como:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (4.9)$$

A continuación se describen cada uno de los factores.

Factor de modificación por condición superficial k_a

Este factor considera la calidad que presenta el acabado superficial del eje y se representa en la ecuación 4.10.

$$k_a = a * S_{ut}^b \quad (4.10)$$

Para este proyecto se considera a un eje con superficie de tipo maquinada, donde los factores a y b toman los valores de 4,51 y -0,265 respectivamente. El análisis para el maquinado se obtuvo de la figura I.5 del anexo I.

$$k_a = 0,8207$$

Factor de modificación por tamaño k_b

Al ser una barra redonda que está girando se tiene la ecuación planteada por Budynas et al, 2012 para diámetros entre 2,71 y 51 mm.

$$k_b = 1,24 * d^{-0,107} \quad (4.11)$$

Para los distintos diámetros del eje se tiene:

Tabla 4.3. Factor k_b para cada sección.

Sección	Diámetro (mm)	Factor k_b
A	10	0,969
B	30	0,861
C	10	0,969

(Fuente: Propia, 2017)

Factor de modificación por carga k_c

Para este factor es importante notar que la mayor carga a soportar en el eje es de torsión por lo que:

$$k_c = 0,577$$

Factor de modificación por temperatura k_d

Para una temperatura ambiente aproximada de 20 °C se obtiene:

$$k_d = 1$$

Los valores del factor de modificación por temperatura se obtienen de la figura I.6.

Factor de modificación por confiabilidad k_e

Para una confiabilidad esperada del 99 % y en base a la figura I.7 se tiene:

$$k_e = 0,814$$

Considerando los valores obtenidos y aplicando la ecuación 4.9 se tiene, para la sección A como ejemplo:

$$S_e = 0,8207 * 0,969 * 0,577 * 1 * 0,814 * 310$$

Los valores obtenidos para cada punto se dan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Límite de resistencia a la fatiga S_e para cada punto.

Sección	Límite de resistencia a la fatiga S_e (MPa)
A	115
B	102
C	115

(Fuente: Propia, 2017)

Concentración de esfuerzos y sensibilidad a la muesca

La existencia de discontinuidades o irregularidades como orificios, ranuras o muescas aumentan los esfuerzos teóricos de manera significativa en los alrededores inmediatos de la discontinuidad.

$$K_f = 1 + q_m(K_t - 1) \quad (4.12)$$

$$K_{fs} = 1 + q_{ms}(K_{ts} - 1) \quad (4.13)$$

El anexo I muestra las gráficas necesarias para la obtención de los valores de q , q_s , K_t y K_{ts} respectivamente en las figuras I.8, I.9.

La tabla 4.5 resume las consideraciones tomadas para la obtención de los factores de concentración de esfuerzos por fatiga y por fatiga en corte. Para las secciones B y C los cambios de sección no tienen chaflán. Para la sección A, donde se encuentra el chavetero, se usa la relación recomendada r/d de 0,02 como explica la figura I.9 del anexo I.

Tabla 4.5. Factores de concentración de esfuerzo para cada sección.

Sección	D (mm)	d (mm)	r (mm)	r/d	K_t	K_{ts}	q	q_s	K_f	K_{fs}
A	10	-	0,20	0,02	2,14	3,00	0,68	0,76	1,77	2,52
B	30	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1	1
C	30	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1	1

(Fuente: Propia, 2017)

4.1.2.4. Diámetro del eje

El diámetro del eje se puede calcular utilizando la teoría de falla a fatiga de Goodman, presentada en Budynas et al, 2012 como:

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3} \quad (4.14)$$

La tabla 4.6 muestra los valores a considerar para la obtención del diámetro del eje.

Tabla 4.6. Obtención de diámetros para cada sección.

Sección	S_e (MPa)	S_{ut} (MPa)	K_f	K_{fs}	M_a (N·mm)	M_m (N·mm)	T_a (N·mm)	T_m (N·mm)	n	d (mm)
A	115	620	1,8	2,5	0	0	200	2000	9,1	10,0
B	102	620	1,0	1,0	0	0	200	2000	592	30,0
C	115	620	1,0	1,0	0	0	200	2000	22,9	10,0

(Fuente: Propia, 2017)

La tabla 4.6 muestra factores de seguridad (n) muy altos, es decir que el eje se sobredimensiona, esto se da por las siguientes razones: En la sección A se debe elegir un rodamiento con bolas de contacto angular, que como se muestra en la figura I.10, tiene un diámetro mínimo de 10 mm. La sección B debe cubrir al rodamiento para que ninguna de las partículas de biomasa que caen se introduzcan en el mismo. En sección C se debe colocar un tornillo de fijación que impida el desplazamiento axial de la placa base, por lo que se considera un valor aceptable. Las propiedades finales del eje son: Acero inoxidable AISI 1040 as rolled con una masa de 0,149 kg y una longitud de 120 milímetros.

4.1.2.5. Selección de elementos normalizados

Rodamiento

El rodamiento debe soportar una carga axial de 17,7 N, que es un valor relativamente bajo, entonces el rodamiento a seleccionar es el rodamiento de bolas con contacto angular ya que este soporta cargas axiales moderadas, como las que se aplican en este caso, y además soporta altas velocidades, como las necesarias para triturar la biomasa residual, y además soportan cargas radiales simultaneas.

La figura I.10 muestra que el rodamiento SKF 7200 BECBP cumple con las características de diseño del eje, de revoluciones por minuto y de la carga a soportar por un margen muy amplio.

Tornillo de fijación

El tornillo de fijación debe soportar las cargas axiales, es decir el empuje que tendrá por la placa base y la carga tangencial, es decir la de torsión que se genera. “Los tornillos de sujeción deben tener una longitud de casi la mitad del diámetro del eje” (Budynas et al, 2012). La tabla 4.7 muestra los valores extrapolados para la obtención de las cargas que puede soportar el tornillo, esta tabla es una modificación de la tabla I.11 del anexo I.

Tabla 4.7. Factores de concentración de esfuerzo para cada sección.

Tamaño mm	Par torsión (N·m)	Potencia sujeción (N)
4,00	5,52	3364
6,35	9,82	4448
7,93	18,60	6672

(Fuente: Propia, 2017)

Entonces, el par de torsión que soportaría un tornillo de 4 mm es mayor a la torsión generada del eje (2 N·m) por lo que se le considera adecuado.

Selección del motor eléctrico

La potencia que necesita el motor para vencer el torque generado en el punto A es:

$$P = T * \omega \quad (4.15)$$

$$P = 1,85 (N \cdot m) * 282 (rad/s)$$

$$P = 523 (W)$$

Se seleccionará un motor monofásico que cumpla con las características mínimas planteadas. En el mercado nacional se encuentran los motores WEG como se muestra en la figura I.12 del anexo I. Las características principales del motor se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Características de motores monofásicos.

Potencia		Factor de servicio	RPM (min ⁻¹)	Eficiencia Nominal (%)
Hp	kW			
0,75	0,560	1,25	3500	62
1,00	0,746	1,25	3515	64

(Fuente: Propia, 2017)

Para obtener la potencia mecánica requerida se elegirá un motor de 0,746 kW de potencia eléctrica que aplicada con el factor de servicio y la eficiencia nominal se obtiene la potencia mecánica:

$$P_m = P_e * SF * Ne \quad (4.16)$$

$$P_m = 0,597 (kW)$$

Esta potencia es mayor a la que se necesita para vencer la inercia, por lo que se la considera correcta para su aplicación.

Selección del acoplamiento

Para reducir la dificultad al acoplar el motor con el eje, se optó por un acoplamiento flexible de serie Jaw Lovejoy, tipo L. 075 que cumple con los diámetros del eje calculado, y se puede ver en el anexo I.13.

4.1.3. Dimensionamiento de la tolva

El equipo está pensado para procesar una capacidad de 10 kg de biomasa residual a la vez, pero primero se debe realizar una carga fraccionada al tener una capacidad de procesamiento de trituración de 1,2 kg, luego con la densidad de la basura establecida en 300 kg/m³ se obtiene un volumen de:

$$V_m = \frac{1,2(kg)}{300 \left(\frac{kg}{m^3}\right)}$$

$$V_m = 0,004 (m^3)$$

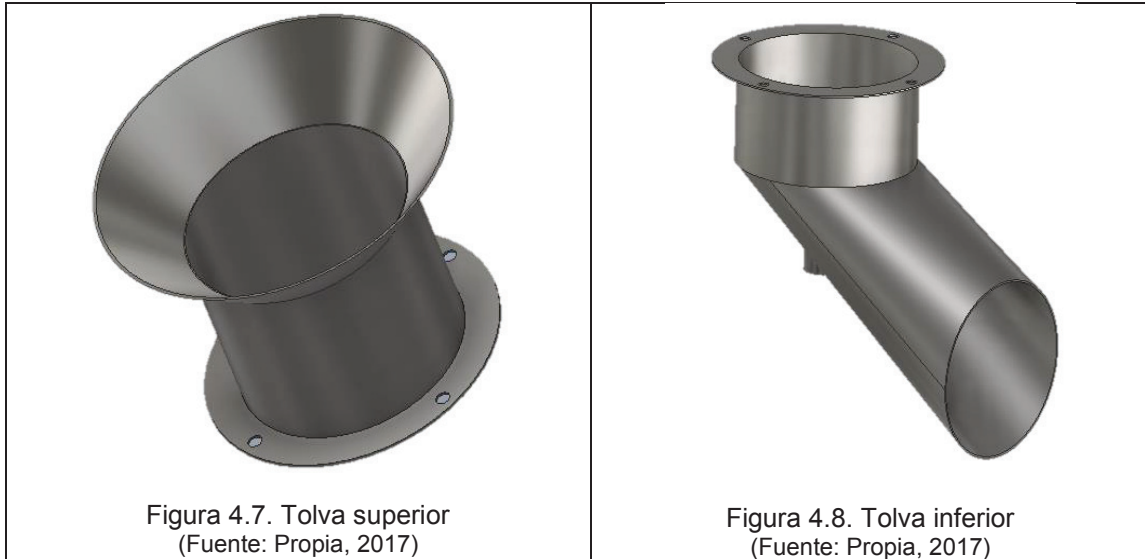
La altura de la tolva será:

$$h_{to} = \frac{V_m}{\pi * r_{pb}^2} \quad (4.17)$$

$$h_{to} = 0,21 (m)$$

La tolva se divide en dos partes, la inferior que soporta el sistema de triturado y la superior que permite la entrada de la biomasa. Se lo realiza así para facilitar el mantenimiento en general del sistema de triturado. Ambas partes se muestran en la tabla 4.9.

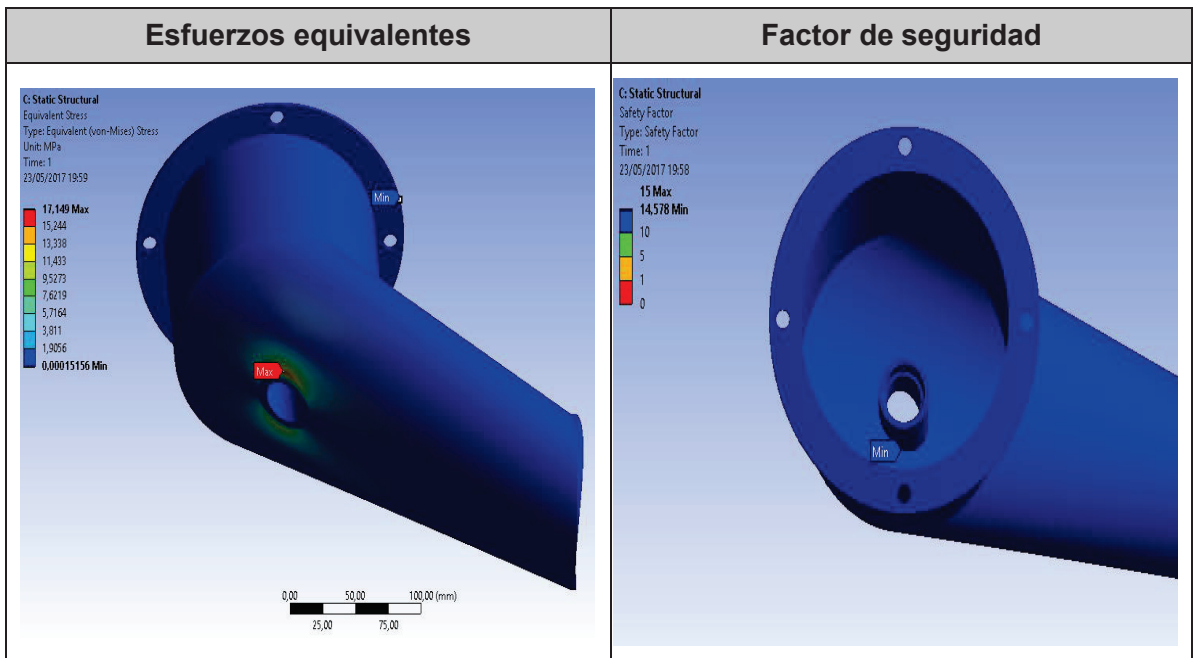
Tabla 4.9. Partes de la tolva trapezoidal.



(Fuente: Propia, 2017)

La parte inferior de la tolva va a soportar cargas generadas por el peso de la parte superior, el peso de la biomasa, el peso del equipo triturador y el par de arranque generado por el motor al iniciar el proceso, el cual es disminuido por el rodamiento. La tabla 4.10 presenta el análisis de la geometría de la parte inferior de la tolva.

Tabla 4.10. Análisis de la parte inferior de la tolva trapezoidal.



(Fuente: Propia, 2017)

$$\sigma_{max} = 17,2 \text{ (MPa)}$$

$$Fs > 15$$

Se presenta una mayor concentración de esfuerzos en la parte baja del apoyo del eje que es donde se concentra la mayor cantidad de fuerzas, aquí también es donde se presenta el factor de seguridad más bajo.

La tolva se diseñará con acero inoxidable de un espesor de 1,5 mm lo cual le dará una masa de 4,9 kg. El dimensionamiento de la tolva se realizó tomando en consideración estos valores ya que se les considera apropiados para la entrada de la biomasa residual principalmente porque los componentes individuales de esta biomasa tienen un tamaño medio entre 178 y 203 mm.



Figura 4.9. Mitad de sección de la tolva completa.
(Fuente: Propia, 2017)

El sistema triturador estará separado del equipo pirolizador ya que éste presenta altas temperaturas y el acople de ambos sistemas presenta una innecesaria complejidad para este tipo de pirolizador donde no se tiene una alimentación continua. Además se requiere una disposición homogénea de la biomasa residual en el reactor, lo cual sólo se lograría manualmente.

Ya que el sistema triturador es muy ligero y consta de un motor girando a altas revoluciones, se considera también un análisis de vibraciones en éste sistema. Las vibraciones que se generan en el triturador se analizan en la figura 4.10.

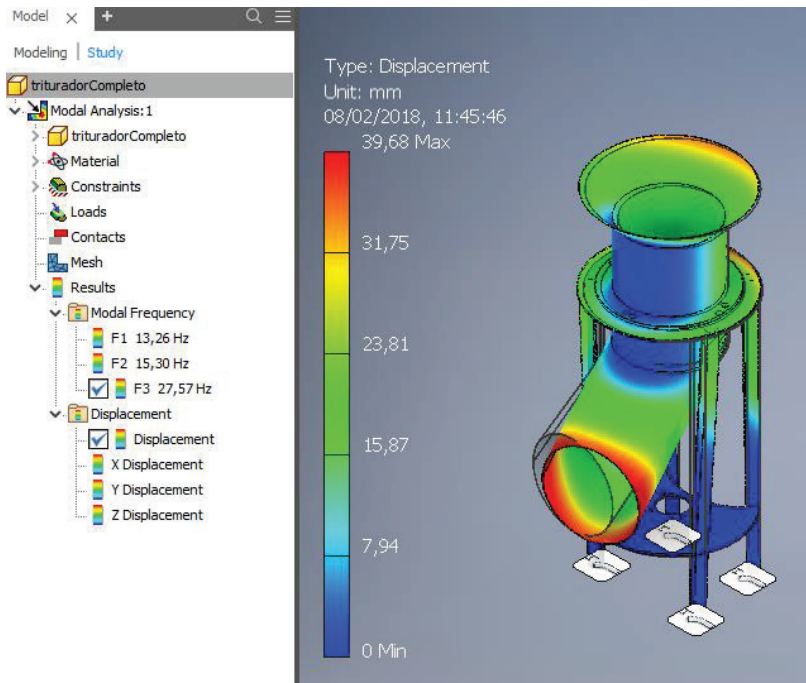


Figura 4.10. Análisis de vibraciones en el equipo triturador.
(Fuente: Propia, 2017)

Como se observa en la figura 4.10 la frecuencia más importante generada por el triturador es:

$$f = 27,6 \text{ (Hz)}$$

Con la frecuencia obtenida se calcula la velocidad angular con la ecuación 4.18:

$$\omega = 2\pi * f \quad (4.18)$$

$$\omega = 173,4 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

Como la velocidad angular del motor es:

$$\omega = 283 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

Se demuestra que el equipo resistirá las vibraciones generadas por el motor.

4.2. Diseño del sistema de pirolización

4.2.1. Cámara interna

Para el dimensionamiento del reactor se considerará la densidad de la biomasa residual como punto de partida. Asumiendo una densidad de la biomasa de 300 kg/m^3 y para 10 kg de biomasa seca, se tiene un volumen de:

$$V = 0,033 \text{ (m}^3\text{)}$$

El volumen de la cámara debe ser capaz de soportar esta capacidad, entonces la altura mínima de la cámara interna será como en la ecuación 4.19.

$$V = \pi * r_i^2 * h_i \quad (4.19)$$

Para un radio de la cámara interna igual a 0,2 m y conocido el volumen, se tiene:

$$h_i = 0,26 \text{ (m)}$$

Para variaciones en la densidad de la biomasa, se considera una altura final de:

$$h_i = 0,4 \text{ (m)}$$

Con lo que se obtiene un volumen de:

$$V_i = 0,05 \text{ (m}^3\text{)}$$

También se tendrá una presión generada por los gases dentro de la cámara, pero los resultados muestran que la presión no varía significativamente ya que el gas generado en cada intervalo de tiempo es muy bajo, por lo que se considerará la presión atmosférica, es decir 101 kPa.

Se escogió utilizar un espesor de 1 mm (Anexo I, figura I.14) para evitar una gran deformación del reactor ya que se trabaja con altas temperaturas. Se elige el acero ferrítico inoxidable 430 por sus buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas y por su resistencia a la corrosión que evitará cualquier modificación indeseada en el ambiente de la cámara interna. Sus propiedades se presentan en la figura I.15 del Anexo I.

El peso del reactor es otro factor importante, para las características presentadas se tiene un peso aproximado de 2,34 kg. El peso de biomasa residual a soportar es de 10 kg, con lo que la suma de estos pesos es 12,3 kg o 121 N, y el esfuerzo al que está sometido la base es:

$$\sigma_{\text{base}} = \frac{F}{c * e_i} \quad (4.20)$$

Donde:

$$\sigma_{\text{base}} = 0,24 \text{ (MPa)}$$

4.2.2. Soportes internos

Para el dimensionamiento de los soportes internos, se considerarán cuatro columnas con el modelo empotrado articulado como en la figura 4.11.



Figura 4.11. Modelo de columna empotrado articulado.
(Fuente: Gere J., 2004)

La carga a soportar para la columna es el peso total del reactor, como ya se observó antes $F = 121 \text{ N} = P_{cr}$, para un factor de seguridad de 3 y ya que se necesitan 4 columnas, entonces $P_{cr} = 90,8 \text{ N}$. Su ecuación se presenta como:

$$P_{cr} = \frac{2,046\pi^2 E_T I}{L_c^2} \quad (4.21)$$

Considerando una longitud de la columna $L_c = 0,05 \text{ m}$ y para el límite elástico del acero ferrítico inoxidable 430 a 673 K donde K es igual a 0,7.

$$K = \frac{E_T}{E} \quad (4.22)$$

$$E_T = 140 \text{ (GPa)}$$

La inercia para una sección transversal tubular es:

$$I = \frac{\pi}{64} [d^4 - (d - 2e)^4] \quad (4.23)$$

Asumiendo un diámetro de 0,01372 m y reemplazando los valores en la ecuación 4.21 y 4.23, se tiene:

$$e = 2,48 \times 10^{-7} \text{ (m)} = 2,48 \times 10^{-4} \text{ (mm)}$$

Este es el espesor mínimo de cada columna para soportar la carga especificada. Como en el mercado nacional se tienen para diámetros externos de 13,72 mm (figura I.16) un espesor de 1,65 mm, entonces éste es apropiado para el diseño.

4.2.3. Cámara externa

Para definir el espesor de la cámara externa se deben definir los materiales de los que está conformada. La figura 4.12 muestra la disposición de los materiales y el flujo de calor que se presenta.

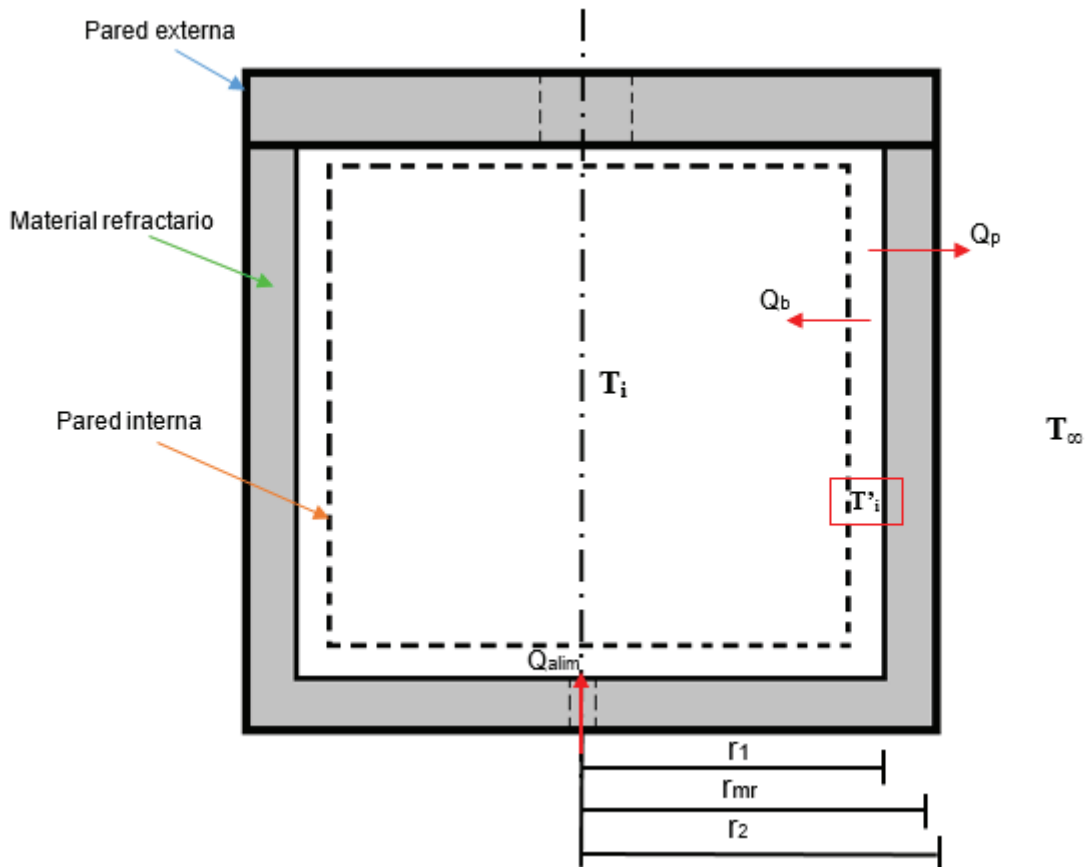


Figura 4.12. Disposición de los materiales y flujo de calor.
(Fuente: Propia, 2017)

En la figura 4.12 se presenta un flujo de calor de alimentación Q_{alim} dentro del equipo, éste se divide en dos flujos de calor, uno que se dirige a la biomasa residual Q_b , y otro que se pierde gradualmente, Q_p .

