

Diseño de un reactor de tornillos para la obtención de bioaceite a partir de pirólisis rápida de biomasa residual

Design of an auger reactor to obtain bio-oil from fast pyrolysis of residual biomass

Jesús Alberto Pardo Salazar



Marlon Darío Sierra Hernández



Cristian Antonio Pedraza Yepes



Universidad del Atlántico, Colombia

OPEN ACCESS

Recibido: 23/02/2021

Aceptado: 19/05/2021

Publicado: 05/07/2021

Correspondencia de autores:

Cristianpedraza@mail.uniatlantico.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Realizar el diseño mecánico de un reactor de tornillo para la obtención de bioaceite mediante pirólisis rápida de biomasa residual. **Metodología:** Para seleccionar el reactor más adecuado se aplicó la metodología del Despliegue de la Función Calidad. Se realizó un análisis de esfuerzos mediante la herramienta informática Solidworks®, cuyos resultados permitieron ratificar los parámetros y dimensiones seleccionados para la construcción del reactor. **Resultados:** Se seleccionó un reactor de doble tornillo con sección transversal en U con base plana. Se determinó que el calor necesario para llevar a cabo la reacción de pirólisis rápida fue 927 kJ/kg. Se seleccionó un tornillo sinfín de 1.68 m de longitud, 1.25 pulgadas de diámetro mayor y 1.5 pulgadas de paso, en acero inoxidable austenítico 316, accionado por un motorreductor de potencia 0.25 HP y torque 20 Nm. Para minimizar pérdidas de calor, se dispuso de una cinta calentadora de 0.1 W/cm² y un elemento aislante a base de fibra de vidrio, de espesor 130 mm, ambos alrededor del barril contenedor del reactor. **Conclusiones:** Se seleccionó el modelo de reactor de doble tornillo y sección transversal en forma de U con base plana por ofrecer mayor capacidad volumétrica de transporte y mayor capacidad de mezcla.

Palabras clave: Pirólisis rápida, Biomasa, Tornillo sinfín, Reactor, Diseño, Calor, Despliegue de la función calidad.

Abstract

Objective: To carry out the mechanical design of a screw reactor to obtain bio-oil by means of rapid pyrolysis of residual biomass. **Methodology:** To select the most suitable reactor, the Quality Function Deployment methodology was applied. A stress analysis was carried out using the Solidworks® computer tool, the results of which made it possible to ratify the parameters and dimensions selected for the construction of the reactor. **Results:** A twin screw reactor with a U cross section with a flat base was selected. The heat required to carry out the fast pyrolysis reaction was determined to be 927 kJ / kg. A 1.68 m long auger screw, 1.25 inches in diameter and 1.5 inches in pitch, was selected in 316 austenitic stainless steel, driven by a 0.25 HP power motor with 20 Nm torque. To minimize heat loss, a 0.1 W / cm² heating tape and a 130 mm thick fiberglass-based insulating element were both placed around the reactor container barrel. **Conclusions:** The model of a twin-screw reactor and a U-shaped cross section with a flat base was selected for offering greater volumetric transport capacity and greater mixing capacity. A 1-1/4" diameter was selected for the auger to avoid deflection issues.

Keywords: Fast pyrolysis, Biomass, Screw, reactor, Design, Heat, Deployment of the quality function.

Introducción

La creciente demanda de energía proveniente de combustibles fósiles y la disminución de la disponibilidad de estos últimos por su naturaleza no renovable, han planteado la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía que respondan a las continuas necesidades, no solamente de abastecimiento, sino también al mínimo impacto que pueda tener sobre el medio ambiente. El uso de biocombustibles surge como una alternativa viable para atenuar el impacto que ha generado el uso de los combustibles de origen fósil en el medio ambiente durante las últimas décadas. Muchos modelos de reactores se han diseñado con el fin de producirlos, algunos con mayores rendimientos y mayor factibilidad que otros. El tipo de reactor es uno de los factores que definen la calidad del producto final, junto con la composición de la materia prima de biomasa, el tamaño de las partículas y el sistema de condensación. Uno de los reactores más conocidos es el reactor de lecho fluidizado. Bamido [1] diseñó un reactor de esta naturaleza capaz de procesar biomasa con un peso de hasta 450 N en 15 segundos, produciendo biogás, bioaceite y bioaceite en los porcentajes 9.2%, 64.3% y 26.5% respectivamente. Un segundo tipo de reactor altamente estudiado es el reactor de lecho fluidizado circulante. Jo Yong Park et al. [2] estudió este tipo de reactores y concluye que su principal ventaja es la posibilidad de lograr una producción baja y controlable para biocarbón.