Al volumen por donde fluye el calor de alimentación se denominará cámara vacía ya que no presenta ningún elemento, está limitada interna y externamente por la pared de la cámara interna y por la pared del material refractario, respectivamente.

4.2.3.1. Espesor del material refractario

Ya que, para esta parte del estudio, el único valor dado es la temperatura impuesta máxima, se empezará el análisis del sistema desde la pared del material refractario de la cámara vacía (r_{mr}) y se lo terminará al interactuar con el ambiente (r_2), es decir se enfocará sólo al flujo de calor perdido Q_p , y éste será un análisis en estado estable cuando ya se alcance la temperatura deseada, es decir:

$$T_i = T_i'$$

El análisis se realizará en la parte baja del equipo donde la temperatura es la misma en toda la sección transversal, como muestra la figura 4.13. Las partículas del fluido en éste punto inicial (T_i) aun no inician la transferencia de calor por convección que se da cuando se intercambia las temperaturas de la cámara vacía y las de la superficie de las paredes (esta transferencia empieza cuando las partículas del fluido empiezan a desplazarse a lo largo de la sección transversal de la superficie). Esto hace que el análisis del espesor de la pared desprecie la convección del sistema en ese punto.

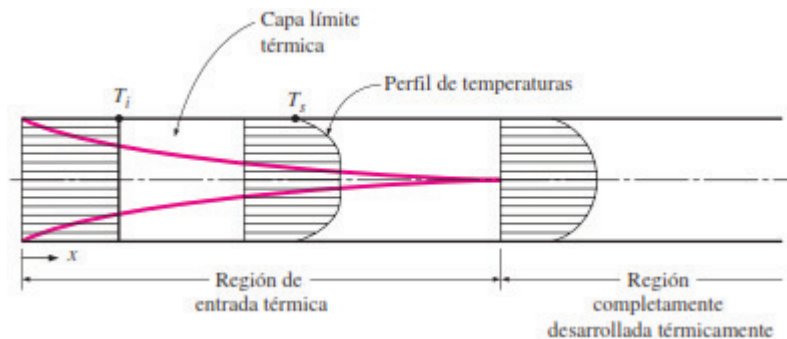


Figura 4.13. Perfil de temperaturas.
(Fuente: Cengel & Ghajar, 2007)

Otro punto a considerar es que los valores del coeficiente de transferencia de calor por convección en la cámara vacía son muy altos (comparados a los valores de conducción, radiación o convección externa), especialmente para relaciones x/D (longitud del tubo/diámetro, ver figura 4.14) muy pequeñas, como se dan en éste caso, que hacen que la ecuación 4.24 presente valores de pérdidas casi idénticos con y sin material refractario, sin importar el espesor de este material, lo cual no se da en la vida real. Es preciso recordar que el coeficiente de transferencia de calor por convección es directamente proporcional al número de Nusselt. Es por eso que no se considerará el análisis de la convección interna.

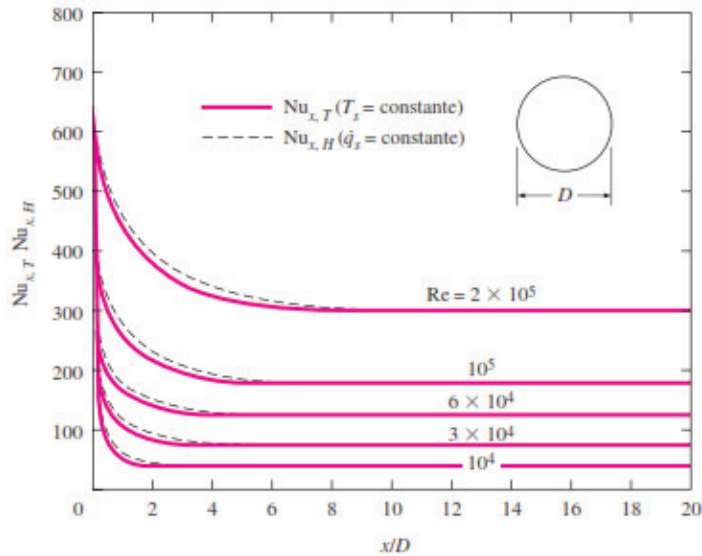


Figura 4.14. Variación del número de Nusselt a lo largo de un tubo.
(Fuente: Cengel & Ghajar, 2007)

Con este análisis se puede interpretar que la superficie interna del material refractario está a una temperatura T_i . Esta simplificación reduce de manera significativa el análisis para la determinación de los espesores.

Entonces, para determinar el espesor del material refractario, se realiza un análisis de resistencias térmicas para el flujo de calor perdido, presentado en la figura 4.15.

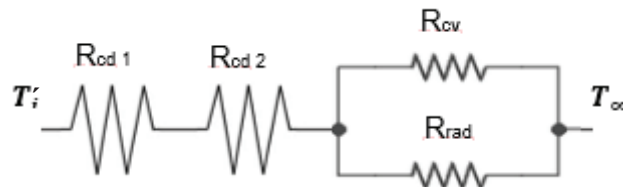


Figura 4.15. Análisis de resistencias térmicas para el flujo de calor perdido.
(Fuente: Propia, 2017)

La primera y segunda conducción ($R_{cd 1}$, $R_{cd 2}$) se da en las paredes del material refractario y en las paredes exteriores de acero del reactor, respectivamente. Al final se tiene una resistencia por convección y radiación entre las paredes exteriores de acero y el aire circundante. Se asume que el material refractario reducirá las pérdidas de calor en un valor proporcional al de la cámara externa sin este material, es decir:

$$Q_p = Q_{psr} * Perdid\text{as} \tag{4.24}$$

Asumiendo que las paredes están en serie y que presentan una forma cilíndrica para simplificar el análisis, las pérdidas de calor para el equipo con material refractante son:

$$Q_p = \frac{T'_i - T_\infty}{\sum R} \quad (4.25)$$

El anexo II muestra los cálculos realizados para obtener el espesor de la cámara externa en base a las ecuaciones presentadas en Cengel & Ghajar, 2007.

Resistencia por conducción 1

La transferencia de calor por conducción en el material refractario se representa como:

$$R_{cd1} = \frac{\text{Ln}(r_{mr}/r_1)}{2\pi L \lambda_{mr}} \quad (4.26)$$

Resistencia por conducción 2

La transferencia de calor por conducción del acero se representa por:

$$R_{cd2} = \frac{\text{Ln}(r_2/r_{mr})}{2\pi L \lambda_{ac}}$$

Resistencia por convección

La transferencia de calor por convección se da entre la superficie externa del reactor y el aire, y se representa como:

$$R_{cv} = \frac{1}{h_{conv} * 2\pi r_2 L} \quad (4.27)$$

Resistencia por radiación

La transferencia de calor por radiación del acero es:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} * 2\pi r_2 L} \quad (4.28)$$

Ya que la resistencia por convección y la resistencia por radiación están en paralelo, se considera:

$$R_{combinada} = \frac{1}{\frac{1}{R_{cv}} + \frac{1}{R_{rad}}} \quad (4.29)$$

Ahora, considerando al equipo sin material refractario:

$$Q_{psr} = \frac{T'_i - T_\infty}{\sum R}$$

La figura 4.16 muestra cómo se consideran las resistencias para el análisis sin el material refractario.

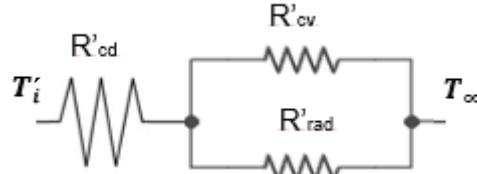


Figura 4.16. Análisis de resistencias térmicas en la sección externa del reactor sin material refractario.
(Fuente: Propia, 2017)

Resistencia por conducción

La transferencia de calor por conducción del acero se representa por la ecuación 4.26:

$$R'_{cd} = \frac{Ln(r_2/r_1)}{2\pi L \lambda_{ac}}$$

Resistencia por convección

La transferencia de calor por convección se da entre la superficie externa del reactor y el aire, y se representa como la ecuación 4.27:

$$R'_{cv} = \frac{1}{h_{conv} * 2\pi r_2 L}$$

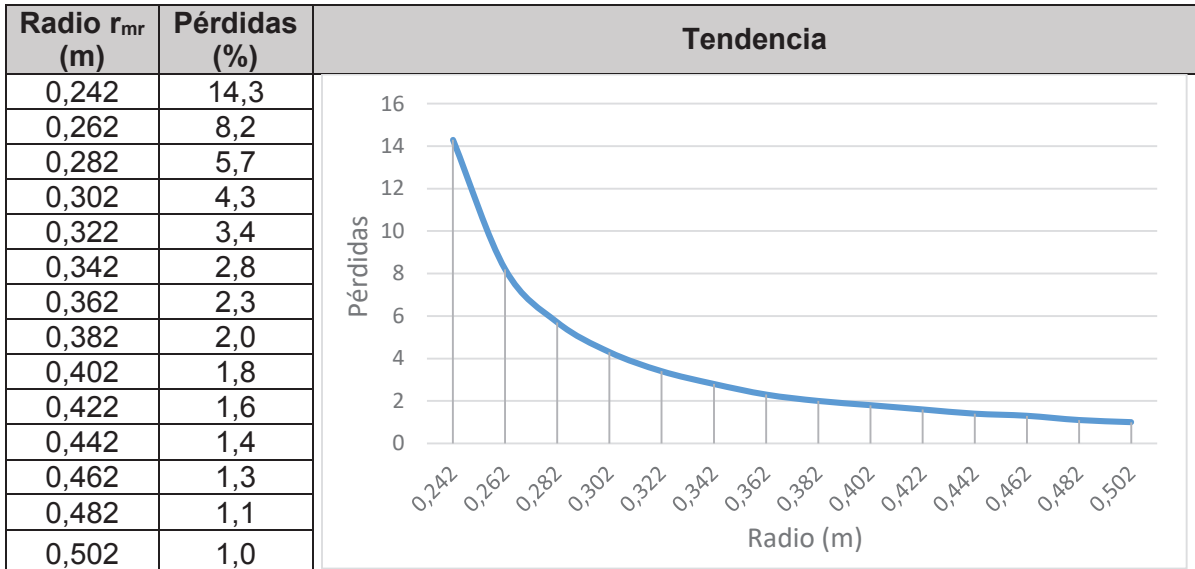
Resistencia por radiación

La transferencia de calor por radiación del acero es:

$$R'_{rad} = \frac{1}{h_{rad} * 2\pi r_2 L}$$

Asignando diferentes valores de r , se obtiene una temperatura superficial externa diferente a la asumida, por lo que se vuelve a realizar el mismo análisis de transferencia de calor para la nueva temperatura. Una vez definida la temperatura superficial externa que alcanzará el reactor se definen las pérdidas para cada valor de r asignado como se muestra en la tabla 4.11, en base a la ecuación II.10 del anexo II:

Tabla 4.11. Radio del material refractario.



(Fuente: Propia, 2017)

Se puede ver que existen menores pérdidas para un radio mayor, y que estas pérdidas siguen disminuyendo para mayores radios, se elige un radio de 0,262 m ya que este retiene un 91,8 % de la energía generada y hace que el equipo presente un tamaño razonable.

Una vez obtenido el espesor se puede obtener los valores de calor perdido en el sistema, por medio de la ecuación 4.25.

$$Q_p = \frac{(400 - 20) \text{ } ^\circ\text{C}}{(0,63 + 3,96 * 10^{-5} + 0,138) \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}\right)} = 497 \text{ (W)}$$

Para obtener la temperatura real de la superficie externa se calculan las resistencias por conducción y el calor perdido que se asume igual en toda la transferencia de calor.

$$Q_p = \frac{T_i - T_s}{R_{cd1} + R_{cd2}}$$

$$T_s = T_i - Q_p(R_{cd1} + R_{cd2})$$

$$T_s = 400 \text{ } ^\circ\text{C} - 497 \text{ (W)} * (0,63 + 3,96 * 10^{-5}) \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}\right)$$

$$T_s = 89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este valor se obtuvo después de modificar la temperatura superficial externa asumida (ya que la temperatura asumida y la obtenida no coinciden) y las propiedades de los materiales a dicha temperatura hasta que coincidan las temperaturas.

Al estar, el equipo, en un área donde no se necesita personal cerca del mismo, está es una temperatura aceptable. Las características de la pared de material refractario se presentan en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Características de la pared de material refractario.

Características de la pared de material refractario	
Material	Silicato de calcio
Densidad (kg/m ³)	2400
Volumen de material (m ³)	0,074
Masa (kg)	110
Espesor (mm)	40

(Fuente: Propia, 2017)

Para espesores mayores, el equipo reduce su temperatura superficial pero esto conlleva a un gran incremento en peso, por ejemplo si el espesor del material refractario es 60 mm se reduce su temperatura superficial a 67 °C pero el peso se incrementa a 180 kg, lo que dificulta el manejo del equipo, y hace que no se cumpla una de las características que éste debería tener, como se vio en la casa de la calidad.

4.2.3.2. Pared externa

Luego se tendrá una pared externa, la cual se encuentra especificada en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Características de la pared externa.

Características de la pared externa	
Material	Acero al carbono A516
Volumen de material (m ³)	0,0021
Masa (kg)	15,7
Espesor (mm)	1,5

(Fuente: Propia, 2017)

4.2.4. Aporte de calor al sistema

El análisis de este problema se puede dividir en dos partes: la energía necesaria para calentar el sistema, y la energía necesaria para que el sistema se mantenga caliente por el tiempo planteado, como indica la figura 4.17.

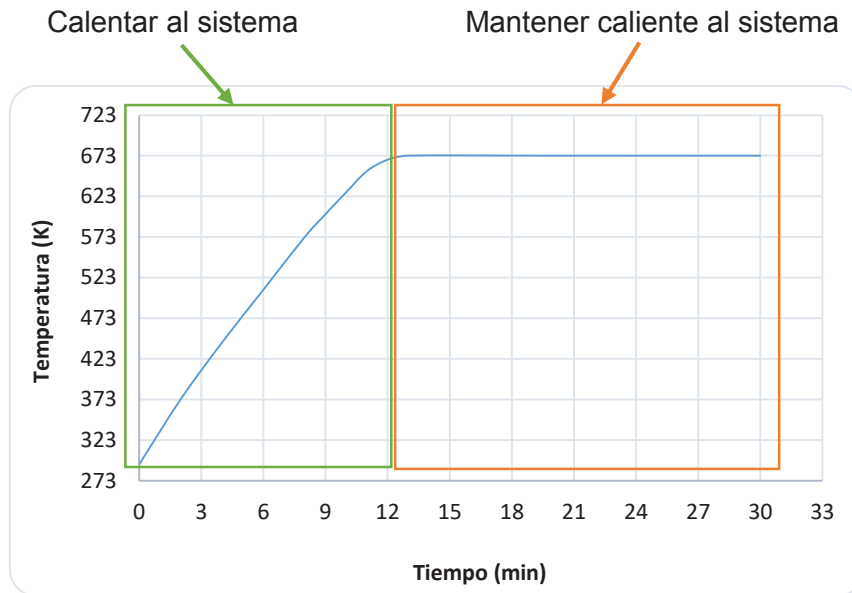


Figura 4.17. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo (Fuente: Propia, 2017)

El análisis de cada una de las partes de la figura 4.17 presenta tres problemas: la cantidad de energía necesaria para calentar la cámara interna, las pérdidas de calor por las paredes del sistema y las pérdidas de calor por la salida de gases. Luego se realiza un análisis de la aportación de energía del material combustible que se necesita para cubrir todas las necesidades energéticas del sistema.

4.2.4.1. Energía necesaria para calentar el sistema

Como se ve en la figura 4.17, esta parte del análisis se presenta en estado transitorio, pero para simplificar su estudio se decidió tomar en cuenta solo su punto crítico, es decir en el punto en que esta sección alcanza los 673 K.

Energía para calentar la cámara interna

Para calcular la energía necesaria para calentar la cámara interna se tienen dos componentes principales, la biomasa residual y la masa de las paredes del reactor interno, los cálculos de las ecuaciones 4.30 y 4.31 se realizan en el anexo II.

$$Q_{sensible\ b} = m_b * C_e * \Delta T \quad (4.30)$$

$$Q_{sensible\ ac} = m_{ac} * C_{eac} * \Delta T \quad (4.31)$$

$$Q_b = 10,3 (MJ)$$

$$Q_{ac} = 0,533 (MJ)$$

Entonces, la energía necesaria para que la biomasa y el acero lleguen a una temperatura de 673 K es:

$$Q_{cal} = Q_b + Q_{ac} \quad (4.32)$$

$$Q_{cal} = 10,8 \text{ (MJ)} = 3 \text{ (kWh)}$$

Pérdidas de calor

Las pérdidas de calor son otro factor a considerar, aquí el análisis de las resistencias se hace considerando la convección que existe entre la cámara vacía y la pared del refractario, como se observa en la figura 4.18.

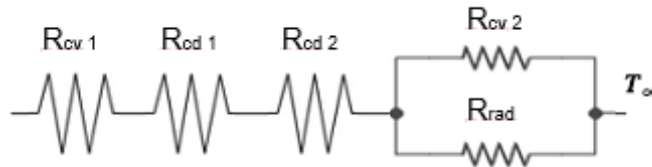


Figura 4.18. Análisis de resistencias para las pérdidas de calor.
(Fuente: Propia, 2017)

La resistencia por convección 1 será en base a la ecuación 4.27:

$$R_{cv1} = \frac{1}{h * 2\pi r_1 L}$$

$$R_{cv1} = 0,190 \left(\frac{^{\circ}C}{W} \right)$$

El resto de resistencias fueron calculadas en el anexo II, por lo que se tiene:

$$Q_p = \frac{T_i - T_{\infty}}{R_{cv} + R_{cd1} + R_{cd2} + R_{comb}} \quad (4.33)$$

$$Q_p = 398 \text{ (W)}$$

En el capítulo dos se plantea una tasa de calentamiento de 30 °C/min, asumiendo una temperatura ambiente de 293 K se necesitarían 12,7 minutos para alcanzar los 673 K, por lo que se tiene que la energía perdida en el proceso calentamiento es:

$$t = 12,7 \text{ (min)} = 0,212 \text{ (h)}$$

$$Q_{p \text{ paredes}} = 398 \text{ (W)} * 0,212 \text{ (h)} = 84,4 \text{ (Wh)}$$

Pérdidas de calor por la salida de gases

Los gases generados por la combustión del GLP salen del equipo con una determinada cantidad de energía a ser considerada. Para hacer su estudio de forma exacta se necesitaría un análisis completo de combustión, pero éste se puede simplificar en base a la ecuación 4.34.

$$Q_{p\ gases} = m_{gases} * C_{e\ aire} * \Delta T \quad (4.34)$$

La simplificación del proceso de combustión asume una combustión completa de gases, entonces, la masa de aire se calcula en base a la relación estequiométrica aire/combustible para GLP (Reed, 1986).

$$m_{aire}/_{combustible} = 14,7$$

De aquí se obtiene la m_{gases} necesaria para el cálculo de la ecuación 4.34, también se asume una temperatura de salida de gases de 873 K por su baja transferencia de calor por convección (Koraiem et al., 2015), y en base a los cálculos del anexo II, se tiene:

$$Q_{p\ gases} = 3184\ (kJ) = 0,884\ (kWh)$$

Entonces, la cantidad de energía que se necesita para calentar el sistema es:

$$Q_{cs} = Q_{cal} + Q_{p\ paredes} + Q_{p\ gases} = 3 + 0,0844 + 0,884\ (kWh)$$

$$Q_{cs} = 3,969\ (kWh)$$

4.2.4.2. Energía necesaria para mantener caliente al sistema

Energía necesaria para mantener caliente la cámara interna

Según el análisis del equipo, una vez llegado a 673 K, y detenida la alimentación de GLP, la temperatura disminuirá alrededor de 6 K cada 100 segundos, y según los cálculos realizados en la sección energía para mantener caliente al sistema del anexo II, en base a las ecuaciones 4.30 y 4.31, la energía necesaria para que la biomasa y el acero se mantengan a una temperatura de 673 K es:

$$Q_{mant} = 0,572\ (kWh)$$

Cálculo de las pérdidas de calor

En base a la ecuación 4.30 y para un tiempo de permanencia de 30 minutos, se tiene que la energía perdida en todo el proceso de pirólisis es:

$$t = 30 \text{ (min)} = 0,5 \text{ (h)}$$

$$Q'_{p \text{ paredes}} = 398 \text{ (W)} * 0,5 \text{ (h)} = 199 \text{ (Wh)}$$

Cálculo de las pérdidas de calor por la salida de gases

En base a la ecuación 4.34, y a los cálculos del anexo II, se tiene que la pérdida de calor por la salida de gases para mantener una temperatura de 673 K es:

$$Q'_{p \text{ gases}} = 452 \text{ (kJ)} = 0,126 \text{ (kWh)}$$

Y la cantidad de energía que se necesita para mantener caliente al sistema es:

$$Q_{mcs} = Q_{mant} + Q'_{p \text{ paredes}} + Q'_{p \text{ gases}} = 0,573 + 0,199 + 0,126 \text{ (kWh)}$$

$$Q_{mcs} = 0,897 \text{ (kWh)}$$

Aportación de energía del material combustible

Las características principales de los combustibles gaseosos que se toman para realizar los cálculos son la densidad, el poder calorífico y la presión. El poder calorífico determina la cantidad de gas que se debe suministrar para calentar un objeto, la densidad y la presión determinan las pérdidas de carga y la velocidad de circulación en las tuberías.

La norma ecuatoriana CPE INEN-NEC-SE-IG 26-1, presenta estas propiedades para los gases más comunes utilizados en el país. Estas propiedades se observan en las tablas 4.14 y 4.15, que son una modificación de la norma, enfocada a los datos de interés. Ya que la densidad de los gases en la norma es muy vaga, se utiliza también datos externos.

Tabla 4.14. Clasificación de los gases combustibles.

Gas	Componente principal	Densidad relativa	PCS en volumen (kWh/m ³)	PCS en masa (kWh/kg)	Índice de Wobbe (MJ/m ³)	Límite de inflamabilidad
Gas manufacturado	Metano + H ₂ +CO		5,23		19,13 – 27,64	6 a 45
Gas Natural	Metano	0,598	12,20		39,10 – 54,70	5 a 15
GLP	Propano	1,62	27,29	14,0	72,90 – 87,30	2,4 a 9,5
	Butano	2,03	36,00	13,95		1,8 a 8,4

(Fuente: Norma ecuatoriana CPE INEN-NEC-SE-IG 26-1 modificada, 2014)

La densidad relativa es la relación entre la densidad absoluta del gas y la densidad absoluta del aire (1,293 kg/m³) a la misma temperatura (0 °C) y presión (1atm).

Tabla 4.15. Presiones de uso normal en los aparatos.