A nivel regional, Obando [3] implementó un reactor de pirólisis a escala de laboratorio y se caracterizó por medir 0,25 m de largo y tener una potencia eléctrica de $2,5 \times 10^{-4}$ kW. El material de construcción utilizado en el equipo fue cuarzo. El tornillo sinfín del reactor se conectó a un motorreductor capaz de variar el tiempo de residencia del equipo entre 1,25 y 25 min a temperaturas de reacción entre 450 y 600 °C. Las variables de diseño arrojaron un consumo energético de 93,25 Watt para mover el material dentro del reactor y de 68 Watt para el calentamiento de la biomasa hasta su transformación.

En el marco nacional, también se han llevado investigaciones relacionadas con el diseño y puesta en marcha de reactores para producir bioaceite a partir de la pirólisis rápida de biomasa. Pardo [4] analizó la producción de combustibles alternativos mediante pirólisis continua de polietileno de baja densidad. El cuerpo del reactor fue elaborado con un tubo de acero A304L Sch40 con una longitud de 50 cm con diámetro interno de 3.68 cm y un horno tubular eléctrico, con una temperatura de reacción de 600°C controlada por una termocupla tipo K. Con las condiciones de operación estudiadas se obtuvo una mayor proporción de gases, líquidos y sólidos, siendo la de los sólidos la de mayor porcentaje.

La biomasa es básicamente una fuente de energía solar almacenada por las plantas mediante el proceso de fotosíntesis. La energía que se origina de la biomasa es muy importante en una economía baja en carbono ya que se trata de materias orgánicas de origen vegetal o animal [5]. Estimar el potencial energético de la biomasa en Colombia es importante para su aprovechamiento, el cual dependerá de su composición química, del tipo de biomasa para determinar sus usos y por supuesto, de su disponibilidad [6]

En Colombia, la estimación de disponibilidad de biomasa residual agrícola destaca a los residuos de caña de azúcar y palma como las de mayor importancia debido a que cuenta con una producción permanente durante todo el año, en el caso de otros cultivos como el arroz, y maíz son estacionales, por lo cual, es importante pensar que para su aprovechamiento se requiere contar con sistemas de almacenamiento más prolongados. En la siguiente tabla se muestran el tipo de residuo para cada biomasa en particular y la cantidad obtenida por año para cada sector [7]

Tabla 1. Cantidad de biomasa residual agrícola

Sector	Residuo	Ton/año
Caña de azúcar	Bagazo	4.336.675
Palma de aceite	Raquis	4.709.985
Arroz	Cascarilla	2.078.073
maíz	Caña	912.659
Café	Pulpa	419.771
Total		12.457.163

Fuente: J. Rincón *et al.* [7]

A continuación, se muestran las principales propiedades fisicoquímicas de los tres productos agrícolas con mayor cantidad obtenida por año para cada sector [8, 9, 10].

Tabla 2. Caracterización de la cascarilla de arroz, bagazo de caña y raquis.

Parámetro	Cascarilla de arroz	Bagazo de caña	Raquis de palma	Promedio	Desviación estándar
% Humedad	6,6	51	60	39,2	23,34
% Cenizas	18,5	6,3	8,3	11,03	5,34
% Celulosa	36,03	50	43,2	43,08	5,7
% Lignina	18,49	23	19,5	20,33	1,93
% Hemicelulosa	45,48	35	32,7	37,73	5,56
% Carbohidratos	81,5	85	75,9	80,8	3,75
% Proteínas	1,7	3,31	8,9	4,63	3,08
% Lípidos	0,3	2,3	8,9	3,83	3,67
Densidad (kg/m ³)	747,5	768	786,4	767,3	15,89

Fuente: R. Arias y J. Meneses [8], L. Suárez [9] y E. Becerra [10]

Uno de los procesos utilizados para la transformación de la biomasa en productos útiles es la pirólisis rápida. La pirólisis rápida es un proceso a alta temperatura (425-500 ° C) [11]. en el que la biomasa se calienta rápidamente (> 1000 °C/min) en ausencia de oxígeno y en tiempos de residencia cortos (<2 s) [12, 13]. La biomasa se descompone generando vapores, aerosoles, y carbonizado en menor cantidad. Después del enfriamiento y la condensación de los vapores y aerosoles, se obtiene un líquido marrón oscuro con un poder calorífico de aproximadamente la mitad del aceite combustible convencional [14, 15]. El tamaño de las partículas de biomasa debe ser tal que favorezca las condiciones para la transferencia del calor proveniente del portador de calor. El tamaño generalmente usado es < 2mm [16], [17]. Para producción de bioaceite, se recomienda un contenido de humedad menor a 10% en peso para la biomasa, lo cual minimiza la cantidad de agua que se recolecta en el bioaceite final y disminuye los requisitos generales de energía térmica de reacción [18]

Los reactores del tipo tornillo son una tecnología relativamente nueva, Se caracteriza por tener la ventaja de controlar el tiempo de residencia mediante la velocidad del giro del tornillo sinfín [19], lo cual otorga una mayor orientación a los rendimientos de los productos deseados. Por otro lado, el reactor de tornillo

es una alternativa que al igual que otros reactores como el de cono giratorio o de lecho fluidizado, permite la operación en continuo, sin mostrar aparentes problemas en el escalamiento, por lo que contempla una alternativa interesante desde un punto de vista industrial [9, 20]. Es por esto por lo que, el reactor de este tipo es una tecnología usada para llevar a cabo pirólisis rápida de biomasa. Consta de un barril horizontal, de sección transversal definida, el cual contiene uno o varios elementos móviles (tornillo sinfín), que se encargan de mezclar y transportar simultáneamente partículas granulares de biomasa y arena previamente calentada; en el recorrido, ocurre la reacción de pirólisis rápida en la medida que la arena transfiere calor a la biomasa. El reactor cuenta con dos entradas de productos, una para la biomasa y otra para el portador de calor, y dos salidas, una para los productos sólidos y otra para la expulsión de los productos gaseosos [15].

Metodología

Dado que se pretende diseñar un reactor que pueda ser utilizado para cualquier tipo de biomasa, o en su defecto, para aquellos tipos de biomasa con mayor disponibilidad en Colombia, como primer paso, se realiza una ponderación de todas las propiedades de las biomásas tabuladas anteriormente, para obtener valores promedios sobre los cuales realizar los cálculos de dimensionamiento del reactor.

Se referenció en la literatura distintos tipos de reactores de tornillo, y a partir de allí, se llevó a cabo la metodología de Despliegue de la Función Calidad, para determinar cuál de los diferentes modelos era el más indicado técnica y económicamente para desarrollar la reacción de pirólisis rápida con los mejores resultados posibles. En la sección de Resultados, se muestra el esquema desarrollado en el cual se ponderan las principales características de cada reactor frente a las propiedades deseadas del producto final [21].

Definido el prototipo de reactor a utilizar, se prosiguió con los cálculos de las variables térmicas y mecánicas para el dimensionamiento de cada uno de los componentes de reactor. El proceso inició determinando las relaciones de flujos másicos y volumétricos de los reactantes y productos de la reacción, usando las expresiones empíricas de Heldman y Singh [22]. Teniendo este valor, se pudo determinar los flujos másicos de la biomasa y el portador de calor.

Sabiendo entonces la relación de kilogramos necesarios de cada uno de los componentes, se calculó la longitud a partir de distintos diámetros de tornillos sinfín.

Para la selección del diámetro del tornillo, se tuvo en cuenta que, por su longitud, el tornillo no presentara problemas de flexión, sin afectar la capacidad volumétrica del reactor.

Para los cálculos térmicos, cuyo objetivo fue determinar las pérdidas de calor presentes durante la reacción y seleccionar elementos calentadores y aislantes térmicos (el cual por costo se optó por aislante a base de fibra de vidrio) para mantener la temperatura de trabajo lo más cercano a los 500°C, se hizo uso de las ecuaciones de transferencia de calor por conducción y convección [23]. Se especificaron las propiedades térmicas de los materiales, y los variables límites de temperatura, para llevar a cabo la reacción. Se hizo uso de los números de Nusselt [24], de Grashof [25] y de Prandtl [26], con el fin de calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección (h), y mediante éste, calcular el diámetro del material aislante (el cual se asumió de forma cilíndrica hueca).