Gas	Presión mínima a la entrada del aparato a gas KPa. (mbar)	Presión máxima a la entrada del aparato a gas KPa. (mbar)
Gas manufacturado	0,60 (6)	1,20 (12)
Gas Natural	1,70 (17)	2,20 (22)
Propano	2,00 (20)	2,80 (28)
Butano	2,50 (25)	3,70 (37)

(Fuente: Norma ecuatoriana CPE INEN-NEC-SE-IG 26-1, 2014)

Se utilizará GLP (Gas Licuado de Petróleo) que, según la norma ecuatoriana CPE INEN-NEC-SE-IG 26-1, “es la mezcla de hidrocarburos gaseosos en estado natural, en cuya composición predominan los hidrocarburos propano y butano”; ya que este es el gas más accesible.

El calor que realmente se puede utilizar para el calentamiento se le denomina PCI (Poder Calorífico Inferior), cuya relación con el PCS (Poder Calorífico Superior) es aproximadamente:

$$\frac{PCI}{PCS} = 0,9 \quad (4.35)$$

Con lo que se tiene un PCI para el GLP con componente principal butano de:

$$PCI = 12,6 \left(\frac{kWh}{kg} \right)$$

La masa de GLP que se necesita para calentar y mantener caliente el sistema es:

$$m_{cal} = \frac{Q_{cs}}{PCI} = \frac{3,969 (kWh)}{12,6 \left(\frac{kWh}{kg} \right)} = 0,315 (kg)$$

$$m_{mant} = \frac{0,897 (kWh)}{12,6 \left(\frac{kWh}{kg} \right)} = 0,0712 (kg)$$

Entonces la masa de GLP necesaria para que el sistema llegue a los 673 K y se mantenga a esta temperatura por 30 minutos es:

$$m_{alim} = m_{cal} + m_{mant}$$

$$m_{alim} = 0,386 \text{ (kg)}$$

Para que el equipo sea más eficiente, se considera la cantidad de gas que se necesitaría para realizar todo el proceso, que como se vio, este está relacionado directamente con las pérdidas que a su vez están en función del tamaño del equipo, como se observa en la tabla 4.16.

Tabla 4.16. Gas necesario para calentar el equipo.

r (m)	m (kg)
0,222	0,398
0,242	0,389
0,262	0,386
0,282	0,385
0,302	0,384
0,322	0,383
0,342	0,383
0,362	0,382
0,382	0,382
0,402	0,382
0,422	0,382
0,442	0,382
0,462	0,382

(Fuente: Propia, 2017)

Esto reitera la elección del radio elegido ya que no hay cambios significativos de aportación de masa a mayor radio y estos no compensan el peso que se añadiría al equipo, como se comentó anteriormente.

4.3. Diseño de tuberías de alimentación

Para determinar el diámetro de las tuberías se debe considerar el caudal que se tiene de gas, considerando la densidad relativa del GLP con respecto de la densidad del aire a 20 °C se obtiene la densidad del GLP.

$$n = \frac{\rho_{GLP}}{\rho_a} \tag{4.36}$$

$$\rho_{GLP} = 2,03 * 1.293 \left(\frac{m^3}{kg} \right) = 2,62 \left(\frac{m^3}{kg} \right)$$

El mayor flujo volumétrico de GLP será utilizado para calentar al reactor. Como ya se analizó, se necesita 0,315 kg de GLP, por lo que su volumen es:

$$V = \rho_{GLP} * m_{glp} \quad (4.37)$$

$$V = 0,83 (m^3)$$

Y ya que se necesitan 12,7 minutos para alcanzar la temperatura de 673 K, se tendrá un caudal de:

$$\dot{Q} = \frac{V}{t} \quad (4.38)$$

$$\dot{Q}_{max} = \frac{0,83 (m^3)}{12,7 (min)} * 60 = 3,89 \left(\frac{m^3}{h} \right)$$

El caudal mínimo es el caudal que se necesita para que se mantenga a la misma temperatura, por lo que se tiene:

$$\dot{Q}_{min} = \frac{0,12 (m^3)}{30 (min)} * 60 = 0,37 \left(\frac{m^3}{h} \right)$$

Con el caudal obtenido y según la norma ecuatoriana CPE INEN-NEC-SE-IG 26-1 las tuberías de acero inoxidable deben cumplir con la norma ASTM A-312, y en el mercado nacional dicha tubería tiene un diámetro mínimo externo de 13,72 mm, como se observa en la figura I.16 del anexo I. El diseño final de la tubería conectada a un quemador normalizado se presenta en la figura 4.19.

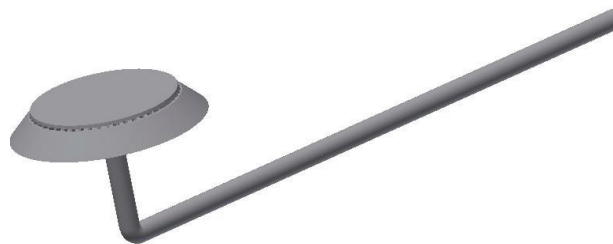


Figura 4.19. Sistema de alimentación.
(Fuente: Propia, 2017)

El sistema de alimentación será colocado en la parte baja de las paredes externas como se muestra en la figura 4.20, esto con la finalidad de hacer más fácil su colocación en el equipo, y de facilitar el análisis de la transferencia de calor ya que se considera un flujo paralelo a la pared del equipo.

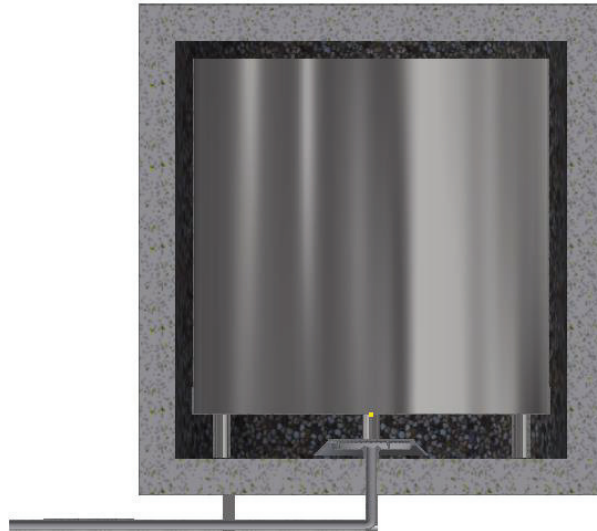


Figura 4.20. Disposición final de la tubería de alimentación.
(Fuente: Propia, 2017)

4.4. Soportes externos

Para el dimensionamiento de estos soportes, se considerarán cuatro columnas con el modelo empotrado articulado como se vio en la figura 4.11. La carga a soportar para la columna es el peso total del equipo (146 kg) y su fuerza generada es de 1431 N, calculado en el anexo II. Aplicando las ecuaciones 4.21 hasta la 4.23 usadas para el análisis de los soportes internos, y cuyo cálculo se encuentra en el anexo II, se tiene:

$$e = 5,12 \times 10^{-6} \text{ (m)} = 5,12 \times 10^{-3} \text{ (mm)}$$

Éste es el espesor mínimo de cada columna para soportar la carga especificada. Como en el mercado nacional se tienen para diámetros externos de 13,72 mm (figura I.16 del anexo I) espesores de 1,65 mm, se le considera apropiado para el diseño.

Ruedas

Para la selección de las ruedas se toma en cuenta la capacidad de carga de cada rueda en relación al peso total del equipo, que tomando en consideración el soporte final tendrá un peso de 149 kg, entonces la capacidad de carga de la rueda es:

$$C = \frac{P}{N} \tag{4.39}$$

Donde el peso del equipo es $P = 149 \text{ kg}$ y el número de ruedas en contacto con la superficie es $N = 3$, entonces:

$$C = 49,6 \text{ (kg)}$$

El equipo consta de 4 ruedas, pero se considera que al menos 3 ruedas estarán siempre en contacto con el suelo por medidas de seguridad. En el mercado nacional hay garruchas que soportan cargas mínimas de 40 kg, pero ya el equipo necesita estar fijo cuando está trabajando porque tiene una conexión con un tanque de GLP; se elige una garrucha con freno, la cual presenta una carga máxima de 50 kg como se aprecia en la figura I.19 del anexo I, el cual se ajusta perfectamente al equipo.

4.5. Cálculo del aislante en la tubería

Una vez que se termina la pirolización de la biomasa residual, los gases se desplazan por una tubería hasta el condensador. El análisis para las tuberías tiene una forma similar al que se realizó para el cálculo del espesor del material refractario, con la diferencia de que ahora el acero está en contacto con el gas, y luego se presenta el material aislante. El análisis se da en la figura 4.21.

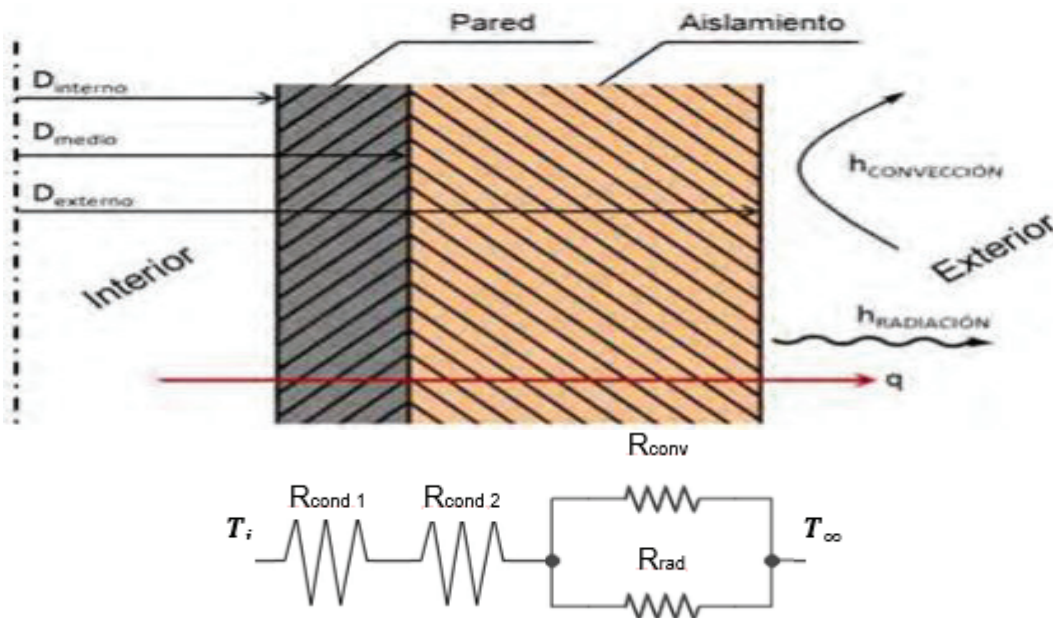


Figura 4.21. Análisis de resistencias en la tubería.
(Fuente: Propia, 2017)

Se elige una tubería de acero inoxidable como se observa en la figura I.16 del anexo I que soportan cargas por presión, cuyo diámetro exterior es de 0,06033 m, y su radio interior es 0,0548 m. Asumiendo un espesor de material aislante de 0,04 m, como se observa en la figura I.20 del anexo I, y en base a los cálculos para la tubería del anexo II en la sección tubería, se tienen unas pérdidas de:

$$Q_p = 221 (W)$$

Y se tiene una temperatura de:

$$T_{s \text{ aislante}} = 46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.6. Diseño del sistema de separación

Al final del sistema pirolizador, se tiene el sistema de separación en donde se condensan los gases con un punto crítico de temperatura mayor. Los de menor punto crítico, siguen por el sistema de tuberías para llegar a ser reciclados. Esta sección realiza el cálculo de las pérdidas de calor en dichas tuberías.

Para diseñar el sistema de separación de los gases generados se deben conocer las propiedades de estos. El gas generado contiene biogás y bioaceite (en estado gaseoso), entonces las propiedades de cada componente gaseoso a considerar y las propiedades que tendrá la mezcla de gases, se presentan en la tabla 4.17, los cálculos de cómo se obtuvieron estas propiedades se basaron en la tesis de García, 2011, y sus cálculos se presentan en el anexo II en la sección Sistema de separación.

Tabla 4.17. Propiedades los gases a 673 K.

Gas	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kg·K)	Conductividad térmica (W/m·K)	Viscosidad dinámica ·10 ⁻⁶ (kg/m·seg)	Masa molar en la reacción M (g/mol)	Fracción molar x*
H ₂	0,061	14,50	0,2280	10,9	2	0,201
CO	0,854	1,05	0,0323	22,2	56	0,302
CO ₂	1,342	0,94	0,0246	19,3	88	0,233
CH ₄	0,341	1,71	0,0350	18,8	16	0,063
H ₂ O	0,554	2,01	0,0261	13,4	144	0,010
Alquitrán	0,880	1,04	0,0490	19,0	96	0,191
Mezcla	0,82	2,53	0,0518	28,7	402	1

(Fuente: Propia, 2017)

*La fracción molar de cada componente se la analizó en base al promedio del porcentaje en peso de gases obtenidos en la figura 5.12 y en base al momento donde se genera mayor cantidad de gas.

4.6.1. Transferencia de calor en la tubería

El gas generado tendrá un cambio de temperatura al salir del reactor, pasar por la tubería y llegar al condensador, como se ve en la figura 4.22, por lo que es necesario conocer la temperatura al final de la tubería.



Figura 4.22. Análisis de pérdida de temperatura en la tubería.
(Fuente: Propia, 2017)

Para esta sección se asume lo siguiente:

- Coeficiente de transferencia de calor por convección constante.
- Condiciones de operación estacionarias.
- Propiedades del gas constantes a lo largo de la tubería.
- Se tiene una velocidad de gas promedio.
- El flujo de calor es constante.
- Se tiene un gas ideal.

Entonces, la razón de transferencia de calor como se presenta en Cengel & Ghajar, 2007, es:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_i - T_e) \quad (4.40)$$

Para un tiempo de 35 minutos, el flujo másico es:

$$\dot{m}_g = 0,25 \left(\frac{kg}{min} \right) = 15 \left(\frac{kg}{h} \right)$$

El subproducto líquido de la biomasa residual (alquitrán) es un compuesto químico muy complejo, por lo que su salida y su análisis teórico son muy poco citados en la literatura. Dicho esto, se asume un calor específico del gas conocido presentado en la tabla 4.17, y con el análisis de la mezcla de gases presentado en el anexo II, para una T_i de 673 K se tiene una temperatura de:

$$T_e = T_i - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}C_p} \quad (4.41)$$

$$T_e = 667 K$$

4.6.2. Transferencia de calor en el condensador

Al conocer la temperatura a la que llega el gas al condensador, y su flujo másico, se puede realizar el análisis de condensación en base a las ecuaciones presentadas en Cengel & Ghajar, 2007, empezando por la ecuación 4.42:

$$\dot{Q}_{gt} = \dot{Q}_{agua} \quad (4.42)$$

Por lo que en base a la ecuación 4.40:

$$\begin{aligned} \dot{m}_g C_{p,g} (T_{i,g} - T_{f,g}) &= \dot{m}_{agua} C_{p,agua} (T_{f,agua} - T_{i,agua}) \\ \dot{Q}_{gt} = \dot{Q}_{agua} &= 12 \left(\frac{MJ}{h} \right) = 3333 \text{ (W)} \end{aligned}$$

Con una $T_{f,g}$ (Temperatura del gas a la salida del condensador) asumida para 80 °C, un flujo másico de agua de 100 kg/h, una temperatura del agua a la entrada del condensador de 20 °C, estos datos obtenidos experimentalmente, y un calor específico del agua de $4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, y en base a los cálculos de la sección condensador del anexo II, la temperatura del agua a la salida del condensador es:

$$T_{f,agua} = 49 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Y el condensador tendrá una longitud de:

$$L = 0,29 \text{ (m)}$$

Esta longitud es suficiente para enfriar al gas a la temperatura deseada, pero en caso de que exista variación tanto en el flujo de gas generado como en el flujo de agua, y considerando una posible variación en las propiedades del bioaceite, se decidió tener una longitud final de:

$$L = 0,3 \text{ m}$$

Y la efectividad del condensador es, en base a la ecuación de Cengel & Ghajar, 2007:

$$\varepsilon_{flujo\ paralelo} = \frac{1 - \exp \left[-\frac{UA}{C_{min}} \left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \right]}{1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}} \quad (4.43)$$

El anexo II en la sección condensador muestra que se tendrá una eficiencia de:

$$\varepsilon_{flujo\ paralelo} = 0,51$$

La figura 4.23 muestra el condensador en forma de intercambiador de calor de flujo paralelo.



Figura 4.23. Condensador.
(Fuente: Propia, 2017)

La figura 4.24 muestra la disposición final del equipo.



Figura 4.24. Equipo completo.
(Fuente: Propia, 2017)

5. ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis de la biomasa

El análisis de la biomasa se realizará considerando las siguientes condiciones:

- La conservación de masa y energía son unidireccionales.
- La biomasa es un medio poroso isotrópico.
- La biomasa se analiza como una mezcla entre material volátil, carbono fijo y ceniza.

El análisis de la composición química de la biomasa residual involucra procesos muy complejos que no están dentro del alcance de este trabajo, por lo que se utilizó datos encontrados en bibliografía; (Matsakas et al., 2014, Sanner et al., 1970, Buah et al., 2007, Ok & Uchimiya, 2015) la biomasa residual está formada de tres componentes principales: celulosa ($90.29 \pm 0.33\%$), lignina ($2.16 \pm 0.25\%$) y hemicelulosa ($7.55 \pm 0.39\%$). El porcentaje de celulosa se obtuvo al juntar todos los otros componentes determinados por Matsakas et al., 2014, ya que presentan propiedades físicas similares.

La celulosa $C_6H_{10}O_5$, es el compuesto dominante en este tipo de biomasa, tiene una reacción química donde la mayor parte de los componentes en los que se transforma son gases no condensables (CO , CO_2 , H_2 , CH_4), otra parte son gases condensables como el alquitran y/o aceite generado (C_6H_8O), y otra parte es la del carbono fijo.

La lignina presenta diferentes tipos de fórmulas moleculares como se menciona en el capítulo 1, las más comunes son $C_9H_{10}O_2$, $C_{10}H_{12}O_3$, $C_{11}H_{14}O_4$, que se convierten en CO , CH_4 , y C_2H_4 , también presenta ácido piroleñoso y alquitran insoluble.

La hemicelulosa se descompone en gases como el CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , etc. y otros compuestos orgánicos (Thomsen et al., 2011).

Los bioaceites generados por la biomasa residual, son representados como hidrocarburos líquidos que generalmente contienen aldehídos, cetonas, alcoholes, ácidos carboxílicos, aromáticos, etc. (Lu et al, 2010). Estos presentan un análisis tan complejo, que no son considerados para la simulación. Además, se tiene un porcentaje de biomasa que no reacciona (es inerte), y es la que se le considera como ceniza.

La tabla 5.1 muestra otras características de la biomasa seca obtenidos tanto en Tchobanoglous et al, 2014 como en los valores base obtenidos en la tabla 2.3 y 2.4 del capítulo II:

Tabla 5.1. Datos típicos de un análisis elemental para biomasa residual.

	Conductividad térmica (J/g·K)	Poder calorífico (kcal/kg)	Porcentaje en peso (% w/w)			
			Material volátil	Carbono fijo	Ceniza	Porcentaje de humedad
Biomasa residual seca	2,72	1111,12 (típico) 833-1667	83,50	11,80	4,60	0,10

Fuente: (Adaptado de Tchobanoglous et al, 2014)

El material volátil es el material que se transforma en los gases condensables y no condensables, reduciendo así la cantidad de biomasa en el sistema, el material volátil está compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina. El carbono fijo es el residuo combustible obtenido después de que todo el material volátil se haya retirado. La ceniza es el residuo final de cualquier tipo de combustión completa y se considera también a la fracción de sólido presente.

Otro concepto importante es la porosidad abierta, que se define según Staub et al., 2009, como:

$$n_o = 1 - \frac{V_s}{V}$$

Donde V_s es el volumen de sólido, y V es el volumen total de material volátil, es decir que la porosidad abierta n_o es la fracción de gas presente en el material volátil. Entonces, la fracción de sólido presente es

$$n_s = 1 - n_o = \frac{V_s}{V}$$

La simulación se realizará con la fracción de sólido presente. Como en Staub et al., 2009 se obtiene una porosidad abierta entre 57.7 % y 72.9 %, con esto se tiene un promedio de 65.3% y por ende una fracción de sólido presente de 34.7 %.

5.2. Entorno de simulación OpenFoam

El software OpenFoam, Open Field Operation and Manipulation (campo abierto de manipulación y simulación) es una biblioteca gratuita y de código abierto escrita en C++ para crear o personalizar solucionadores de métodos numéricos para resolver problemas de mecánica de medios continuos, como la mecánica de fluidos computacional (CFD), reacciones químicas, análisis de esfuerzos, magnetismo, métodos financieros, entre otros. Además cuenta con librerías específicas que son parte de las simulaciones físicas

a ejecutar; como modelos de transporte, turbulencia, cinética de reacciones químicas, termofísicas, etc.

Al ser un paquete computacional de código abierto se pueden añadir nuevas librerías y prácticamente cualquier tipo de condiciones que el usuario necesite. Usar estas herramientas requiere conocimientos avanzados de programación y del funcionamiento de OpenFoam.

Este software fue desarrollado inicialmente para el sistema operativo Linux (Debian, Ubuntu, CentOS, etc.), actualmente se lo puede ejecutar con otros sistemas operativos como Windows o iOS. Es recomendable trabajar con Linux debido a que presenta mayores ventajas; como una mayor estabilidad y velocidad de simulación, mayor flexibilidad para utilizar versiones anteriores del software, también mayor facilidad de edición, aprendizaje mas rápido ya que la mayoría de tutoriales se presentan en Linux y otras ventajas.

Este software permite realizar tareas de preprocesamiento como la generación de mallado simple y complejo, la importación de archivos CAD (Diseño asistido por computadora), modificación de las condiciones del problema, de las condiciones iniciales y del tipo de solucionador a utilizar, este último requiere un conocimiento de programación medio en C++ y tareas de postprocesamiento como el manejo de datos obtenidos, y la visualización de dichos datos en otros programas de software libre, como Paraview. Otra característica importante es la capacidad de procesamiento en paralelo, ya que la licencia del software no limita el uso de aplicaciones en los núcleos.

Una desventaja del programa es la sensibilidad con el tipo de malla con la que se trabaje, como todo software de simulación, puesto que OpenFoam trabaja con mallas estructuradas tetraédricas o hexaédricas, por lo que siempre se debe garantizar la calidad de la malla.

5.2.1. Estructura de un caso

Los casos a ser simulados en OpenFoam presentan la estructura que se muestra en la figura 5.1, estos archivos poseen la información necesaria para simular el caso, como; su geometría, los detalles del mallado, las condiciones de borde, las propiedades físicas, y otros archivos que dependerán de cada caso.