Teniendo definidos los parámetros dimensionales para el reactor, el siguiente paso fue realizar una simulación de análisis de esfuerzos en cuerpos finitos para el tornillo transportador a través de la herramienta informática Solidworks® [27].

Resultados Y Discusión

El primer paso fue obtener valores promedios de las propiedades fisicoquímicas de las principales muestras de biomasa con mayor disponibilidad en el territorio colombiano, sobre los cuales realizar los cálculos de dimensionamiento del reactor, y se muestran en la siguiente tabla.

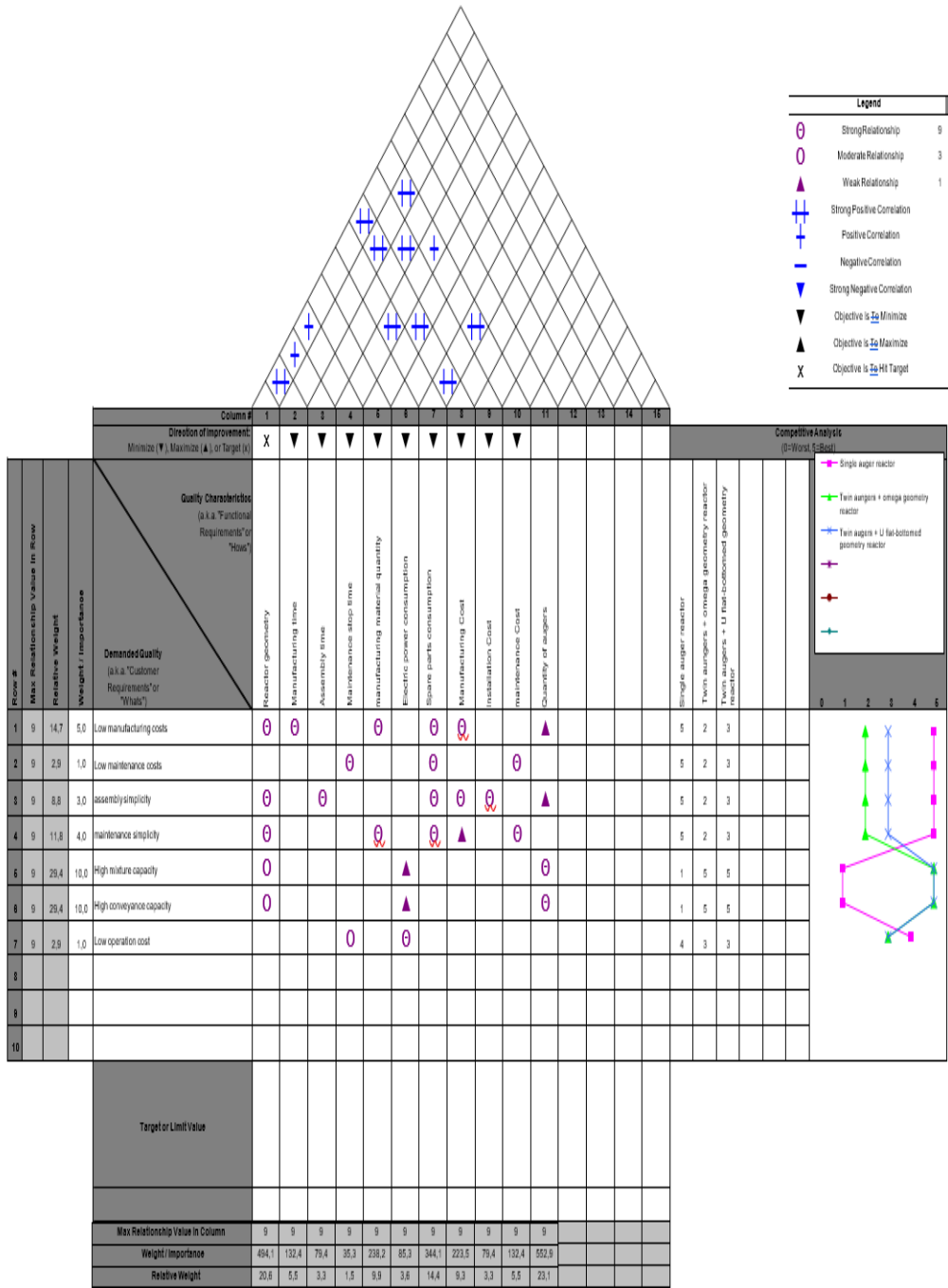
Tabla 3. Valores Promedio Biomasa para pirólisis rápida

Biomasa	
Humedad (w/w)	0,1
Densidad (kg/m3)	767,3
Carbohidratos (w/w)	0,808
Proteínas (w/w)	0,0771
Lípidos (w/w)	0,075
Cenizas (w/w)	0,1637

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el diagrama desarrollado de la metodología Despliegue de la función Calidad para la selección del modelo de reactor a utilizar

Figura 1. Diagrama Casa de la Calidad (Despliegue Función de la Calidad) para la selección del modelo de reactor de tornillo.



Fuente: Fuente: Elaboración propia

Del anterior diagrama, se pudo deducir que las dos características deseables más importantes fueron las capacidades de transporte y mezcla, y de los modelos propuestos, el reactor de doble tornillo era el que las cumplía a cabalidad. Dado que había dos modelos de doble tornillo, la siguiente característica más importante es el bajo costo de fabricación, y de los dos reactores, el de geometría en U con fondo plano fue el que cumplía con esta condición, frente a la configuración de omega.

Mediante las expresiones empíricas de Heldman y Singh [22], se calculó el calor específico de la biomasa.

C_p : calor específico [kJ/kg°C]

$$C_p = 1.424 \cdot m_{\text{carboñ}} + 1.549 \cdot m_{\text{proteína}} + 1.675 \cdot m_{\text{lípidos}} + 0.837 \cdot m_{\text{cenizas}} + 4.187 \cdot m_{\text{humedad}} \quad (1)$$

$$C_p = 1.95 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Con este último, se calcula el calor de pirólisis:

$$Q_{\text{pirólisis}} = C_p (T_f - T_i) = \left(\frac{1.95 \text{ kJ}}{\text{kg}}^\circ\text{C} \right) (500^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 926,89 \text{ kJ/kg} \quad (2)$$

Teniendo este valor, se pudo determinar los flujos másicos de la biomasa y el portador de calor, mostrando

$$\dot{m}_{\text{arena}} = \frac{926,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{0,8152 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^\circ\text{C} \cdot 100^\circ\text{C}} = 11,37 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (@1 \text{ kg/h biomasa}) \quad (3)$$

Sabiendo entonces la relación de kilogramos necesarios de cada uno de los componentes, se calculó la longitud a partir de distintos diámetros de tornillos sinfín, mediante la siguiente ecuación desarrollada por Pardo & Sierra [28]:

$$L_R = \frac{\left(\frac{\dot{m}_b - \dot{m}_{bc}}{\frac{p_{vap}}{R} T_{vap}} \right) \cdot t_{vap}}{\left[1 - \left(\tau_s \frac{\frac{\dot{m}_{HC}}{\rho_{HC}}}{\frac{\dot{m}_{HC} + \dot{m}_b}{\rho_{HC} + \rho_b}} \right) - \left(\frac{\dot{m}_{bc}}{\rho_{bc}} \left(\tau_s - \left(\tau_s \frac{\frac{\dot{m}_{HC}}{\rho_{HC}}}{\frac{\dot{m}_{HC} + \dot{m}_b}{\rho_{HC} + \rho_b}} \right) \right) \right] \left[\left(\frac{60 \cdot \left(\frac{\dot{m}_{HC} + \dot{m}_b}{\rho_{HC} + \rho_b} \right)}{RPM \cdot \text{paso}} \cdot FM \right) - 1,75 \frac{\pi}{4} \phi_{\text{tornillo}}^2 \right]} \quad (4)$$

Donde:

\dot{m}_b : flujo másico de la biomasa

\dot{m}_{bc} : flujo másico del biocarbón

\dot{m}_{HC} : Flujo másico del portador de calor (arena)