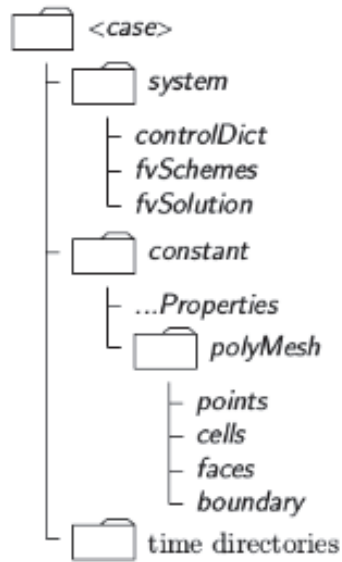


Figura 5.1. Estructura básica de un caso en OpenFoam.
(Fuente: Kwiatkowski et al., 2013)

Los subdirectorios de cada caso son:

- **System:** Contiene los archivos relacionados con los métodos de solución del caso, aquí se presentan por lo menos tres archivos fijos: a) controlDict donde se definen los parámetros de control de la simulación, como el tiempo de simulación. b) fvSchemes, donde se selecciona el proceso de discretización para resolver el problema, y c) fvSolution, que selecciona el método para resolver las ecuaciones lineales, las tolerancias y los parámetros de solución de los algoritmos.
- **Constant:** Contiene los archivos que definen los parámetros físicos del caso, como por ejemplo las propiedades termofísicas. Contiene también toda la información de la geometría y de la malla incluida en la carpeta polyMesh.
- **Directorios de tiempo:** El caso contiene archivos individuales de las variables analizadas, normalmente se presenta un directorio "0" en donde se plantean los valores iniciales de las variables y las condiciones de borde. Cuando la simulación empiece OpenFoam irá escribiendo directorios con el valor del tiempo determinado por el archivo controlDict.

5.2.2. Solucionador biomassGasificationFoam

Como se mencionó anteriormente OpenFoam es una biblioteca de código abierto que contiene solucionadores ejecutables específicos, con algoritmos que hacen uso de librerías específicas para organizar los cálculos de cada caso. Por ejemplo, fireFoam, es un solucionador de problemas donde se presenta la combustión de un gas. OpenFoam

da la posibilidad de crear, sustituir o modificar estos solucionadores y sus librerías para adecuarlas al caso a analizar.

Con el fin de simular procesos físicos y termoquímicos de gasificación y pirólisis de biomasa, Kwiatkowski et al., 2013, crearon un solucionador denominado biomassGasificationFoam, y una librería complementaria biomassGasificationMedia, que integran modelos de secado, pirólisis, gasificación, combustión y flujos complejos dentro de una masa porosa. Este solucionador contiene; análisis de transferencia de calor y de masa entre gases y sólidos, reacciones homogéneas y heterogéneas, y mecanismos cinemáticos modificables de pirólisis y gasificación, entre otros. La figura 5.2 presenta la estructura del código desarrollado, el solucionador y su librería.

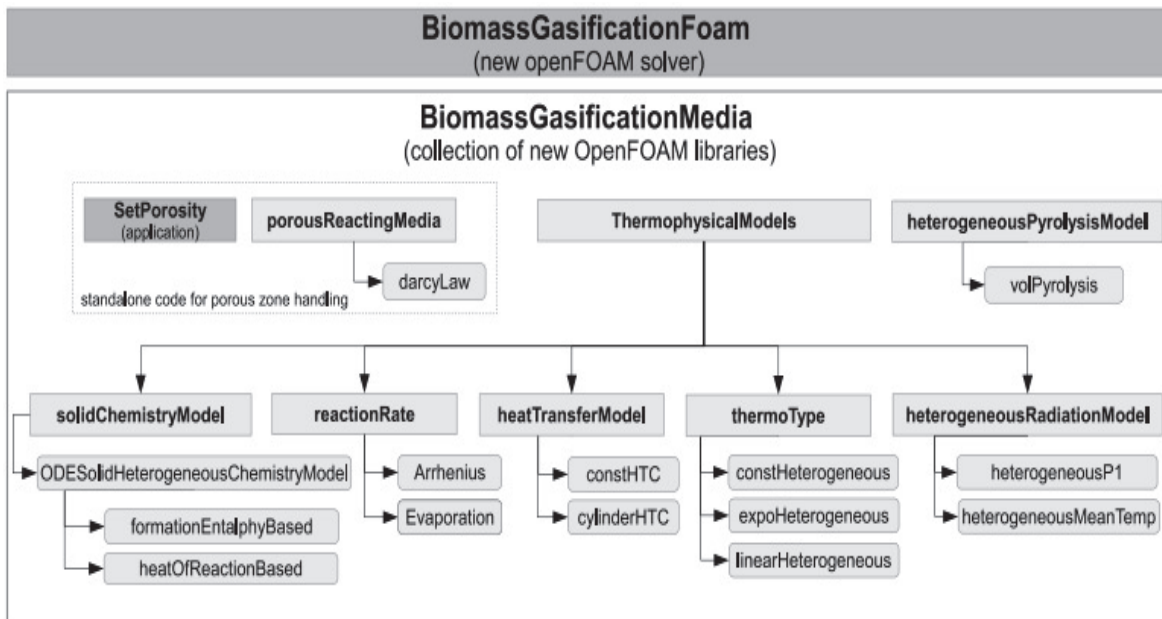


Figura 5.2. Estructura del solucionador biomassGasificationMedia.
(Fuente: Kwiatkowski et al., 2013)

El código de este solucionador tiene cuatro componentes:

- biomassGasificationFoam: Es el solucionador en sí, el cual contiene el algoritmo para integrar a las demás librerías, se basa en el solucionador estándar reactingFoam.
- biomassGasificationMedia: Conjunto de modelos de conversión térmica de la biomasa.
- setPorosity: Ejecutable para la creación del campo poroso utilizado en el preprocesamiento que incluye en su librería la ley de Darcy para medios porosos.

- totalBiomassGasificationFoam: Ejecutable para ver las pérdidas de biomasa en el tiempo, se utiliza en el posprocesamiento.

5.2.3. Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones que se llevan a cabo en el proceso de pirólisis están determinadas, y se presentan en Kwiatkowski et al., 2013 de una manera resumida y fácil de entender. Las consideraciones tomadas por los desarrolladores del solucionador son:

- La fase potencialmente líquida se considerará vapor.
- La humedad está incluida dentro de la estructura porosa, dicha humedad se evapora inmediatamente al salir de la biomasa.
- El gas fluye de acuerdo con la ley de Darcy para medios porosos.
- Se considera la transferencia de calor por radiación, de las paredes a la biomasa.
- El movimiento del medio poroso no es considerado.
- El medio poroso pierde masa por procesos homogéneos y heterogéneos.
- Las reacciones químicas y los procesos térmicos pueden llevar a un equilibrio no térmico, es decir que la temperatura de los gases no es la misma que la temperatura de la biomasa, lo que conlleva a dos ecuaciones de conservación de energía; una para estado sólido y otra para estado gaseoso.

Para la fase gaseosa se consideran: Ecuación de conservación del momento (Ec. 5.1), de continuidad (Ec. 5.2), de conservación de las especies (Ec. 5.3) y conservación de la energía (Ec. 5.4). Las especies son todos los elementos envueltos en el proceso, es decir, los gases generados CO, CO₂, H₂, CH₄ y vapor de agua, se denominan Y_i^G .

Para la fase sólida, las especies individuales de la biomasa residual: hemicelulosa, celulosa y lignina, además del carbono fijo y la ceniza, denominadas Y_k^S , utilizan las ecuaciones de la conservación de la masa sólida (Ec. 5.5) y la conservación de la energía (Ec. 5.6).

$$\frac{\partial \gamma \rho^G u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^G u u) + \nabla p - \nabla \cdot (\mu \nabla u) = (1 - \gamma) K \mu u \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial \gamma \rho^G}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^G u) = \sum_i (R_i^{G^{evap}} + R_i^{G^{piro}} + R_i^{G^{gasif}}) \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial \gamma \rho^G Y_i^G}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^G u Y_i^G) - \nabla \cdot (\rho^G D \nabla Y_i^G) = \omega_i^G + R_i^{G^{evap}} + R_i^{G^{piro}} + R_i^{G^{gasif}} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial \gamma \rho^G C_i^G T^G}{\partial t} + u \cdot (\nabla \rho^G C_i^G T^G) - \nabla \cdot ((1 - \gamma) k^G \nabla T^G) = \sum_i \omega_i^G h_{f_i}^G - \alpha \sum (T^G - T^S) - \Gamma + S^{G^{rad}} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho^S Y_k^S) = R_i^{G^{evap}} + R_k^{G^{piro}} + R_i^{G^{gasif}} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial \rho^S C_k^S T^S}{\partial t} - \nabla \cdot (\gamma k^S \nabla T^S) = \alpha \sum (T^G - T^S) + H_r + S^{S^{rad}} \quad (5.6)$$

Donde:

γ : Porosidad abierta

ρ : Densidad

u : Velocidad

μ : Viscosidad

p : Presión

R : Tasa de reacción

w : Tasa de reacción de combustión de la fase gaseosa.

C : Capacidad calorífica

T : Temperatura

k : Coeficiente de cambio de masa en la ecuación de Arrhenius.

h_f : Entalpia de formación

Γ : Energía necesaria para calentar la biomasa residual.

S : Radiación generada.

H_r : Fuente de calor por reacciones de los sólidos.

El subíndice i hace referencia al estado gaseoso, mientras que el subíndice k hace referencia al estado sólido. Los superíndices G y S hacen referencia al tipo de material a considerar en la ecuación, G para los gases, y S para los materiales sólidos.

Estas ecuaciones son resueltas para todo el dominio computacional, sin embargo, donde el campo de porosidades es igual a cero, los parámetros de la fase sólida como la densidad, o la conductividad térmica son cero.

Los procesos térmicos de la evaporación de la humedad, pirólisis de la biomasa, gasificación del carbón y la combustión se dan en la parte derecha de las ecuaciones 5.5 y 5.6. La masa y la energía son transferidas de la fase sólida a la fase gaseosa en la parte derecha de las ecuaciones 5.2-5.5.

La secuencia de procesos envueltos en la conversión térmica de la biomasa se presentan en la figura 5.3, en donde las soluciones para las reacciones (procesos térmicos) utilizan la fórmula de Arrhenius, como se muestra en la ecuación 5.7.

$$k = \begin{cases} A * \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), & T \leq T_c \\ 0, & T > T_c \end{cases} \quad (5.7)$$

Para los esquemas simplificados presentados en la figura 5.3, los cambios de masa por unidad de volumen debido a cambios térmicos se presentan como:

$$R_{vapor\ agua}^{G^{evap}} = \rho^s Y_{humedad}^S k^{evap} \quad (5.8)$$

$$R_{gas}^{G^{piro}} = \rho^s Y_{biomasa\ seca}^S k^{piro} \quad (5.9)$$

$$R_{biocarbon}^{G^{gasif}} = -\rho^s Y_{biocarbon}^S Y_{CO_2}^G k^{piro} \quad (5.10)$$

Se debe enfatizar que el esquema de pirólisis presentado en la figura 5.3 (b) es el más simple posible para el proceso de pirólisis, pero este solucionador emplea un análisis más complejo, el cual para evitar la carga de análisis matemático en este trabajo, se lo puede analizar en Kwiatkowski et al. (2013).

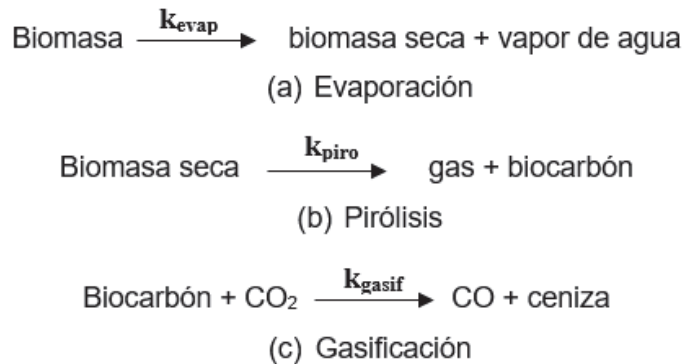


Figura 5.3. Secuencia de procesos en el proceso de conversión térmica de la biomasa (Fuente: propia, 2017)

Las reacciones (procesos térmicos) que ocurren en la fase sólida se las declara como en el siguiente ejemplo:

```
irreversibleSolidArrheniusHeterogeneousReaction
hem = 1.57 CH4 + 8.75 H2 + 5.73 CO + 9.72 CO2 + 0.118 char
(5.8e13 1.935e4 450 1 0.27)
```

La primera línea determina el modelo de la tasa de reacción, la segunda línea describe la reacción que ocurre en la conversión pirolítica, determinada experimentalmente por Yang et al., 2007. La tercera línea está compuesta de los parámetros de la reacción en el siguiente orden: factor pre-exponencial A, energía de activación E_a , temperatura crítica T_c , la orden de reacción n_r y el calor de la reacción h_r .

El proceso simulado, para este trabajo, consta solamente de la deshumidificación y la pirólisis de la biomasa residual, dejando de lado las funciones de gasificación y combustión incluidas en el solucionador. El solucionador tiene incluido un ejemplo utilizado para la validación del caso en donde el usuario puede configurar sus propias condiciones. La estructura de este caso se muestra en la figura 5.4:

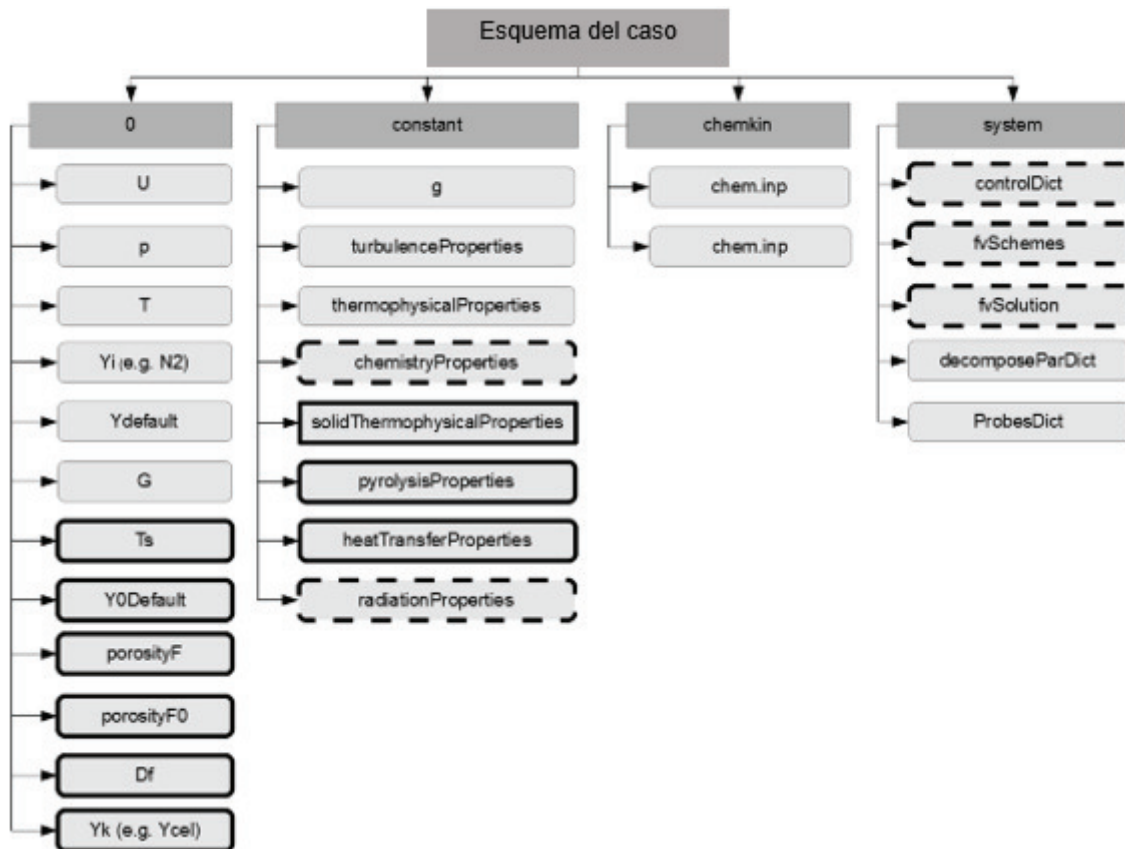


Figura 5.4. Estructura del caso a solucionar.
(Fuente: Kwiatkowski et al., 2013)

Este consta de 4 carpetas:

- 0: Define las condiciones de borde y las condiciones iniciales.
- Constant: Define las propiedades físicas, térmicas y reacciones químicas del proceso.

- Chemkin: Se utiliza como diccionario para definir los elementos en fase gaseosa y sus propiedades.
- System: Controla todos los parámetros para solucionar el proceso, como el tiempo, el tipo de ecuaciones a utilizar, solución en paralelo o serie, etc.

Los archivos presentes dentro de la carpeta 0 (cero) se definen como:

- U: Velocidad del gas de entrada, en su uso para gasificación y combustión, por lo que no influye en el análisis.
- p: Presión generada dentro del reactor.
- T: Temperatura inicial del reactor y se define con una tasa de calentamiento de 30 °C hasta que la biomasa alcance la temperatura determinada.
- Yi: Gases inertes dentro del reactor, en este caso es N₂.
- Ydefault, Y0Default y porosityF0: se utilizan como referencia para los cálculos de los porcentajes de la biomasa residual y el último para porosidad.
- G: Flujo de energía de radiación.
- Ts: Temperatura del sólido.
- porosityF: Puntos definidos por la función setPorosity.
- Df: Tensor de resistencia viscosa.
- Yk: Porcentaje de material presente dentro del reactor.

Los archivos presentes dentro de la carpeta constant se definen como:

- g: Define como la aceleración causada por la gravedad.
- turbulenceProperties: Define si existe flujo turbulento o laminar.
- thermophysicalProperties: Define las propiedades de los gases.
- ChemistryProperties: Define la manera de resolver las reacciones y algunas propiedades de los gases.
- solidThermophysicalProperties: Define los componentes sólidos y sus propiedades.
- pyrolysisProperties: Define el tipo de modelo de pirólisis a utilizar.
- heatTransferProperties: Define el modelo de transferencia de calor a utilizar.
- radiationProperties: Define el modelo de radiación a utilizar, aquí se asume un modelo de radiación, en el que la biomasa sólo absorbe radiación, más no la emite.

Los archivos presentes dentro de la carpeta sistem se definen como:

- controlDict: Archivo que controla los tiempos de resolución, también la frecuencia de escritura y el número de Courant entre otros.
- fvSchemes: Detalla de qué manera resolver las ecuaciones.
- fvSolution: Detalla el tipo de solucionador a utilizar en los parámetros, y determina el número de correcciones a realizar en los cálculos.
- decomposeParDict: Detalla el tipo y la configuración para solucionar el proceso en paralelo.
- probesDict: Detalla puntos dentro del reactor en donde se tendrá un análisis de celdas cercanas a ese punto, para todos los tiempos de escritura definidos.

Algunas de las características definidas para este caso de simulación difieren, ya que el análisis se realizó para madera, mientras que aquí se trabaja con biomasa residual. Haciendo una revisión bibliográfica se determinaron los valores a utilizar, los cuales, cabe recalcar y como se ha dicho a lo largo de este trabajo, tienen una gran variación dependiendo del estudio que se lleva a cabo, por lo que no existen valores fijos determinados para todas las propiedades a utilizar. Estos valores son mostrados en la tabla 5.2. Además, existe una transferencia de calor por la base y las paredes del reactor, con una tasa de calentamiento de 30 K/min, también se considera al equipo en dos dimensiones, por lo que se define una nueva condición de borde "fb" como empty (vacía).

Tabla 5.2. Propiedades físicas y constantes cinéticas de la biomasa residual usada en la simulación.

	Unidades	Humedad	Componentes Biomasa			BioC.	Ceniza
			Cel.	Hem.	Lig.		
Fracción de masa inicial	-	0,0010	0,9029	0,0755	0,0216	0	0,0460
Factor pre-exponencial	s ⁻¹	9,7×10 ⁸	2,1×10 ⁷	5,8×10 ¹³	1,06×10 ³	-	-
Energía de activación	J/mol	8,4×10 ³	1,34×10 ⁴	1,94×10 ⁴	8,95×10 ³	-	-
Temperatura crítica	K	300	450	450	500	-	-
Porcentaje de H ₂ O	kg/kg	1	0	0	0	-	-
Porcentaje de H ₂	kg/kg	0	0,02	0,02	0,05	-	-
Porcentaje de CO			0,37	0,21	0,28	-	-
Porcentaje de CH ₄	kg/kg	0	0,04	0,04	0,08	-	-
Porcentaje de CO ₂	kg/kg	0	0,38	0,55	0,40	-	-
Porcentaje de biocarbón	kg/kg	0	0,19	0,19	0,19	-	-
Entalpía de formación	J/kg	-2,26×10 ⁶	-17,1×10 ⁶	-8,5×10 ⁵	-9,2×10 ⁵	-2,12×10 ⁴	-12,4×10 ⁶
Propiedades del componente sólido							
Densidad absoluta	kg/m ³	1000	300			1957	2500
Fracción de vacío inicial	-	-	0,653			0,91	-
Conductividad Térmica	W/m·K	0,58	1,04*	0,34*	0,39*	0,10	-
Capacidad calorífica	J/kg·K	4200	2720			1100	840

* Valores consultados en Eitelberger & Hofstetter., 2011.

Fuente: (propia, 2017)

5.3. Comprobación del solucionador y resultados

Una vez establecidas todas las características se procede a realizar la comprobación del caso.

5.3.1. Comprobación

En la figura 5.5 se puede observar la comparación entre la pérdida de masa para este caso y para el ejemplo realizado en Kwiatkowski et al., en los resultados obtenidos en esta simulación, se observa como la masa disminuye rápidamente.

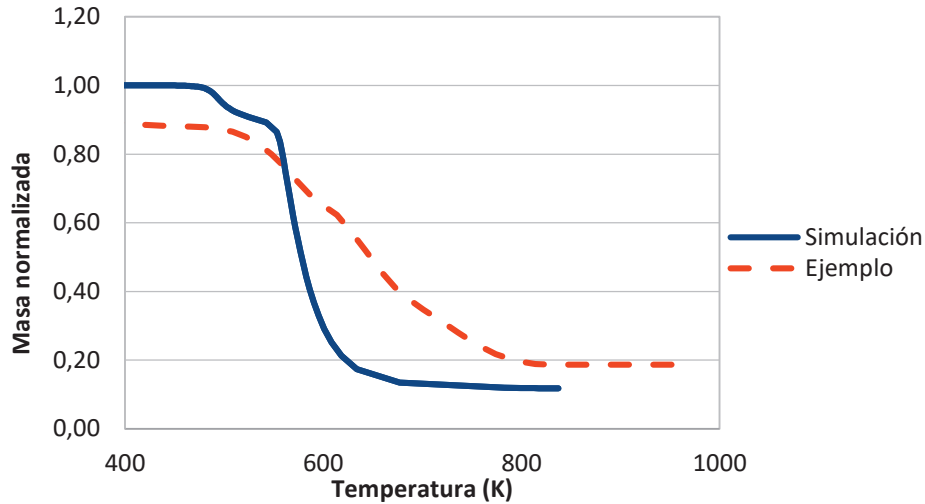


Figura 5.5. Comparación de la masa perdida por Kwiatkowski et al. y la simulación del presente trabajo.
(Fuente: Propia., 2017)

La figura 5.6 muestra la tasa de pérdida de masa correspondiente a cada compuesto presente, se puede observar subsecuentemente los procesos de evaporación, y pirólisis de hemicelulosa, celulosa y lignina presentadas en el trabajo de Kwiatkowski et al., 2013. En la simulación no se aprecia la fase de evaporación de este trabajo por la pequeña variación que esta presenta, pero esta se observa en la figura 5.8 b, en el análisis de densidades.

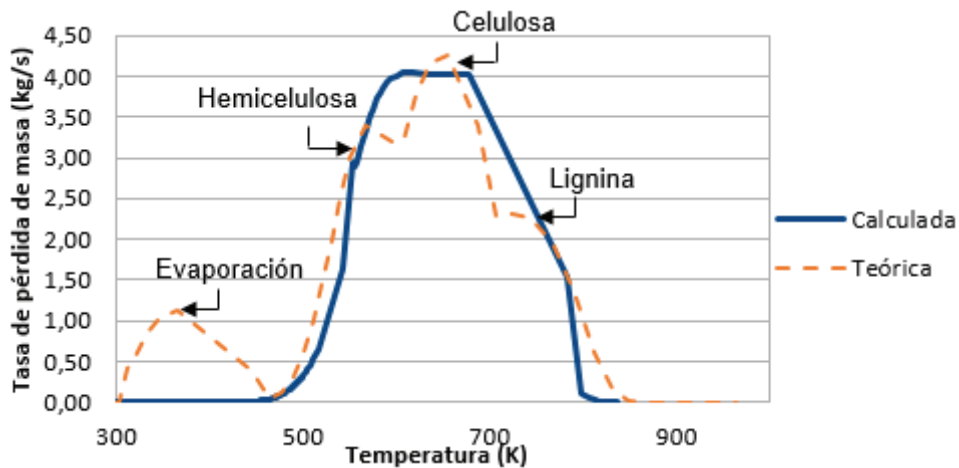


Figura 5.6. Comparación de la tasa de pérdida de masa.
(Fuente: Propia., 2017)

Alrededor de los 800 K todos los procesos se detienen y sólo queda biocarbón, el cual seguirá reaccionando a una menor tasa, pero este efecto no está dentro de la cinética de la pirólisis planteada.

Las propiedades de la celulosa, como por ejemplo la densidad (figura 5.7) influyen en las reacciones de la celulosa. Este fenómeno se lo puede verificar en la comparación del presente estudio con el realizado por Kwiatkowski et al., 2013, que utiliza una densidad de celulosa mayor.

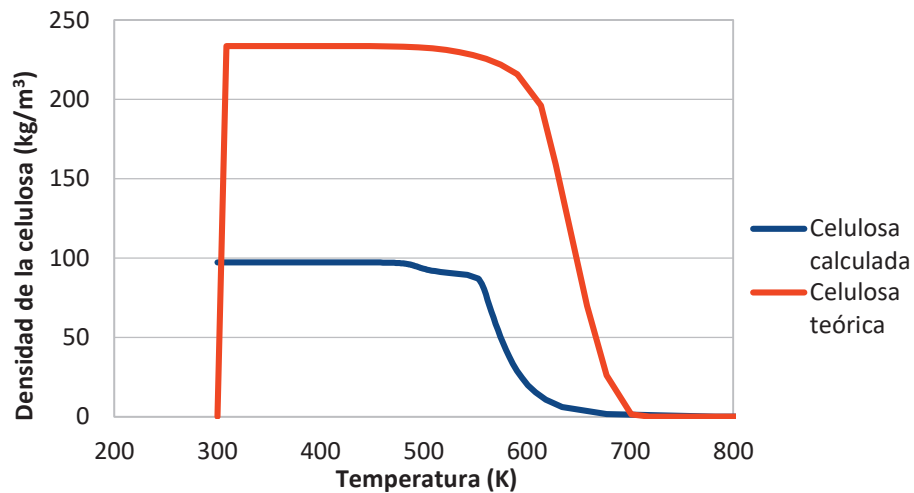
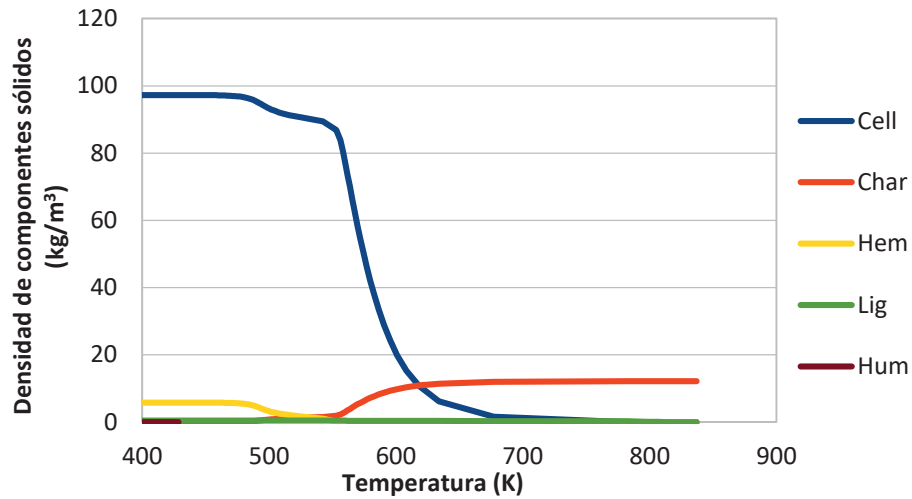
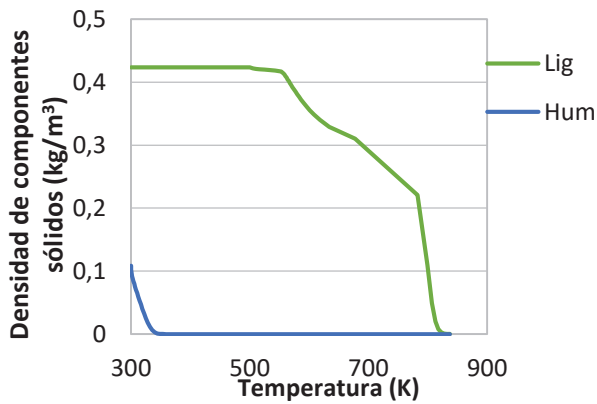


Figura 5.7. Comparación del cambio en la densidad de la celulosa en la simulación de este caso (azul) y en la simulación teórica (rojo).
(Fuente: Propia., 2017)

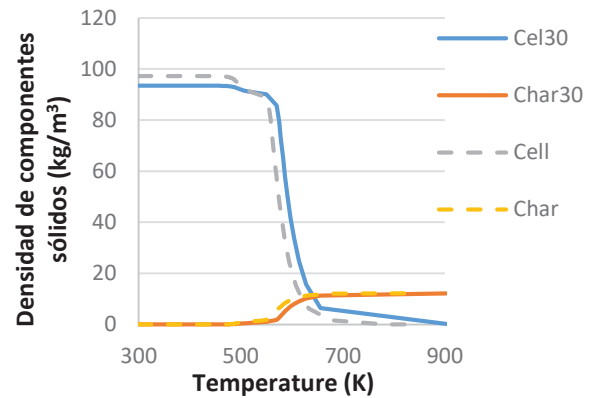
Las figuras 5.8 a y 5.8 b muestran como la densidad de la celulosa, hemicelulosa y lignina disminuyen mientras que la del biocarbón aumenta. En la figura 5.8 c se muestra que los componentes de la biomasa reaccionan a temperaturas más altas pero con un comportamiento semejante.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.8. a) Cambio en la densidad de los componentes sólidos. b) Acercamiento al cambio de densidad de la lignina y de la humedad. c) Comparación del comportamiento de la densidad a diferentes tasas de calentamiento, donde “cell” y “char” están a una tasa de 10 °C/min y “cel30” y “char30” están a una tasa de 30 °C/min.

(Fuente: Propia., 2017)

Para comprobar el análisis también se realizó el estudio en los cinco puntos mostrados en la figura 5.9, definidos como:

Etop: Esquina superior izquierda

Ebot: Esquina inferior derecha

Bl: Borde izquierdo

BD: Borde derecho

C: Centro

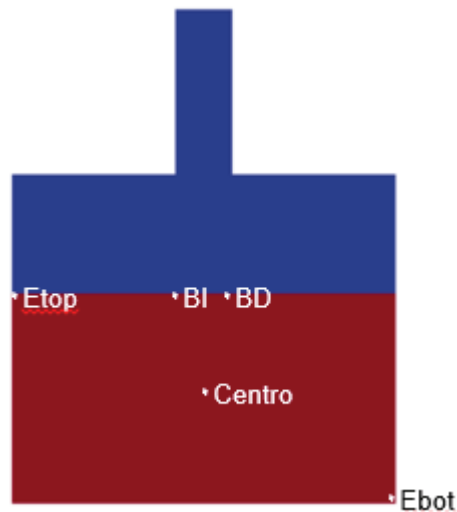


Figura 5.9. Puntos dentro del reactor.
(Fuente: Propia., 2017)

La figura 5.10 a muestra la variación de temperatura en diferentes puntos de análisis para el reactor definido.

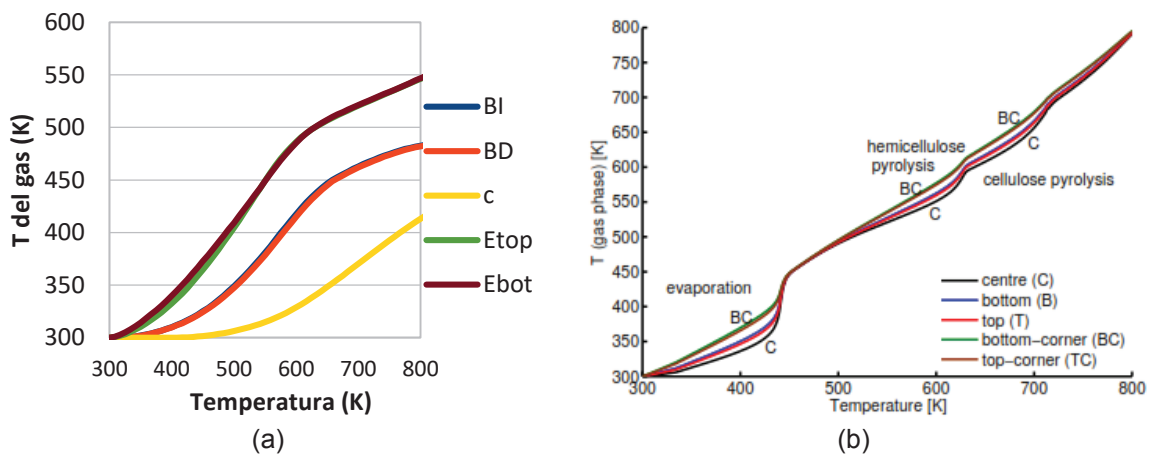


Figura 5.10. a) Temperatura del gas en diferentes puntos dentro de la biomasa residual. b) Temperatura del gas en diferentes puntos del sólido en la simulación teórica.
(Fuente: Propia., 2017 y Kwiatkowski et al., 2013)

En la figura 5.8, se observa el comportamiento que tiene la biomasa residual en función de la temperatura, se eligió hacer un cambio de temperatura inicial al ver que las reacciones pirolíticas empiezan alrededor de los 473 K. Esto ayuda a reducir notablemente el tiempo de modelación requerido para el análisis ya que se elimina el proceso de evaporación y se estabiliza de mejor manera la temperatura de la biomasa, esto no quiere decir que se dejará de lado el análisis de la tasa de calentamiento ya que como se menciona en el capítulo 2, se necesita llegar a temperaturas de 673, 773 y 873 K.

5.3.2. Resultados

Para medir el cambio de masa (transición de biomasa residual a biocarbón) en 30 minutos, se hizo uso de la herramienta “totalMass” incluida en el solucionador el cual muestra el porcentaje de biocarbón generado en cada caso, estos valores se observan en la figura 5.11:

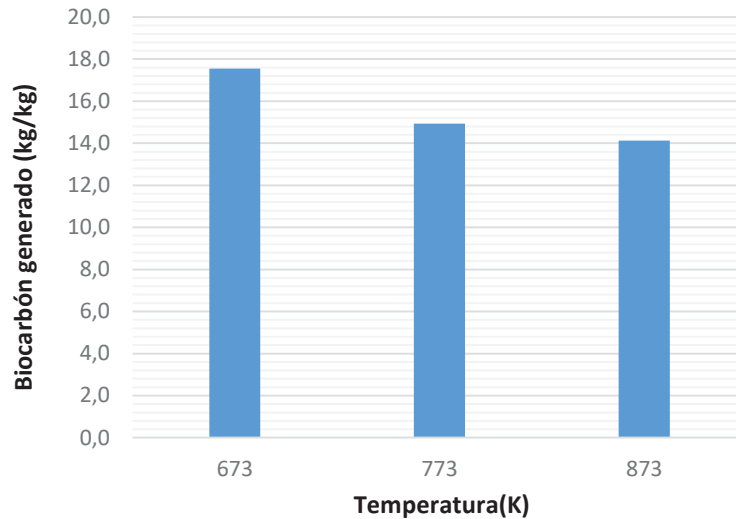


Figura 5.11. Porcentaje de biocarbón generado a diferentes temperaturas para 30 minutos. (Fuente: Propia., 2017)

Se puede observar que la generación de biocarbón disminuye al aumentar la temperatura de trabajo, y que la máxima generación se obtuvo a los 673 K o 400 °C. Este valor se toma en cuenta al dimensionar el equipo, para que se cumplan las condiciones del capítulo 4.

La figura 5.12 muestra la fracción másica de los gases obtenidos para una temperatura de 673 K. Estos valores no influyen en la cantidad de aire que se encuentra dentro del reactor.

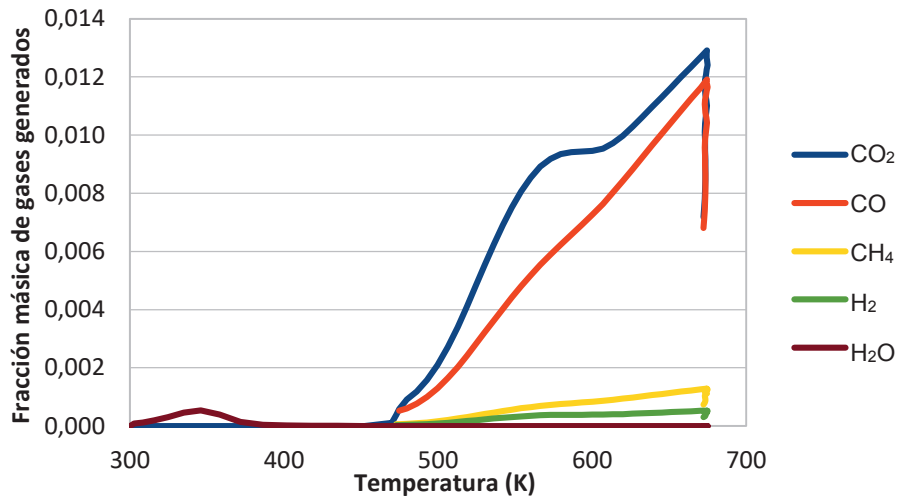


Figura 5.12. Fracción másica de los gases generados.
(Fuente: Propia., 2017)

Como se puede apreciar en la figura 5.12, el gas que se genera en mayor cantidad es el CO₂, con éste se realiza una comparación de la fracción másica obtenida a las diferentes temperaturas planteadas en la figura 5.13.

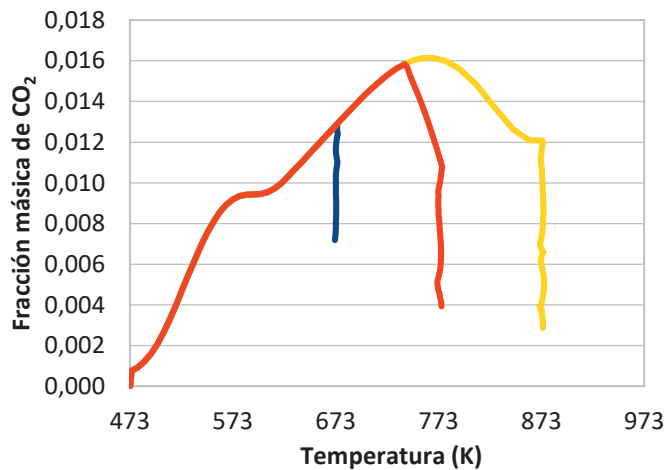


Figura 5.13. Fracción másica de CO₂ a diferentes temperaturas.
(Fuente: Propia., 2017)

La figura 5.14 a muestra cómo se distribuye la temperatura alrededor del reactor, y la figura 5.14 b muestra la pirólisis de la biomasa residual generando CO₂ cuando la temperatura se estabiliza en 673 K.

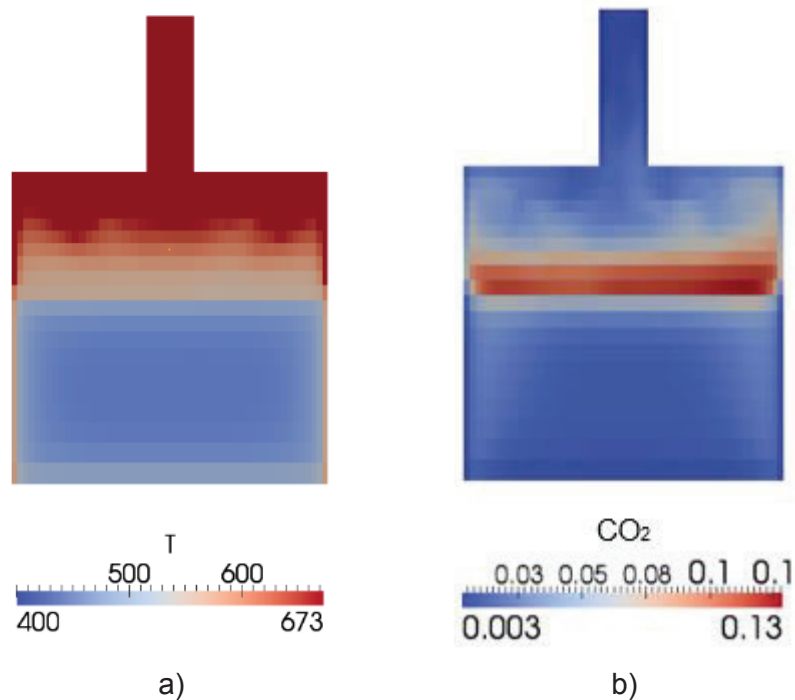


Figura 5.14. a) Distribución de temperatura en el reactor. b) Generación de CO₂ a una temperatura de 673 K.
(Fuente: Propia., 2017)

5.4. Discusión

En la figura 5.5 se observa un cambio más rápido en la biomasa de la simulación, esto ocurre porque la biomasa residual es más volátil que la biomasa de la madera, debido a que las propiedades del compuesto se reducen. Por ejemplo el coeficiente de conductividad térmica de la madera analizada por Kwiatkowski et al, tiene un valor de 10 W/m K, mientras que para la biomasa residual se tienen valores de 1,04, 0,34, y 0,39 W/m K para la celulosa, hemicelulosa y lignina respectivamente, según Eitelberger y Hofstetter., 2011.

En la figura 5.6, para la simulación calculada, se observa la baja concentración de la hemicelulosa y la lignina respecto a la alta concentración de la celulosa, como se esperaba con las condiciones iniciales determinadas con la bibliografía al principio de este capítulo (Matsakas et al., 2014, Sanner et al., 1970, Buah et al., 2007, Ok y Uchimiya, 2015), esto se aprecia por el área que ocupan cada una de los compuestos en la figura, donde la hemicelulosa ocupa un 7,6 % del área total, la celulosa ocupa un 91 % y la lignina que es apenas distinguible presenta un porcentaje del área de 1,4 %. Además, como muestran Miller y Bella., 1997, las tasas de cambio máximas para la pirólisis de celulosa se da alrededor de los 640 K, para hemicelulosa a los 565 K y 720 K para la lignina. Estos valores concuerdan con la tasa de pérdida de masa, comprobando

así que los valores de temperatura y de porcentaje de masa perdida obtenidos, con el programa, para los tres materiales son aproximados a los encontrados en bibliografía.

La figura 5.7 muestra, al igual que la figura 5.5, como los cambios en las propiedades de la biomasa modifican el comportamiento de la misma, razón por la cuál las reacciones se dan a una temperatura menor, pero las curvas tienen una tendencia similar, ya que en los dos casos se analiza celulosa.

En la figura 5.8 se comprueba que las curvas de cambio de densidad de los componentes de la biomasa, tienen el mismo comportamiento (tendencia) que en la investigación realizada por Kwiatkowski et al., ya que estos presentan las mismas características. Además, cuando se trabaja a tasas más elevadas de cambio de temperatura, los componentes de la biomasa, como la celulosa, reaccionan a temperaturas mayores, esto se da porque se alcanzó más temperatura en el mismo intervalo de tiempo en el que la densidad esta cambiando.

La figura 5.10 a muestra la variación de temperatura en diferentes puntos de análisis para el reactor definido, como se puede ver; Etop y Ebot presentan la misma variación en la temperatura ya que su análisis se encuentra al borde de las paredes, luego para BI y BD se tiene una disminución en la temperatura del gas, esto se da porque el reactor es suficientemente grande como para que existan diferentes temperaturas en distintos puntos internos, pero como se aprecia es una variación simétrica ya que estos dos puntos varían en la misma proporción. El último punto, en el centro de la biomasa residual del reactor, presenta una variación de temperatura mucho más baja, esto influirá en el tiempo de pirólisis, y es una de las principales desventajas del reactor estático. En la figura 5.10 b se observa la misma variación pero a menor escala, ya que en Kwiatkowski et al. 2013 se trabajó con un cubo de 20 mm de lado, en relación con los 400 mm de espesor y 260 mm de altura de la biomasa residual utilizada para el presente caso, el tamaño y forma de la partícula se definió como tubos cilíndricos colocados de forma paralela, representada en el solucionador biomassGasificationFoam.

En la figura 5.11 se obtuvo una mayor cantidad de biocarbón con la menor temperatura analizada, de 673 K; mostrando que se obtiene mayor cantidad de biocarbón a menor temperatura, como en Chen et al., 2015, que es una recopilación de estudios realizados sobre la pirolización de residuos sólidos municipales, donde las tasas de generación de biocarbón disminuyen conforme se aumenta la temperatura y el tiempo de permanencia

de la biomasa, esto se da porque a mayor temperatura tengo mayor cantidad de sólidos volatilizados (Agarwal, 2014).

En la figura 5.12 se observa el porqué de empezar la simulación a una temperatura de 473 K, ya que la única reacción que ocurre antes de dicha temperatura es la evaporación de H₂O. La cantidad de H₂O evaporada es muy baja comparada con Kwiatkowski et al., 2013, esto se debe principalmente a que se asume una biomasa con un porcentaje de humedad muy bajo (0,1 % en peso para esta simulación, 7 % en peso para Kwiatkowski et al.).

Después del análisis de las figuras 5.11 y 5.12 se pudieron determinar las cantidades generadas de cada compuesto después de 30 minutos; de biocarbón se obtuvo 17,5 %, de biogás un 11 % y de bioaceite un 71,5 %. Al comparar estos valores con los valores referenciados en Chen et al., 2015, se observa una variación de resultados en todos los estudios referenciados, esto se debe a: la diferencia en la composición de la biomasa residual, a sustancias adicionales que se pueden añadir a la pirólisis como dolomita calcinada (para mejorar la eficiencia) (Yi, 2007), la tasa de calentamiento, la temperatura de operación, el tipo de reactor, entre otros. La tendencia es que se obtenga un mayor porcentaje de bioaceite, si se incrementa la temperatura de operación se incrementa la concentración de gas y si se disminuye la temperatura incrementa el porcentaje de biocarbón.