ρ_b : densidad de la biomasa

ρ_{bc} : densidad del biocarbón

ρ_{HC} : Densidad del portador de calor (arena)

t_{vap} : tiempo de residencia de los vapores en el reactor

p_{vap} : presión de los vapores

R : constante universal de los gases

PM_{vap} : peso molecular de los vapores

T_{vap} : Temperatura de los vapores

τ_s : porcentaje de llenado de sólidos dentro del reactor

RPM : velocidad de giro del tornillo

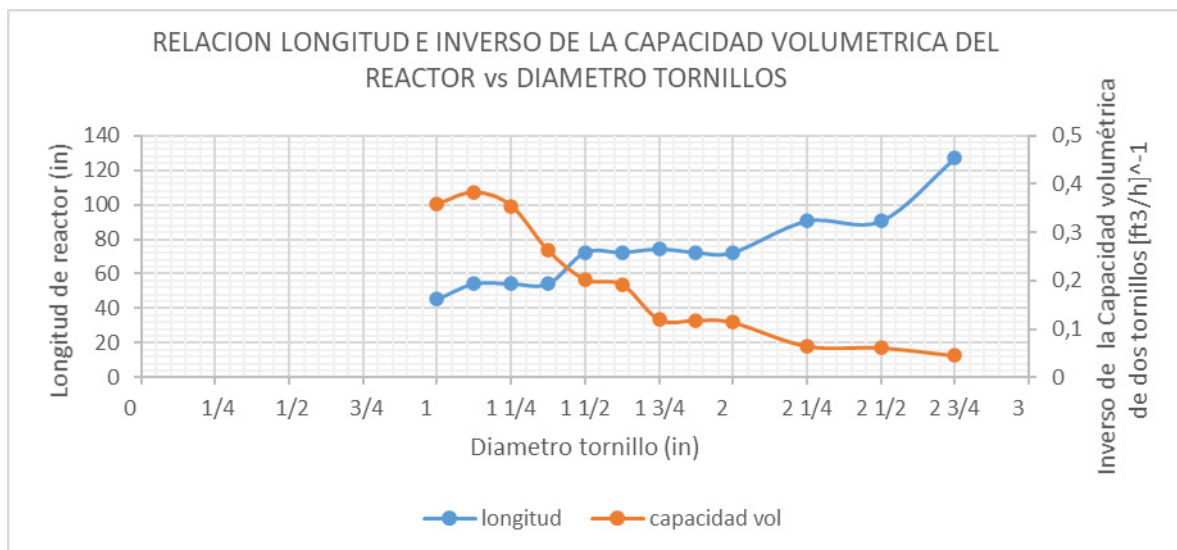
$paso$: paso del tornillo

FM : factor de material transportado

$\emptyset_{tornillo}$: diámetro del tornillo

En la siguiente figura se muestra la relación entre diámetro, longitud y capacidad volumétrica del tornillo.

Figura 2. Relación entre longitud de tornillo e inverso de su capacidad de transporte.



Fuente: Fuente: Elaboración propia

Para la selección del diámetro del tornillo, se tuvo en cuenta que, por su longitud, el tornillo no presentara problemas de flexión, sin afectar la capacidad volumétrica del reactor. Con base en esto, se seleccionó un diámetro de tornillo de 1-1/4", que, a pesar de no presentar un alto valor de capacidad volumétrica, su longitud no presenta problemas de flexión, los cuales se manifiestan para longitudes mayores a 60 pulgadas (1.5 m).

Con base en las dimensiones seleccionadas para el tornillo, los valores para cada una de las variables calculadas en este procedimiento se resumen en las siguientes tablas:

Tabla 4. Propiedades de entrada de Biomasa, portador de calor, biocarbón, productos sólidos y vapores.