Por el alto contenido de bioaceites se debe buscar alternativas para el aprovechamiento de esta sustancia, el problema reside en la composición química compleja de los bioaceites generados. (Chen et al., 2015). Además, la mayoría de estudios con residuos sólidos municipales no separan la materia orgánica de fácil degradación de la de difícil degradación es decir se usa una mezcla de biomasa con materiales plásticos, ropa o papel, lo que influye en la composición de los productos de la pirólisis, obteniendo una mejor eficiencia de generación de biocarbón, pero este biocarbón puede contener material tóxico, por lo que debe recibir un tratamiento posterior para ser utilizado. Lo mismo puede suceder con los gases y bioaceite producidos, esto implicaría el uso de materiales dentro o fuera del equipo para que se cumpla con la normativa ambiental (Chen et al., 2015), esto se vería reflejado en un incremento en los costos del equipo.

La fracción másica de los gases en las figuras 5.12 y 5.13 no llegan a cero ya que el biocarbón todavía sigue generando gases y transformándose en ceniza. Esto genera un cambio en la cantidad de biocarbón obtenido (Agarwal, 2014), pero no existe un análisis

detallado de como cambiaría la estructura o las propiedades del biocarbón por este fenómeno, como ya se ha dicho, esto se debe a la enorme variación en las propiedades y en la composición que presenta la biomasa, y a la dificultad de este tipo de análisis.

En las figuras 5.12 y 5.13 también se puede apreciar el momento en el que la tasa de calentamiento se detiene para tener una temperatura constante, y se presenta como una línea recta vertical en la que la fracción másica de gases generada disminuye con el tiempo debido a que la biomasa residual empieza a reducir su generación de gas. De aquí se puede decir que la generación de gases se correlaciona directamente con la temperatura, con el tiempo de permanencia y con la cantidad, composición y disposición de biomasa presente.

La distribución de temperatura se representa en la figura 5.14, se observa como las temperaturas más bajas de la sección vacía del reactor están en relación directa con la sección en donde está presente el CO₂, esto se da porque la temperatura del CO₂ es menor a la temperatura en las paredes del reactor, pero mientras sube por la tubería del reactor, alcanza la misma temperatura por lo que la sección de la tubería presenta una temperatura homogénea.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Para obtener una mayor generación de biocarbón a partir de biomasa residual, es más conveniente realizar el proceso de pirólisis a una temperatura de 673 K, esto se debe a que las reacciones pirolíticas en la biomasa residual se producen alrededor esta temperatura. También a esta temperatura muy poca biomasa se convierte en ceniza, evitando que las características del biocarbón generado se degraden.
- La tasa de calentamiento es función del tamaño y tipo (composición) de partícula y de la distribución del material a pirolizar. La tasa de calentamiento para la simulación fue de 30 °C/min con la que se obtuvo 17,5 % de biocarbón.
- Para mejorar la eficiencia en el proceso de obtención de biocarbón a partir de biomasa residual, empleando una elevada tasa de calentamiento se necesita un reactor rotatorio, para así mejorar la transferencia de calor y que la temperatura a la que está expuesta toda la biomasa sea lo más cercana posible en diferentes puntos. Otra opción es disminuir la tasa de calentamiento en un reactor estático, esto minimiza la generación de ceniza.
- La obtención de biocarbón a partir de biomasa residual presenta una mayor eficiencia en términos operativos y económicos si se utiliza biomasa con porcentajes de humedad muy bajos, debido a que; la manipulación de residuos con bajo contenido de agua es más sencilla en el proceso, disminuye la generación de olores; y, siendo la más importante, la reducción del tiempo de pirólisis que implica menores costos en el proceso y lo vuelve más amigable con el ambiente al utilizar menor cantidad de GLP.
- Al determinar los parámetros óptimos de operación (incremento en la generación de biocarbón), se diseñó el pirolizador, el mismo que tiene las siguientes dimensiones: carcaza de 0,9 m de altura por 0,52 m de diámetro, y un reactor interno de 0,4 m de alto y 0,4 m de diámetro. El equipo tiene la capacidad para procesar 10000 gramos de biomasa residual y cuenta con los componentes necesarios para obtener los productos generados por el proceso de pirólisis en 45 minutos.

- La eficiencia del proceso de calentamiento del equipo muestra un porcentaje de pérdidas de 8,2 %, que presenta una temperatura superficial de 89 °C, estos parámetros son los óptimos ya que no existe sobredimensionamiento ni sobrepeso.
- Al realizar la simulación del proceso de pirólisis en el equipo mencionado, se determinó que la composición del producto obtenido fue: 17,5% de biocarbón, 11 % de biogás y 71,5 % de bioaceite.
- La efectividad en el proceso de separación del biogás y del bioaceite, está dentro de los rangos admisibles para intercambiadores de calor de flujo paralelo, para una longitud de 0,3 m es del 51 %.

6.2. Recomendaciones

- Investigar sobre la influencia de otros tamaños y formas de partículas (esférica, prismática o plana), en el proceso de generación de biocarbón, haciendo uso del programa utilizado en esta investigación.
- Configurar el solucionador para versiones más actuales de OpenFOAM ya que se han mejorado muchas de sus características. Además, también se podrían añadir formas de análisis más complejas de las reacciones de pirólisis o gasificación, y también se pueden implementar mejoras como un análisis dinámico de partículas, que ayudarían a realizar simulaciones mucho más detalladas y precisas del proceso de pirólisis.
- Se recomienda simular el proceso con diferentes tasas de calentamiento y para diferentes temperaturas para determinar si se obtiene una mejor tasa de generación de biocarbón.
- Realizar un análisis detallado de las propiedades térmicas, físicas y químicas de la biomasa residual local para obtener resultados mucho más acordes a cómo se comportaría dicha biomasa en la reacción pirolítica.
- Se debe analizar los diámetros de las tuberías de desfogue de los gases generados y calcular la presión interna del pirolizador con la que se debe analizar el espesor de las paredes del reactor.

- Realizar una simulación de la parte térmica, es decir, del aporte de calor al equipo, para validar los resultados obtenidos de la cantidad de masa necesaria para calentar el sistema.
- Analizar el uso de doble tipo de aislante para disminuir el peso y reducir las pérdidas de calor en el pirolizador. Por ejemplo, un espesor pequeño de refractario conjuntamente con una capa de lana de vidrio, poliuretano o simplemente una cámara vacía. En este caso se debe tomar en cuenta la recomendación anterior ya que en el diseño actual el material refractario rigidiza al reactor.
- Realizar el análisis de un sistema de control de temperatura, para incluirlo en el reactor, de forma que se pueda controlar la tasa de calentamiento y de temperatura.

Bibliografía

- [1] 26-1., C. I.-N.-S.-I. (2014). Capítulo 11: instalaciones de gases combustibles para uso residencial, comercial e industrial. Requisitos.
- [2] Abel, B., & Guerra, Y. (2009). Procesos de pirólisis y gasificación de los residuos de toronja (1st ed.).
- [3] Agarwal, M. (2014). An investigation on the pyrolysis of municipal solid waste.
- [4] Ahmad, M., Rajapaksha, A., Lim, J., & Ok, Y. (2013). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review.
- [5] Andrade, L., & Rodriguez, H. (2009). Diseño de una máquina secadora de hojas aromáticas. Quito.
- [6] Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619-1640.
- [7] Antal, M. J., Mochizuki, K., & Paredes, L. S. (2003). Flash Carbonization of Biomass. *Ind. Eng. Chem. Res*, 42, 3690-3699.
- [8] Avantaggiato, G., Havenaar, R., & Viscontia, A. (2003). Assessing the zearalenonebinding activity of adsorbent materials during passage through a dynamic in vitro gastrointestinal model. *Food and Chemical Toxicology*: 1283-1290.
- [9] Brewer, C. E. (2012). Biochar characterization and engineering. Iowa. Iowa.
- [10] Buah, W. K., Cunliffe, A. M., & Williams, P. T. (2007). Characterization of products from the pyrolysis of municipal solid waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 85(5), 450-457.
- [11] Budynas, R. G., Nisbett, J. K., & Murrieta Murrieta, J. E. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (9na Ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- [12] Bukhmirov, V. V., Kolibaba, O. B., & Gabitov, R. N. (2015). Experimental research of solid waste drying in the process of thermal processing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 93, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.

- [13] Campus sostenible. (18 de Febrero de 2017). Obtenido de Biomasa: <http://www.um.es/web/campussostenible/ambiental/energia/energias-renovables/biomasa>
- [14] Cengel, Y., & Ghajar, A. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Editorial: Editorial McGraw–Hill.
- [15] Chandrappa, R., & Brown, J. (2012). *Solid waste management: Principles and practice*. Springer Science & Business Media.
- [16] Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2015). Reprint of: pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. *Waste management*, 37, 116-136.
- [17] Demirbas, A. (2007). Progress and recent trends in biofuels. *Progress in energy and combustion science*, 33(1), 1-18.
- [18] Duku, M. H., Gu, S., & Hagan, E. B. (2011). Biochar production potential in Ghana—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3539-3551.
- [19] Eitelberger, J., & Hofstetter, K. (2011). Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point—A multiscale homogenization approach and its experimental validation: Part I: Thermal conductivity. *Composites science and technology*, 71.
- [20] Fernández, J. (2016). *Energía de la biomasa: tipos de biomasa y su aprovechamiento energético*.
- [21] García, A., Font, R., & Marcilla, A. (1991). *Kinetic studies of the primary pyrolysis of municipal solid waste in a Pyroprobe 1000 (1st ed.)*. Alicante.
- [22] García, H. (2011). *Modelación de la gasificación de la biomasa en un reactor de lecho fijo*. Bogotá.
- [23] Gere, J., & Timoshenko, S. (2004). *Mecánica de materiales*. Editorial Iberoamericana. 6ª ed.
- [24] Granatstein, D., Kruger, C., Collins, H., Garcia, M., & Yoder, J. (2009). *Use of biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment*. Center

for Sustaining Agric. Nat. Res. Washington State University, Wenatchee, WA. WSDA Intera.

- [25] Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: a global review of solid waste management. Urban development series knowledge papers, 15, 1-98.
- [26] Jaramillo, A., & Narváez, E. (2012). Diseño y construcción de un secador de grano por fluidización e implementación del control de flujo y temperatura. Quito.
- [27] Karhu, K., Mattila, T., Bergstrom, I., & Regina, K. (2011). Biochar Addition to Agricultural Soil Increased CH₄ Uptake and Water Holding Capacity – Results from a Short-Term Pilot Field Study.
- [28] Kimetu, J., & Lehmann, J. (2010). Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents.
- [29] Koraiem, M., Hegazy, A., Koura, N., & Dahab, O. (2015). Characteristics of LGP turbulent diffusion flame behind circular plate stabilizers.
- [30] Kwiatkowski, K., Zuk, P., Bajer, K., & Dudynski, M. (2013). Biomass gasification solver based on OpenFOAM.
- [31] Laid, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Douglas, K. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil.
- [32] Lehmann, J. S. (2011). Biochar for environmental management: science, technology and implementation.
- [33] Liliedahl, T., & Sjöström, K. (1998). Heat transfer controlled pyrolysis kinetics of a biomass slab, rod or sphere. Biomass and Bioenergy, 15(6), 503-509.
- [34] Lu, H., Ip, E., Scott, J., Foster, P., Vickers, M., & Baxter, L. L. (2010). Effects of particle shape and size on devolatilization of biomass particle. Fuel, 89(5), 1156-1168.
- [35] Major, J. (2010). Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems.

- [36] Matsakas, L., Kekos, D., Loizidou, M., & Christakopoulos, P. (2014). Utilization of household food waste for the production of ethanol at high dry material content. *Biotechnology for biofuels*, 7(1), 4.
- [37] McMichael, C. H., Palace, M. W., Bush, M. B., Braswell, B., Hagen, S., Neves, E. G., & Czarnecki, C. (2014). Predicting pre-Columbian anthropogenic soils in Amazonia. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*.
- [38] Miller, R. S., & Bellan, J. (1997). A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics. *Combustion science and technology*, 126(1-6), 97-137.
- [39] Mohan, D., Rajput, S., Singh, V., Steele, P., & Pittman, C. (2011). Modeling and evaluation of chromium remediation from water using low cost bio-char, a green adsorbent.
- [40] Ok, Y. U. (s.f.). *Biochar: Production, Characterization, and Applications* (1st ed.). 2015.
- [41] Reed, R. J. (1986). *North American Combustion Handbook*.
- [42] Reid, R., Poling, B., & Prausnitz, J. (1987). *The Properties of Gases and Liquids*. Fourth Edition. McGraw-Hill.
- [43] Rico, J. (2007). *Energía de la biomasa* (1st ed.). Madrid.
- [44] Saastamoinen, J. J. (2006). Simplified model for calculation of devolatilization in fluidized beds. *Fuel*, 85(17), 2388-2395.
- [45] Sanner, W. S., Wolfson, D. E., Walters, J. G., & Ortuglio, C. (1970). Conversion of municipal and industrial refuse into useful materials by pyrolysis. [Washington, D.C.]: U.S. Dept. of Interior, Bureau of Mines.
- [46] Sarkar, A., & Wassgren, C. (2010). Continuous blending of cohesive granular material. *Chemical Engineering Science*, 65(21), 5687-5698.
- [47] Şensöz, S., Angın, D., & Yorgun, S. (2000). Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (*Brassica napus* L.): fuel properties of bio-oil. *Biomass and Bioenergy*, 19(4), 271-279.

- [48] Shackley, S., & Sohi, S. (2010). An assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil. Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK Government, London.
- [49] Srinivasarao, C., Gopinath, K. A., Venkatesh, G., Dubey, A. K., Wakudkar, H., & Purakayastha, T. (2013). Use of biochar for soil health management and greenhouse gas mitigation in India: Potential and constraints.
- [50] Staub, M., Galietti, B., Oxarango, L., Khire, M. V., & Gourc, J. P. (2009). Porosity and hydraulic conductivity of MSW using laboratory-scale tests. In Proceedings of the 3rd International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills.
- [51] Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill.
- [52] Thomsen, T., Hauggaard-Nielsen, H., Bruun, E., & Ahrenfeldt, J. (2011). The potential of pyrolysis technology in climate change mitigation. National Laboratory for Sustainable energy. Technical University of Denmark.
- [53] Urien, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual.
- [54] Waste Atlas - Interactive map with visualized waste management data. (26 de Octubre de 2017). Obtenido de Atlas.d-waste.com.: <http://www.atlas.d-waste.com/>
- [55] Yagi, S., & Wakao, N. (1959). Heat and Mass Transfer from Wall to Fluid in Packed Beds. En: AIChE Journal 5 .
- [56] Yan, W., Zhou, H., Jiang, Z., Lou, C., Zhang, X., & Chen, D. (2013). Experiments on measurement of temperature and emissivity of municipal solid waste (MSW) combustion by spectral analysis and image processing in visible spectrum. Energy & Fuels, 27(11).
- [57] Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel, 86(12), 1781-1788.
- [58] Yi, R. (2007). An Experimental Research on Catalytic Pyrolysis of Municipal Solid Waste. Master thesis, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan.

- [59] Zhang, X., Wang, H., He, L., & Huang, H. (2013). Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants.

ANEXOS

ANEXO I. Especificaciones y dimensiones de equipos trituradores de basura.

in sink erator[®]

Evolution Series[®]

Grind More. Hear Less.[®]



Dimensions



* Add 1/2" when stainless steel sinks are used.

Job Specifications

Food Waste Disposers

Evolution Essential[®] XTR

With SinkTop Switch[™] Activation Included

Submittal Sheet

The ideal choice for a wide range of applications.

- SoundSeal[®] technology delivers quieter performance. Hold a conversation with elevated voices in the same room.
- MultiGrind[®] technology delivers 2 stages of grind vs. 1 stage in standard disposer.
- Includes Quiet Collar[®] sound reducing sink baffle.
- Includes SinkTop Switch accessory with Satin Nickel button and power cord for easy disposer activation.

Specifications

Type of Feed	Continuous
On/Off Control	SinkTop Switch [™]
Motor	Single Phase
HP	3/4
Volts	120
HZ	60
RPM	1725
Amp. (Avg. Load)	8.1
Time Rating	Intermittent
Lubrication	Permanently Lubricated Upper & Lower Bearings
Shipping Weight (Approx.)	20.0 lbs.
Unit Finish	Black Enamel Gray
Overall Height	12-1/4"
SoundSeal Technology	Anti-Vibration Mount [®] Anti-Vibration Tailpipe Mount [™] Quiet Collar [®] Sink Baffle SoundLimiter [®] Insulation
MultiGrind Technology	GrindShear Ring [®]
Grind Chamber Capacity	34.6 oz.
Motor Protection	Manual Reset Overload
Average Water Usage	Approx. 1 Gallon Per Person Per Day
Average Electrical Usage	3-4 KWh Per Year
Drain Connection	1-1/2" Anti-Vibration (Hose Clamp)
Dishwasher Drain Connection	Yes

Sample Specification

Food Waste Disposer(s) shall be InSinkErator Model Evolution Essential[®] XTR with MultiGrind[®] and SoundSeal[®] technologies, 3/4 HP motor, Stainless Steel Grind components, SinkTop Switch[™] accessory and power cord accessory.

Warranty:
6-Year parts and in-home service.

* The complete InSinkErator warranty is included in the Care & Use Booklet packed with each unit.



Food waste disposers can provide an environmentally responsible alternative to transporting food waste to landfills. And they can help reduce greenhouse gas emissions. At capable wastewater treatment plants, food waste can be recycled to produce renewable energy. Additionally, capable wastewater treatment plants can process food waste into fertilizer. (Check the plant in your area.)

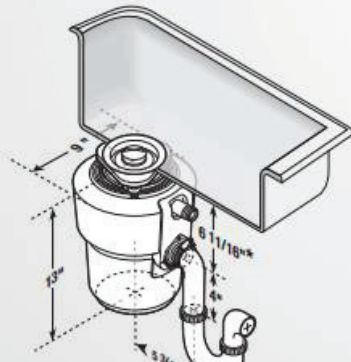
Figura I.1. Especificaciones triturador de basura insinkerator Evolution Essential XTR.

Fuente: (insinkerator, 2017)

in **sink** erator[®]
Evolution Series[®]
 Grind More. Hear Less.[®]



Dimensions



* Add 1/2" when stainless steel sinks are used.

Job Specifications

Food Waste Disposers

Evolution Excel[®]

Ultimate performing food waste disposer.

Submittal Sheet

The ultimate in disposer performance. Nothing grinds more with less noise.

- SoundSeal[®] technology delivers ultra-quiet performance. Hold a conversation with normal voices in the same room.
- MultiGrind[®] technology delivers 3 stages of grind vs. 1 stage in standard disposer.
- Features exclusive Jam-Sensor[®] Circuit that increases motor torque 500% to automatically break through the toughest jams.
- Includes Quiet Collar[®] sound reducing sink baffle.

Sample Specification

Food Waste Disposer(s) shall be InSinkErator Model Evolution Excel[®] with MultiGrind[®] and SoundSeal[®] technologies, 1.0 HP motor, Auto-Reverse Grind System[®], Stainless Steel Grind Chamber and components.

Warranty:
 7-Year parts and in-home service.

* The complete InSinkErator warranty is included in the Care & Use Booklet packed with each unit.

Specifications

Type of Feed	Continuous
On/Off Control	Wall Switch
Motor	Single Phase
HP	1.0
Volts	120
Reversing	Auto-Reverse Grind System [®] feature
HZ	60
RPM	1725
Amp. (Avg. Load)	10.2
Time Rating	Intermittent
Lubrication	Permanently Lubricated Upper & Lower Bearings
Shipping Weight (Approx.)	23.0 lbs.
Unit Finish	Stainless Steel Light Gray
Overall Height	13"
SoundSeal Plus Technology	Anti-Vibration Mount [®] Anti-Vibration Tailpipe Mount [™] Quiet Collar [®] Sink Baffle Multi-Layer SoundLimiter [™] Insulation
MultiGrind Plus Technology	GrindShear Ring [®] Tri-Action Lug [®] System feature Undercutter Disk [®] Jam-Sensor [®] Circuit
Grind Chamber Capacity	40 oz.
Motor Protection	Manual Reset Overload
Average Water Usage	Approx. 1 Gallon Per Person Per Day
Average Electrical Usage	3-4 KWh Per Year
Drain Connection	1-1/2" Anti-Vibration (Hose Clamp)
Dishwasher Drain Connection	Yes



Food waste disposers can provide an environmentally responsible alternative to transporting food waste to landfills. And they can help reduce greenhouse gas emissions. At capable wastewater treatment plants, food waste can be recycled to produce renewable energy. Additionally, capable wastewater treatment plants can process food waste into fertilizer. (Check the plant in your area.)

Figura I.2. Especificaciones triturador de basura insinkerator Evolution Excel.
 Fuente: (insinkerator, 2017)

What is a model number, and where do I find it?

Shop Parts ▾ Repair Help ▾ Enter model or part number for b

[Clear All](#)

◀ [BACK TO PREVIOUS PAGE](#)

Insinkerator Garbage Disposer Shredding Plate 71022

RepairClinic Item #815719 | Insink OEM Part #71022



Grid is 1 inch square

Grinding Disc with Blades

Order by 3:00 PM ET and choose FedEx 2Day or FedEx Overnight shipping, this part ships **TODAY!**

Shop with Confidence: [365-Day Return Policy](#)

Repair Skill Level:

\$46.15

IN STOCK

★★★★☆

3 Reviews

QTY:

[Add to Cart](#)

Have a question? We can help! Call us 1-800-269-2609

Figura I.3. Conjunto placa base con impulsores.
Fuente: (Repairclinic, 2017)

Physical Properties	Metric	English
Density	7.845 g/cc	0.2834 lb/in ³

Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	201	201
Hardness, Knoop	223	223
Hardness, Rockwell B	93	93
Hardness, Rockwell C	13	13
Hardness, Vickers	211	211
Tensile Strength, Ultimate	620 MPa	89900 psi
Tensile Strength, Yield	415 MPa	60200 psi
Elongation at Break	25 %	25 %
Reduction of Area	50 %	50 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi
Poissons Ratio	0.29	0.29
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi
Izod Impact	45.0 J	33.2 ft-lb
	49.0 J	36.1 ft-lb
	65.0 J	47.9 ft-lb

Figura I.4. Propiedades del acero inoxidable AISI 1040 as rolled.
Fuente: (matweb, 2017)

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S _{utr} kpsi	S _{utr} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Figura I.5. Factor de modificación de la condición superficial.
Fuente: (Budynas et al, 2012)

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Figura I.6. Factor de modificación de la temperatura.
Fuente: (Budynas et al, 2012)

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_0	Factor de confiabilidad k_c
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Figura I.7. Factor de confiabilidad.
Fuente: (Budynas et al, 2012)

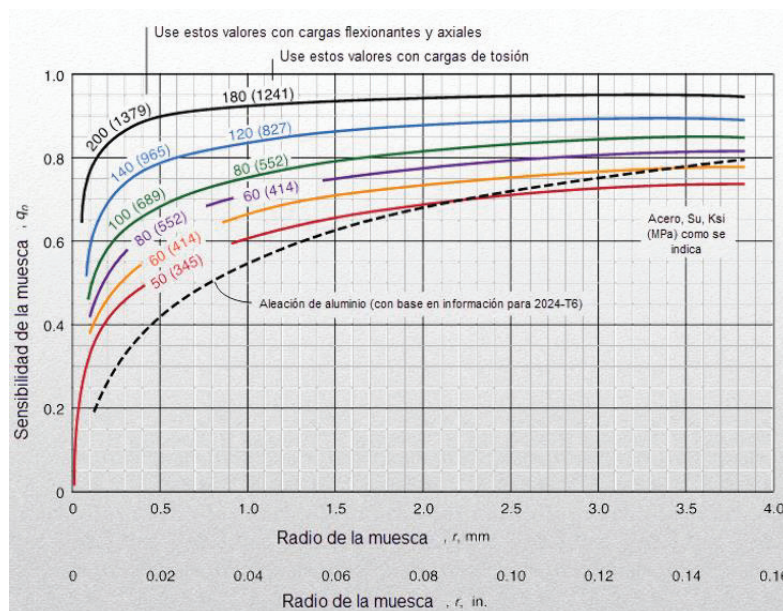


Figura I.8. Sensibilidad de la muesca.
Fuente: (Clases Elementos Finitos, 2012)

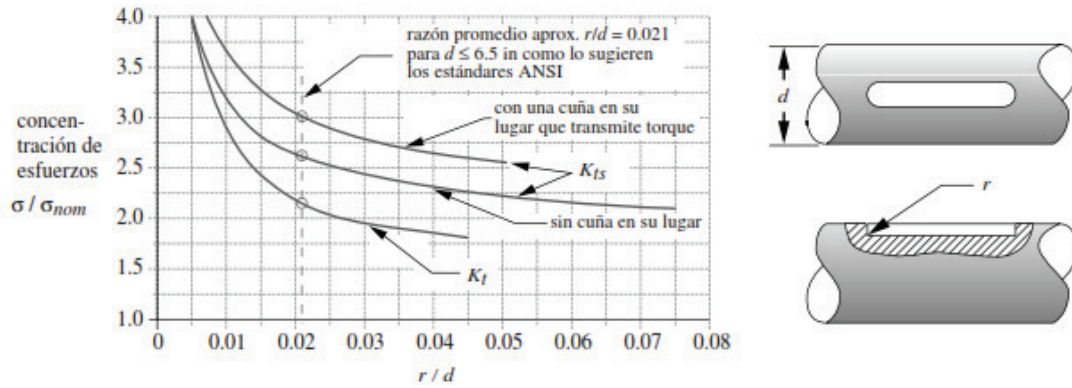
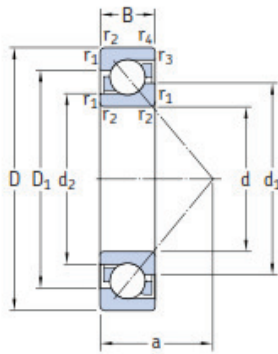


Figura I.9. Factor de concentración de esfuerzos.

Fuente: (Norton, 2011)

Rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular
d 10 – 25 mm



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designaciones ¹⁾		
d	D	B	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		Rodamiento para apareamiento universal	de diseño básico	
mm			kN		kN	rpm		kg	-	-	
10	30	9	7,02	3,35	0,14	30 000	30 000	0,030	7200 BECBP	7200 BEP	
	32	10	7,61	3,8		26 000	26 000		0,036	7201 BECBP	7201 BEP
12	37	12	10,6	5	0,208	24 000	24 000	0,063	-	7301 BEP	
	35	11	9,5	5,1		26 000	26 000		0,045	* 7202 BECBP	-
	35	11	8,84	4,8		0,204	24 000		24 000	0,045	-
15	42	13	13	6,7	0,28	20 000	20 000	0,081	7302 BECBP	7302 BEP	

Figura I.10. Rodamientos de bolas con contacto angular.

Fuente: (Norton, 2011)

Tamaño, pulg	Par de torsión del asiento, lbf · pulg	Potencia de sujeción, lbf
#0	1.0	50
#1	1.8	65
#2	1.8	85
#3	5	120
#4	5	160
#5	10	200
#6	10	250
#8	20	385
#10	36	540
$\frac{1}{4}$	87	1 000
$\frac{3}{16}$	165	1 500
$\frac{3}{8}$	290	2 000
$\frac{7}{16}$	430	2 500
$\frac{1}{2}$	620	3 000
$\frac{9}{16}$	620	3 500
$\frac{3}{8}$	1 325	4 000
$\frac{3}{4}$	2 400	5 000
$\frac{7}{8}$	5 200	6 000
1	7 200	7 000

*Con base en un tornillo de acero aleado contra un eje de acero, de rosca gruesa o fina clase 3A en agujeros clase 2B y tornillos de presión de punta ahuecada y cabeza hueca.

Figura I.11. Potencia de sujeción típica de tornillos de presión de cabeza hueca.
Fuente: (Budynas et al, 2012)



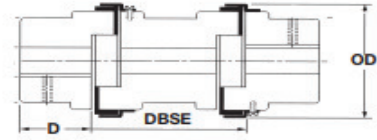
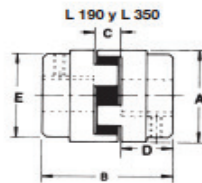
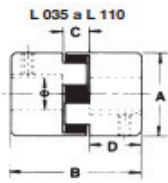
Uso General

Datos Eléctricos

Potencia		Factor de Servicio	Polos	Armazón	Código de Referencia	Tensión V	RPM min ⁻¹	Corriente Nominal A	Corriente a Factor de Servicio A	Clave KVA/HP	Eficiencia Nominal %	Factor de Potencia pu
HP	kW											
0,25	0,187	1,35	2	56	.25360S1PA56	127/220	3510	6.28/2.35	6.50/2.70	R	52,5	0,44
		1,35	4	56	.25180S1P56	127/220	1745	5.50/2.50	5.80/2.80	P	50,5	0,52
0,33	0,249	1,35	2	56	.33360S1PA56	127/220	3510	7.21/2.70	7.40/3.10	P	55,0	0,57
		1,35	4	56	.33180S1P56	127/220	1750	6.40/2.50	7.00/3.00	P	52,5	0,57
0,50	0,373	1,25	2	56	.50360S1PA56	127/220	3515	9.10/3.70	9.70/4.60	N	59,5	0,58
		1,25	4	56	.50180S1P56	127/220	1740	8.00/3.80	8.70/4.30	N	57,5	0,63
0,75	0,560	1,25	2	56	.75360S1PA56	127/220	3500	11.50/5.00	12.55/5.85	M	62,0	0,61
		1,25	4	56	.75180S1P56	127/220	1750	12.5/5.50	13.10/6.10	P	59,5	0,59
1.0	0,746	1,25	2	56	001360S1P56	127/220	3515	13.00/6.20	14.00/7.30	M	64,0	0,70
		1,15	4	56	001180S1P56	127/220	1730	15.00/7.50	17.50/8.62	M	62,0	0,63
1,5	1,119	1,15	2	56	001560S1P56	127/220	3500	16.50/8.80	18.90/10.10	L	68,0	0,78
		1,15	4	56	001580S1P56	127/220	1730	20.20/9.37	21.30/10.60	M	66,0	0,66
2.0	1,492	1,15	2	56H	002360S1P56	127/220	3520	20.0/10.5	22.0/11.5	M	72,0	0,81
		1,15	4	56H	002180S1P56	127/220	1735	29.00/13.50	33.3/15.50	M	70,0	0,57

Figura I.12. Catálogo de motores Weg.
Fuente: (Weg, 2017)

SERIE JAW LOVEJOY - MARTIN - RATHI



DBSE - 100 mm - 140 mm - 180 mm
 QFS (2 cubos + 1 kit de anillo QF + 1 kit espaciador QFS)

DESCRIPCIÓN

Los acabados son cubos simétricos y con agujeros H7, chavetero standard y prisioneros. Espaciadores de aluminio. La superficie de los cubos Martin es pavonada en color azul.

Tipo	CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES EN MM						PAR NOMINAL Nm		
	A	OD	B	D	E	Máx. agujero	E + A	U	H
							NBR	URETANO	HYTREL
L. 035	15,9	-	20,6	6,7	15,9	10	0,46	0,60	1
L. 050	27,4	-	43,6	15,9	27,4	16	4	6	11
L. 070	34,5	-	50,8	19,1	34,5	19	6	8	14
L. 075	44,5	-	54,0	20,6	44,5	24	12	15	27
L. 090	53,6	65	54,0	20,6	53,6	25	20	32	47
L. 095	53,6	65	63,5	25,4	53,6	28	26	32	64
L. 100	64,3	78	89,0	34,9	64,3	35	47	70	141
L. 110	84,1	96	108,0	42,9	84,1	42	89	134	256
L. 150	95,3	111	114,3	44,4	95,3	48	141	212	405
L. 190	114,3	129	123,8	49,2	101,6	55	190	285	512
L. 225	127,0	142	136,5	55,6	108,0	65	265	398	768
L. 276	-	173	200	80	127	75	532	798 (E)	1330 (QF)
L. 295	-	253	238	95	162	95	1279	1919 (E)	3197 (QF)
L. 2955	-	253	264	108	180	105	2132	3198 (E)	5330 (QF)
L. 300	-	272	283	115	180	105	3047	4570 (E)	7617 (QF)
L. 350	-	323	309	128	200	115	4308	6462 (E)	10770 (QF)

(E) Acabado forma estrella Uretano (Modelos L. 276 a L. 350)

(QF) Acabado forma Hytrel (Modelos L. 276 a L. 350)

Programa de fabricación de cubos mecanizados

Disponibles mecanizados en pulgadas

○ Agujero acabado + chavetero + tornillos prisioneros

● Agujero acabado sin chavetero

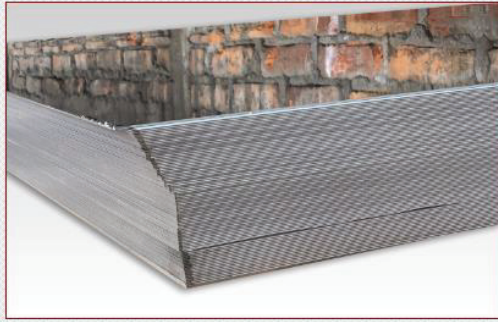
Tipo	ESTRELLAS																Diámetro agujero																		
	E	H	B	U	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20		22	24	25	28	30	32	35	38	40	42	45	48	50	55	60	65		
035	*				●																														
050	*	*	*	*	●	○	○	○	○	○	○	○	○		○																				
070	*	*	*	*		○	○	○	○	○	○	○	○		○																				
075	*	*	*	*			○	○	○	○	○	○	○		○																				
090	*	*	*	*			○	○	○	○	○	○	○		○																				
095	*	*	*	*				○	○	○	○	○	○		○																				
100	*	*	*	*					○	○	○	○	○		○																				
110	*	*	*	*						○	○	○	○		○																				
150	*	*	*	*							○	○	○		○																				
190	*	*	*	*								○	○		○																				
225	*	*	*	*									○		○																				

Indicar en el pedido los agujeros de cada uno y la estrella elegida.

Figura I.13. Catálogo de acoplamiento elástico.

Fuente: (Lindis, 2017)

ACERO INOXIDABLE BRILLANTE 430-BA Y BRILLANTE PULIDO N°4



Cuadro de especificaciones:

Espesor	Ancho	Largo	Peso aprox.
mm.	mm.	mm.	Kg.
0.4	1220	2440	9,53
0.5	1220	2440	11,96
0.6	1220	2440	14,3
0.7	1220	2440	16,75
0.9	1220	2440	21,54
1.0	1220	2440	22,73
1.2	1220	2440	30
1.5	1220	2440	35
2.0	1220	2440	47,84
3.0	1220	2440	71,76

Otras dimensiones y espesores previa consulta

Figura I.14. Catalogo flejes acero inoxidable 430.
Fuente: (Proacero S.C.C., 2017)

AK Steel 430 Ferritic Stainless steel

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Ferritic](#); [Stainless Steel](#); [T 400 Series Stainless Steel](#)

Material Notes: AK Steel 430 combines good corrosion resistance and heat and oxidation resistance up to 1500°F with good mechanical properties. furnace combustion chambers, dishwashers, range hoods, gas burners, gutters, steam iron bases and flatware. Industrial application equipment.

Information provided by AK Steel

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

[Printer friendly version](#) [Download as PDF](#) [Download to Excel \(requires Excel and Windows\)](#)
 [Export data to your CAD/FEA program](#)

Physical Properties	Metric	English
Density	7.74 g/cc	0.280 lb/in ³
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Rockwell B	85	85
Tensile Strength, Ultimate	483 MPa	70100 psi
Tensile Strength, Yield	310 MPa @Strain 0.200 %	45000 psi @Strain 0.200 %
Elongation at Break	25 %	25 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi

Figura I.15. Propiedades acero inoxidable 430.
Fuente: (Matweb, 2017)

Diamétero NB Pulgadas	(mm)	SCH10S			SCH40S		
		Espesor de pared (mm)	Test hidrotático (Mpa)	Peso Aprox. (kg/m)	Espesor de pared (mm)	Test hidrotático (Mpa)	Peso Aprox. (kg/m)
1/4	13,72	1,65	18	0,50	2,24	18	0,64
3/8	17,15	1,65	18	0,64	2,31	18	0,86
1/2	21,34	2,11	18	1,01	2,77	18	1,28
3/4	26,67	2,11	18	1,29	2,87	18	1,70
1"	33,40	2,77	18	2,11	3,38	18	2,53
1 1/4	42,16	2,77	17	2,72	3,556	18	3,43
1 1/2	48,26	2,77	15	3,14	3,68	18	4,10
2"	60,33	2,77	12	3,97	3,91	16	5,49
2 1/2	73,03	3,05	11	5,32	5,16	18	8,72
3"	88,90	3,05	9	6,52	5,49	16	11,40
3 1/2	101,60	3,05	8	7,49	5,74	14	13,70
4"	114,30	3,05	7	8,45	6,02	13	16,20
5"	141,30	3,4	6	11,70	6,55	12	22,00
6"	168,28	3,4	5	14,00	7,11	11	28,5

Figura I.16. Tubería de acero inoxidable cedula ASTM A-312.
Fuente: (Ivan Bohman C.A., 2017)


Physical Properties	Metric	English
Bulk Density	0.288 g/cc	0.0104 lb/in ³
Loss On Ignition	7.0 % @Temperature 1025 °C	7.0 % @Temperature 1877 °F
Porosity	89 %	89 %
Permeability	1.0	1.0
Mechanical Properties	Metric	English
Modulus of Rupture	0.00170 GPa	0.247 ksi
Compressive Strength	2.80 MPa	406 psi
Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear	5.50 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 750 °C	3.06 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 1380 °F
Specific Heat Capacity	0.840 J/g-°C	0.201 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity 	0.0700 W/m-K @Temperature 200 °C	0.486 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 392 °F
	0.0900 W/m-K @Temperature 400 °C	0.625 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 752 °F
	0.100 W/m-K @Temperature 600 °C	0.694 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 1110 °F
Maximum Service Temperature, Air	1100 °C	2010 °F
Shrinkage	1.5 % @Time 43200 sec	1.5 % @Time 12.0 hour


Figura I.17. Propiedades del Silicato de calcio.
Fuente: (matweb, 2017)

Physical Properties	Metric	English
Density	7.80 g/cc	0.282 lb/in ³
Mechanical Properties	Metric	English
Tensile Strength, Ultimate	485 - 620 MPa	70300 - 89900 psi
Tensile Strength, Yield	260 MPa	37700 psi
Elongation at Break	17 %	17 %
	21 %	21 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi
Poissons Ratio	0.29	0.29
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi
Electrical Properties	Metric	English
Electrical Resistivity	0.0000170 ohm-cm	0.0000170 ohm-cm
Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear	12.0 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$	6.67 $\mu\text{in}/\text{in}^\circ\text{F}$
Specific Heat Capacity	0.470 J/g $^\circ\text{C}$	0.112 BTU/lb $^\circ\text{F}$
Thermal Conductivity	52.0 W/m-K	361 BTU-in/hr-ft 2 -F

Figura I.18. Propiedades del acero al carbono A516.
Fuente: (matweb, 2017)

Rueda 400-400 TW0140 (Ficha técnica)

Pedir catálogo | Ver Comparativa de Ruedas | Solicitar más información



Codigo				Tipo cojinete Eje					
TW0140	50	50	20	—	60x60	46x46	-	72	51

[VERSIÓN IMPRIMIBLE](#) [AÑADIR A COMPARATIVA](#)

Características

- Chapa de acero embutida.
- Acabado cincado brillante.
- Agujero pasante y platina.
- Con doble rodamiento de bolas.
- Cojinetes: Liso.
- Incorpora anti-hilos.

[DESCARGAR EN FORMATOS 3D](#)

- [Catia](#)
- [Iges](#)
- [Inventor](#)
- [Parasolid](#)
- [Proengineer](#)
- [Step AP203](#)

Datos técnicos

- Diámetro: 50 mm
- Capacidad de carga: 50 kg
- Tipo de cojinete: Cojinete Liso
- Ancho de Banda de rodadura: 20 mm
- Medidas de placa superior: 60x60 mm
- Distancia entre agujeros: 46x46 mm
- Diámetro de agujeros: mm
- Altura total: 72 mm
- Radio giro: 51 mm

[DESCARGAR PDF](#)

[DESCARGAR CAD](#)

[Descargar pdf](#)

[Descargar cad](#)

Rueda

- 400 (Nylon)
- Rueda de poliamida negra

Figura I.19. Especificaciones Rueda 400-400 TW0140.
Fuente: (Ruedas ALEX, 2017)

MANTA ARMADA 160

DESCRIPCIÓN

Fieltro de lana de roca cosido por una cara a una malla de acero galvanizado. Todos los espesores presentados en una sola capa. Temperatura máxima 650°C (750°C en punta).



APLICACIONES

Aislamiento térmico y acústico de conductos de gran diámetro, depósitos, tanques de almacenamiento y equipos industriales con superficies irregulares.

Dimensiones (mm)

LARGO x ANCHO	4.800 x 1.000
ESPESOR (mm)	40 50 60 70
LARGO x ANCHO	2.400 x 1.000
ESPESOR (mm)	80 100

Densidad nominal

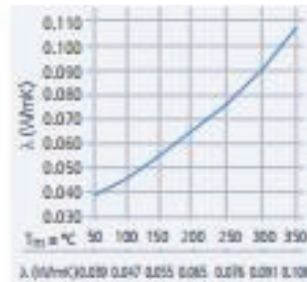
70 kg/m³

Aislamiento acústico

La aplicación de mantas armadas contribuye a la reducción del ruido generado por el transporte de fluidos en tuberías.

Conductividad térmica

Ensayo realizado según norma UNE-EN 12667



Concentración de cloruros

< 10 mg/kg.
Calificado como AS, lo que permite su uso sobre superficies de acero inoxidable.

Temperatura de trabajo

600°C en régimen continuo.
Norma EN 14706, 750°C en punta. Norma ASTM C411.

Calor específico

0.84 kJ/kg K a 20°C

Comportamiento al agua

Los productos de lana de roca no retienen el agua y poseen una estructura no capilar.

Resistencia al paso del vapor de agua

Similar al del aire $\mu = 1.3$
Absorción al vapor de agua según ASTM C 1104 / C 1104M, es de $\pm 0,02\%$ de su volumen.

Figura I.20. Manta armada 160.
Fuente: (Rockwool, 2017)

ANEXO II. Cálculos de diseño

Cámara externa

El espesor de la cámara externa se calcula a continuación, en base a las ecuaciones presentadas en Cengel & Ghajar, 2007.

Resistencia por conducción 1

Como se representa por la ecuación 4.26:

$$R_{cd1} = \frac{\ln(r_{mr}/r_1)}{2\pi L \lambda_{mr}}$$

Donde la conductividad térmica del material refractario es $0,09 \frac{W}{m \cdot K}$ para 673 K según la figura I.17 del anexo I, y la altura del reactor $L = 0,47$ m.

$$R_{cd1} = \frac{\ln r_{mr} + 1,51}{2\pi * 0,47(m) 0,09 \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)} = \frac{\ln r_{mr} + 1,51}{0,27} \left(\frac{^\circ C}{W}\right)$$

Se eligió como material refractario al silicato de calcio ya que es muy usada en hornos de alta temperatura, cuyas propiedades se presentan en la figura I.17 del anexo I.

Resistencia por conducción 2

Como se representa por la ecuación 4.26, y para una conductividad térmica del acero de $52 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$, para el acero al carbono A516, como en la figura I.18 del anexo I, se tiene:

$$R_{cd2} = \frac{\ln r_2 - \ln r_{mr}}{2\pi * 0,47(m) 52 \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)} = \frac{\ln r_2 - \ln r_{mr}}{154} \left(\frac{^\circ C}{W}\right)$$

Resistencia por convección

Para realizar el cálculo de la resistencia por convección natural, primero se debe obtener el coeficiente h para el aire. Según Yagi y Wakao, 1991 este coeficiente se determina por

$$h_{cv} = \frac{Nu \lambda_a}{L} \quad (II.1)$$

Las propiedades del aire se toman a una temperatura media:

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (\text{II.2})$$

Asumiendo una temperatura superficial de 30 °C y una temperatura ambiente de 20 °C:

$$T_m = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para una temperatura del aire a 25 °C, se tiene una conductividad térmica de $25,5 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$

Para obtener el número de Nusselt se necesita primero obtener el número de Grashof:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho_a^2}{\mu_a^2} \quad (\text{II.3})$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad = $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

β : Coeficiente de expansión térmica volumétrica a 25 °C = $3,36 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

$\Delta T = 10 \text{ K}$

ρ_a : Densidad del aire a 25 °C = $1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

μ_a : Viscosidad dinámica del aire a 25 °C = $1,85 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$

$$Gr = 1,4 \times 10^8$$

En base a la fórmula determinada por Cengel y Ghajar, 2007:

$$D > \frac{35L}{Gr^{1/4}} \quad (\text{II.4})$$

Para diámetros D de la cámara externa mayores que la fórmula presentada, se considera el número de Nusselt para placa plana vertical.

$$D = 0,15$$

Como el diámetro del reactor es mayor a ese valor ($d > 0,4$) entonces se asume a la cámara externa como placa plana vertical, entonces para rangos de valores del número de Rayleigh:

$$\begin{aligned} 10^4 < Ra < 10^9 & \quad Nu = 0,59Ra^{1/4} \\ 10^9 < Ra < 10^{13} & \quad Nu = 0,1Ra^{1/3} \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

Como:

$$Ra = Gr * Pr = 1,02 \times 10^8 \quad (\text{II.6})$$

Entonces:

$$Nu = 0,59(1,02 \times 10^8)^{1/4}$$

$$Nu = 59,3$$

$$h_{cv} = 3,22 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

Luego se reemplazan los valores como se representa por la ecuación 4.27:

$$R_{cv} = \frac{1}{3,22 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) * 2\pi * r_2(m) * 0,47(m)} = \frac{0,105}{r_2} \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

Resistencia por radiación

La transferencia de calor por radiación se considera en el acero A516, y para la ecuación 4.28, con una transferencia de calor por radiación representada por:

$$h_{rad} = 4 * \varepsilon * \vartheta * T_m^3 \quad (\text{II.7})$$

Para una emisividad del acero de 0,53

$$\vartheta: \text{Constante Stefan-Boltzmann} = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

T_m : Temperatura media = 298 K

$$R_{rad} = \frac{0,106}{r_2} \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

Ya que la resistencia por convección y la resistencia por radiación están en paralelo, se considera la ecuación 4.29:

$$R_{combinada} = \frac{1}{\frac{1}{R_{cv}} + \frac{1}{R_{rad}}} = \frac{0,053}{r + 0,0015} \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

Reemplazando los valores de las resistencias en la ecuación 4.25 se tiene:

$$Q_p = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{\ln r + 1,5}{0,27} + \frac{\ln r_2 - \ln r_{mr}}{154} + \frac{0,053}{r_2}} \quad (\text{II.8})$$

Ahora, considerando al equipo sin material refractario en la ecuación 4.25 se tiene:

Resistencia por conducción

Como se representa por la ecuación 4.26, donde la conductividad térmica del acero a 673 K es $38,7 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

$$R'_{cond} = \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{2\pi * 0,47(m) 38,7 \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)} = \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{102} \left(\frac{^\circ C}{W}\right)$$

Resistencia por convección

La transferencia de calor por convección se da entre la superficie externa del reactor y el aire, y se representa como la ecuación 4.27. Las propiedades del aire se dan a una temperatura media donde la temperatura superficial es 673 K y la temperatura ambiente es 20 °C, y según la ecuación II.2:

$$T_m = 210 \text{ } ^\circ C$$

Se asume una resistencia a la conducción extremadamente baja, en las paredes de acero ya que el espesor es muy pequeño y las temperaturas muy altas, por lo que la temperatura en sus superficies interior y exterior será la misma.

Aplicando el mismo proceso para la obtención del coeficiente de convección natural, con las ecuaciones II.3 a II.6 se tiene:

$$h_{cv} = \frac{Nu\lambda_a}{L}$$

Donde la conductividad térmica del aire a 210 es $3,85 \times 10^{-2} \frac{W}{m \cdot K}$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T L^3 \rho^2}{\mu^2}$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad = $9,81 \frac{m}{s^2}$

β : Coeficiente de expansión térmica volumétrica a 210 °C = $2,07 \times 10^{-3} K^{-1}$

ΔT = 380 K

L = Altura del reactor = 0,47 m

ρ : Densidad del aire a 210 °C = $0,7306 \frac{kg}{m^3}$

μ : Viscosidad dinámica del aire a 210 °C = $26,1 \times 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}$

$$Gr = 6,26 \times 10^8$$

En base a la ecuación II.4;

$$D > \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0,104$$

Como el diámetro D del reactor es mayor que el número obtenido, se considera el número de Nusselt para placa plana vertical:

$$Ra = Gr * Pr = 4,34 \times 10^8$$

Entonces, en base a la ecuación II.5:

$$Nu = 0,59(4,34 \times 10^8)^{1/4}$$

$$Nu = 85,2$$

$$h_{cv} = 6,97 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

$$R'_{cv} = \frac{1}{6,97 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) * 2\pi * r_2(m) * 0,47(m)} = \frac{0,049}{r_2} \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

Resistencia por radiación

Considerando el acero A516 y considerando la ecuación 4.28:

$$R'_{rad} = \frac{1}{h_{rad} * 2\pi r_2 L}$$

$$h_{rad} = 4 * \varepsilon * \vartheta * T_m^3$$

Donde

ε : Emisividad del acero = 0,53

ϑ : Constante Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

T_m : Temperatura media = 210 K

r_2 : Radio de la pared externa del acero.

$$R'_{rad} = \frac{0,304}{r_2} \frac{^\circ C}{W}$$

Ya que la resistencia por convección y la resistencia por radiación están en paralelo:

$$R'_{combinada} = \frac{0,042}{r_2} \frac{^\circ C}{W}$$

Reemplazando las resistencias en la ecuación 4.25 se tiene:

$$Q_{psr} = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{\ln r_2 - \ln r_1}{102} + \frac{0,042}{r_2}} \quad (\text{II.9})$$

Igualando los valores obtenidos de las ecuaciones II.8 y II.9 en la ecuación 4.24 y para las mismas temperaturas $T_i - T_\infty$:

$$\frac{\frac{\frac{T_i - T_\infty}{\frac{\ln r_2 - \ln r_1}{114} + \frac{0,0165}{r_2}}}{\frac{\ln r + 1,5}{0,295} + \frac{\ln r_2 - \ln r_{mr}}{153,6} + \frac{0,053}{r_2}}}{T_i - T_\infty} = \text{Perdidas} \quad (\text{II.10})$$

Esta es la ecuación que se utilizó para obtener el espesor del material refractario, como se muestra en la tabla 4.11.

Energía para calentar el sistema

Para calcular la energía necesaria para calentar la cámara interna se tiene:

$$Q_{sensible\ b} = m_b * C_e * \Delta T$$

$$Q_{sensible\ ac} = m_{ac} * C_{eac} * \Delta T$$

Donde:

m_b : masa de biomasa = 10000 g

m_{ac} : masa de acero = 2340 g

C_e : Calor específico de la biomasa = $2,72 \frac{J}{g \cdot K}$

C_{ea} : Calor específico del acero a = $0,6 \frac{J}{g \cdot K}$

ΔT : Variación de temperatura = $673 - 293 = 380\ K$

$$Q_b = 10000\ (g) * 2,72 \left(\frac{J}{g \cdot K} \right) * 380\ (K) = 10,3\ (MJ)$$

$$Q_{ac} = 0,533\ (MJ)$$

$$Q_{cal} = Q_b + Q_{ac}$$

$$Q_{cal} = 10,8\ (MJ) = 3\ (kWh)$$

Pérdidas de calor

Para la obtención de las pérdidas de calor el análisis de las resistencias incluye la convección que se da en la cámara vacía, la cual se presenta como la ecuación 4.27:

$$R_{cv} = \frac{1}{h_{cv} * 2\pi r_1 L}$$

Donde:

r_1 : Radio de la pared interna = 0,221 m.

L: Altura del reactor = 0,47 m

Para simplificar el análisis se consideró que sólo se genera dióxido de carbono y que este es el único gas en toda la cámara vacía.

Las propiedades del dióxido de carbono se dan a una temperatura media como en la ecuación II.2, para una temperatura de la superficie de 673 K y una temperatura ambiente de 20 °C:

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

$$T_m = 210 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando el mismo proceso para la obtención del coeficiente de convección natural, con las ecuaciones II.3 a II.6 se tiene:

$$h_{cv} = \frac{Nu\lambda_a}{L}$$

Donde la conductividad térmica del CO₂ a 210 °C es 0,033 $\frac{W}{m \cdot K}$

El número de Nusselt se expresa como:

$$Nu = C * (Gr * Pr)^n$$

Donde

Pr: Número de Prandtl = 0,717

Gr: Número de Grashof

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T L^3 \rho^2}{\mu^2}$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad = 9,81 $\frac{m}{s^2}$

β : Coeficiente de expansión térmica volumétrica a 210 °C = 0,00207 K⁻¹

ΔT = 483 K

L = Altura del reactor 0,47 m

ρ : Densidad del CO₂ a 210 °C = 1,121 $\frac{kg}{m^3}$

μ : Viscosidad dinámica del CO₂ a 210 °C = 22,4 × 10⁻⁶ $\frac{kg}{m \cdot s}$

$$Gr = 2 \times 10^9$$

En base a la ecuación II.4

$$D > \frac{35L}{Gr^{1/4}} = 0,0778$$

Como el diámetro D del reactor es mayor que el número obtenido como se vio anteriormente, se considera el número de Nusselt para placa plana vertical, como se aplicó en la ecuación II.5 y II.6:

$$Ra = Gr * Pr = 1,43 \times 10^9$$

Entonces, en base a la ecuación II.5:

$$Nu = 0.1(1,43 \times 10^8)^{1/3}$$

$$Nu = 115$$

$$h_{cv} = 8,06 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

$$R_{cv} = \frac{1}{8,06 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) * 2\pi * 0,221(m) * 0,47(m)} = 0,19 \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

Los valores obtenidos de la ecuación II.8 al conocer el valor de los radios se reemplazan en la ecuación 4.33.

$$Q_p = \frac{T_i - T_\infty}{R_{conv} + R_{cond1} + R_{cond2} + R_{comb}}$$

$$Q_p = \frac{(400 - 20) ^\circ C}{(0,191 + 0,625 + 3,96 \times 10^{-5} + 0,138) \left(\frac{^\circ C}{W} \right)}$$

$$Q_p = 398 (W)$$

Pérdidas de calor por la salida de gases

Se considera la ecuación 4.34.

$$Q_p \text{ gases} = m_{aire} * C_{e \text{ aire}} * \Delta T$$

Asumiendo una masa de combustible de se tiene una masa de aire de:

$$m_{aire} = m_{aire/c} / m_{combustible} * m_{combustible} = 14,7 * 315 (g)$$

$$m_{aire} = 4630 (g)$$

Para una temperatura de 873 K se tiene un calor específico del aire de $C_{e \text{ aire}} = 1,110 \frac{J}{g \cdot K}$, y para una variación de temperatura de $\Delta T = 580 K$, se tiene:

$$Q_{p \text{ gases}} = (4630 + 315)(g) * 1,110 \left(\frac{J}{g \cdot K} \right) * 580 (K)$$

$$Q_{p \text{ gases}} = 3183 (kJ) = 0,884 (kWh)$$

Energía para mantener caliente al sistema

Para mantener a la biomasa y acero a 673 K se tiene, en base a las ecuaciones 4.30 y 4.31.

$$Q_b = m_b * C_e * \Delta T = 10000 (g) * 2,72 \left(\frac{J}{g \cdot K} \right) * 6 (K)$$

$$Q_b = 0,163 MJ$$

$$Q_{ac} = 0,0084 MJ$$

Entonces, la energía necesaria para que la biomasa y el acero se mantengan a una temperatura de 673 K es:

$$Q_{mant} = 0,1716 MJ$$

Hay que suministrar esta energía cada 100 segundos, y le tomará alrededor de 50 segundos para nivelar la temperatura nuevamente, entonces para mantener al equipo 30 minutos o 1800 segundos a la misma temperatura se necesitará una energía total de:

$$Q_{mant} = 0,1716 (MJ) * \frac{1800 (s)}{150 (s)} = 2,06 MJ = 0,572 kWh$$

Pérdidas de calor por la salida de gases

Para mantener caliente al sistema y asumiendo una masa de combustible de se tiene una masa de aire de:

$$m_{aire} = m_{a/c} * m_c = 14,7 * 71,2 (g)$$

$$m_{aire} = 1046 (g)$$

Para una temperatura de 653 K se tiene un calor específico del aire de $C_{e \text{ aire}} = 1,064 \frac{J}{g \cdot K}$, y para una variación de temperatura de $\Delta T = 380 K$, se tiene:

$$Q'_{p\ gases} = (1046 + 71,2)(g) * 1,069 \left(\frac{J}{g \cdot K} \right) * 380 (K)$$

$$Q'_{p\ gases} = 452(kJ) = 0,126(kWh)$$

Soportes externos

Sumando la biomasa residual, el peso de la cámara interna, los soportes internos, el material refractario, la cámara externa y el sistema de tuberías se tiene:

$$W_t = (10 + 2,3 + 1,375 + 110 + 15,7 + 6,617) (kg)$$

$$W_t = 146 (kg)$$

La fuerza aplicada será:

$$F = 146 (kgf) \frac{9,8 (N)}{1 (kgf)} = 1431 (N)$$

Como ya se observó antes $F = P_{cr}$ y para un factor de seguridad de 3 y ya que se necesitan 4 columnas, se tiene un $P_{cr} = 1073 N$

Su ecuación se presenta como la ecuación 4.21:

$$P_{cr} = \frac{2,046\pi^2 EI}{L^2}$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad para el acero al carbono A516 = 200 GPa

I: Inercia.

L: Longitud de la columna = 0,08 m

La inercia para una sección transversal tubular según la ecuación 4.23 es:

$$I = \frac{\pi}{64} [d^4 - (d - 2e)^4]$$

Para un $d = 0,01372 m$, se tiene:

$$1073 (N) = \frac{2,046 * \pi^2 * (200 \times 10^9 (Pa))}{(0,08 (m))^2} * \frac{\pi}{64} [(0,01372(m))^4 - (0,01372 (m) - 2e)^4]$$

$$e = 5,12 \times 10^{-6} (m) = 5,12 \times 10^{-3} (mm)$$

Tubería

Resistencia por conducción en la tubería

$$R_{cd\ tb} = \frac{\ln(r_m/r_i)}{2\pi L\lambda_a}$$

Donde:

λ_a : Conductividad térmica del acero a 673 K = $38,7 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

r_i : Radio interior = 0,0274 m

r_m : Radio medio = 0,0302 m

L: longitud de la tubería = 0,7 m

$$R_{cd\ tb} = \frac{\ln\left(\frac{0,0302}{0,0274}\right)}{2\pi * 0,7(m) 38,7\left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)} = 0,000562 \left(\frac{^\circ C}{W}\right)$$

Resistencia por conducción en el aislante

Se eligió como material aislante a la lana de roca que presenta buenas propiedades, como se muestra en la figura I.20 del anexo I. Entonces, la transferencia de calor por conducción del material aislante es:

$$R_{cd\ ai} = \frac{\ln(r_e/r_m)}{2\pi L\lambda_{ai}}$$

Donde:

λ_{ai} : Conductividad térmica del material aislante a 673 K = $0,12 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

r_e : Radio de la pared externa del material aislante = 0,0702 m

$$R_{cd\ ai} = \frac{\ln\left(\frac{0,0702}{0,0302}\right)}{2\pi * 0,7(m) 0,12\left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)} = 1,6 \left(\frac{^\circ C}{W}\right)$$

Resistencia por convección

La transferencia de calor por convección se da entre la superficie externa del reactor y el aire, y se representa como:

$$R_{cv} = \frac{1}{h_{cv} * 2\pi r_e L}$$

Asumiendo una temperatura superficial de 60 °C, una temperatura ambiente de 20 °C y en base a la ecuación II.2:

$$T_m = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Aplicando el mismo proceso para la obtención del coeficiente de convección natural, con las ecuaciones II.3 a II.6 se tiene:

$$h_{cv} = \frac{Nu\lambda_a}{L}$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho^2}{\mu^2}$$

Donde:

$$\lambda_a : \text{Conductividad térmica del aire a } 40 \text{ } ^\circ\text{C} = 26,62 \times 10^{-3} \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\beta: \text{Coeficiente de expansión térmica volumétrica a } 40 \text{ } ^\circ\text{C} = 3,2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\Delta T = 40 \text{ K}$$

$$\rho: \text{Densidad del aire a } 40 \text{ } ^\circ\text{C} = 1,117 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu: \text{Viscosidad dinámica del aire a } 40 \text{ } ^\circ\text{C} = 1,92 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$Gr = 1,46 \times 10^9$$

$$D > \frac{35L}{Gr^{1/4}}$$

$$D = 0,125 < 0,14$$

Como el diámetro de la tubería es mayor a este valor, entonces:

$$Nu = 0,59Ra^{1/4}$$

Como:

$$Ra = Gr * Pr = 1,06 \times 10^9$$

Para Pr a 40 °C = 0,7255

Entonces:

$$Nu = 0,59(6,65 \times 10^8)^{1/4}$$

$$Nu = 106$$

$$h_{cv} = 4,04 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

$$R_{cv} = \frac{1}{4,04 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) * 2\pi * 0,0702(m) * 0,7(m)} = 0,80 \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

Resistencia por radiación

Para la transferencia de calor por radiación se considera el recubrimiento de acero galvanizado:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}A} = \frac{1}{h_{rad} * 2\pi r_e L}$$

$$h_{rad} = 4 * \varepsilon * \vartheta * T_m^3$$

Donde:

ε : Emisividad del acero = 0,53

ϑ : Constante Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

T_m : Temperatura media = 313 K

$$h_{rad} = 24,2 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{24,2 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) * 2\pi * 0,1603(m) * 0,6(m)} = 0,134 \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

$$R_{combinada} = \frac{1}{\frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{rad}}} = 0,115 \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

Reemplazando los valores, se tiene:

$$Q_p = \frac{(400 - 20)^\circ C}{(0,000562 + 1,6 + 0,115) \left(\frac{^\circ C}{W} \right)} = 222 (W)$$

Para obtener la temperatura real de la superficie externa:

$$Q_p = \frac{T_i - T_{s \text{ aislante}}}{R_{cd \text{ tb}} + R_{cd \text{ ai}}}$$

$$T_{s \text{ aislante}} = T_i - Q_p (R_{cd \text{ tb}} + R_{cd \text{ ai}})$$

$$T_{s \text{ aislante}} = 400 (^\circ C) - 222 (W) * (0,000562 + 1,6) \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

$$T_{s \text{ aislante}} = 45 ^\circ C$$

Para una segunda iteración la temperatura superficial externa se estabiliza en:

$$T_{s \text{ aislante}} = 46 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para esta temperatura se tienen pérdidas de:

$$Q_p = 221 \text{ W}$$

Como la temperatura superficial supuesta y la obtenida son iguales, se asumen estos valores.

Sistema de separación

Los valores presentados en la tabla 4.18 se calcularon, en base a García, 2011; de la siguiente manera: Ya que el tar, o alquitrán, presenta un análisis complejo, no está definido específicamente, pero al considerar el $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}$ como su componente principal, su densidad y masa molar están determinadas, así como otras propiedades que ayudarán a determinar las características necesarias en este trabajo.

Viscosidad dinámica del alquitrán

Para encontrar la viscosidad dinámica del alquitrán para una temperatura determinada se trabaja con el método de Lucas:

$$\eta\xi = [0,087T_r^{0,618} - 0,357 \exp(-0,449T_r) + 0,340 \exp(-4,058T_r) + 0,018]F_pF_Q \quad (\text{II.11})$$

Aquí, η es la viscosidad dinámica, T_r es la temperatura reducida y F_p , F_Q son factores de corrección.

El valor de ξ se obtiene como:

$$\xi = 0,176 \left(\frac{T_c}{M^3 P_c^4} \right)^{1/6} \quad (\text{II.12})$$

Donde T_c , P_c son la temperatura y presión críticas del gas, M es su masa molar. Reemplazando valores se tiene:

$$\xi = 0,176 \left(\frac{550,13 \text{ (K)}}{\left(96 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)\right)^3 (37,47 \text{ (bar)})^4} \right)^{1/6}$$

$$\xi = 4,59 \times 10^{-3}$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (\text{II.13})$$

$$T_r = \frac{673,13}{550,13}$$

$$T_r = 1,22$$

Los factores F_p y F_Q son iguales a uno, entonces reemplazando valores en la ecuación II.11, la viscosidad dinámica es:

$$\eta = 19 * 10^{-6} \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

Conductividad térmica del alquitrán

La ley de potencias es aplicable para la determinación de la conductividad térmica de los alquitranes:

$$\lambda_{tar} = \lambda_{amb} \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (\text{II.14})$$

$$\lambda_{tar} = 0,014 \left(\frac{673,13}{293,13} \right)^{1,5}$$

$$\lambda_{tar} = 0,049 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

Una vez determinadas las propiedades del alquitrán, se procede a calcular las propiedades de la mezcla de gases:

Conductividad térmica de la mezcla de gases

La Ecuación mostrada en Reid et al. se aplica para una mezcla de gases:

$$\lambda_g = \sum_{i=1}^i \frac{x_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^j x_j A_{ij}} \quad (\text{II.15})$$

$$A_{ij} = \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{\mu_i}{\mu_j}} \sqrt{\frac{M_j}{M_i}} \right)^2}{\sqrt{8 * \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)}} \quad (\text{II.16})$$

Donde:

λ_i : Conductividad térmica de cada gas.

A_{ij} : Parámetro de interacción para la conductividad térmica.

x_i : Fracción molar

$\mu_{i,j}$: Viscosidad dinámica de cada gas.

$M_{i,j}$: Masa molar de cada componente.

Reemplazando los valores se obtiene una conductividad térmica de:

$$\lambda_g = 0,0518 \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$$

Viscosidad dinámica de la mezcla de los gases

Esta viscosidad se puede calcular mediante el método de Wilke para mezcla de gases:

$$\mu = \sum_{i=1}^i \frac{x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^j x_j \phi_{ij}} \quad (\text{II.17})$$

El parámetro de interacción para la viscosidad ϕ_{ij} se calcula de la misma manera que A_{ij} de la ecuación II.16. Reemplazando los valores se obtiene una viscosidad dinámica de:

$$\mu = 28,7 * 10^{-6} \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

Calor específico de la mezcla de los gases

El calor específico molar se obtiene mediante la fórmula:

$$C_p = \sum_{i=1}^i x_i C_{p,i} \quad (\text{II.18})$$

$$C_p = 2,53 \left(\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right)$$

La densidad de la mezcla de los fluidos se calcula de la misma forma que se calculó el calor específico:

$$\rho = \sum_{i=1}^i x_i \rho_i \quad (\text{II.19})$$

$$\rho = 0,82 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Condensador

Para encontrar la longitud que tendrá el condensador, se analiza la razón de transferencia de calor para el gas y para el agua, y en base a las ecuaciones presentadas en Cengel & Ghajar, 2007, donde se asume que se condensa totalmente el bioaceite, se tiene:

$$\dot{Q}_{gt} = \dot{m}_g C_{p g} (T_{i g} - T_{f g}) = 15 \left(\frac{kg}{h} \right) * 2,53 \left(\frac{kJ}{kg K} \right) * (668 - 353) (K)$$

$$\dot{Q}_{gt} = 12 \left(\frac{MJ}{h} \right) = 3333 (W)$$

Para obtener la temperatura final del agua se tiene:

$$T_{f agua} = T_{i agua} + \frac{\dot{Q}_{agua}}{\dot{m}_{agua} C_{p agua}}$$

$$T_{f agua} = 293 (K) + \frac{12000 \left(\frac{kJ}{h} \right)}{100 \left(\frac{kg}{h} \right) * 4,18 \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)} = 322 (K) = 49 \text{ } ^\circ C$$

Luego, la transferencia de calor entre los gases y el agua se define también como en Cengel & Ghajar, 2007.

$$\dot{Q} = UA \Delta T_{log} \quad (II.20)$$

Donde:

U: Coeficiente global de transferencia de calor.

A: Área mínima del tubo del condensador.

ΔT_{log} : diferencia de temperatura media logarítmica.

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{fg} - T_{f agua}) - (T_{ig} - T_{i agua})}{Ln \left(\frac{T_{fg} - T_{f agua}}{T_{ig} - T_{i agua}} \right)} \quad (III.21)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(353 - 322) - (667 - 293)}{Ln \left(\frac{353 - 322}{667 - 293} \right)}$$

$$\Delta T_{log} = 411 K$$

Entonces, reemplazando los valores en la ecuación II.20, el área será:

$$3333 (W) = 350 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right) * A * 411 (K)$$

$$A = 0,0232 \text{ (m}^2\text{)}$$

Para encontrar la longitud final de condensador se usa la ecuación del área de un cilindro:

$$A = 2\pi RL \quad (\text{II.22})$$

Donde el radio del condensador es de 12,7 mm, entonces el largo mínimo que debe tener el condensador es:

$$L = 0,29 \text{ (m)}$$

Y la efectividad del condensador es, en base a la ecuación de Cengel & Ghajar, 2007:

$$\varepsilon_{\text{flujo paralelo}} = \frac{1 - \exp\left[-\frac{UA}{C_{\min}}\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right]}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}} \quad (\text{II.23})$$

El valor de C_{\min} es el valor mínimo entre la razón de capacidad calorífica del agua y del gas total, por lo que:

$$C_{\text{agua}} = 100 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) * 4,18 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) = 0,12 \left(\frac{\text{kW}}{\text{K}}\right) = C_{\max}$$

$$C_{\text{gt}} = 15 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) * 2,53 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) = 0,011 \left(\frac{\text{kW}}{\text{K}}\right) = C_{\min}$$

Y reemplazando los valores se tiene una eficiencia de:

$$\varepsilon_{\text{flujo paralelo}} = 0,51$$

ANEXO III. Planos de diseño