Símbolo	Unidad	Descripción	Magnitud
\dot{m}_b	kg/h	Flujo másico de biomasa	17,98
ρ_b	kg/m ³	densidad de biomasa	767,3
Cp_b	kJ/kg °C	calor específico biomasa	1,95
\dot{V}_b	m ³ /h	flujo volumétrico biomasa	0,0234
T_{i_b}	°C	Temperatura inicial de biomasa	25
T_{f_b}	°C	Temperatura final de biomasa	500
\dot{m}_{pc}	kg/h	Flujo másico de portador de calor	204,44
ρ_{pc}	kg/m ³	Densidad portador de calor	1631
Cp_{pc}	kJ/kg °C	Calor específico de portador de calor	0,815
\dot{V}_{pc}	m ³ /h	Temperatura inicial portador de calor	550
$T_{i_{pc}}$	°C	Temperatura final portador de calor	450
$T_{f_{pc}}$	°C	Flujo volumétrico de portador de calor	0,125
Q_p	kJ/kg	Calor de pirólisis	926,25
Y_{bc}	-	Rendimiento de biocarbón	0,18
ρ_{bc}	kg/m ³	Densidad de biocarbón	400
\dot{m}_{bc}	kg/h	Flujo másico de biocarbón	3,2364
\dot{V}_{bc}	m ³ /h	Flujo volumétrico de biocarbón	0,0081
ρ_s	kg/m ³	Densidad de la mezcla de los productos sólidos	1556,35
ρ_s	lb/ft ³	Densidad de la mezcla de los productos sólidos	97,16
\dot{m}_s	kg/h	Flujo másico de la mezcla de los productos sólidos	207,57
\dot{m}_v	kg/h	Flujo másico de vapores	14,74
T_v	K	Temperatura de vapores	773
p_v	pa	Presión de vapores (atmosférica)	101325
PM_v	kg/kmol	Peso molecular de vapores	88,68
R	kJ/kmol K	Constante universal de los gases	8,31
R_v	kJ/kg K	Constante de vapores	0,094
ρ_v	kg/m ³	densidad de vapores	1,41
\dot{V}_v	m ³ /h	Flujo volumétrico de vapores	10,47
τ_s	-	Llenado volum. porcentual de sólidos en el reactor	0,5
τ_{pc}	-	Llenado volumétrico porcentual de portador de calor	0,42
τ_b	-	Llenado volumétrico porcentual de biomasa	0,08
τ_{N2}	-	Llenado volumétrico porcentual de nitrógeno	0,5
τ_{bc}	-	Llenado volumétrico porcentual de biocarbón	0,0272
τ_v	-	Llenado volumétrico porcentual de vapores	0,5528

Fuente: Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Dimensiones del tornillo transportador y el reactor

Símbolo	Unidad	Descripción	Magnitud
\varnothing_t	in	diámetro de tornillo	1,25
\varnothing_e	in	diámetro de eje de tornillo	0,3125
$Cap. eq.$	ft ³ /h @1rpm	Capac. volumétrica de arrastre de 1 tornillo a 1 rpm	0,0628
$Cap. eq.$	ft ³ /h @1rpm	Capac. volumétrica de arrastre de 2 tornillos a 1 rpm	0,0942
RPM	rpm	Velocidad de giro del tornillo	50
$Cap. req.$	ft ³ /h	Capacidad volumétrica requerida	4,71
$Cap. req.$	m ³ /h	Capacidad volumétrica requerida	0,1334
v_s	m/s	Velocidad de avance del material	0,032
A_b	cm ²	Área transversal ocupada por la biomasa	2,05
A_{pc}	cm ²	Área transversal ocupada por la arena	10,97
A_{total}	cm ²	Área transversal total ocupada	52,07
$A_{disp.}$	cm ²	Área transversal disponible	38,21
A_v	cm ²	Área transversal ocupada por vapores	21,08
t_v	s	Tiempo de residencia de vapores en el reactor	1
L_R	m	Longitud de reactor	1,38

Fuente: Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Requerimientos de potencia

Símbolo	Unidad	Descripción	Valor		
			Reactor	Portador de calor	Biomasa
F_d	-	Factor de diámetro de tornillo	1,95	1,95	1,72
F_b	-	Factor de rodamiento de tornillo	4,4	4,4	4,4
F_m	-	Factor de material a transportar	2	2	2
F_o	-	Factor de sobrecarga	3	3	3
F_f	-	Factor de hélice	1	1	1
F_p	-	Factor de palas	1	1	1
e	-	eficiencia del sistema	0,5	0,5	0,5
HP_m	HP	Potencia necesaria para mover el material	0,00414	0,0296	0,00443
HP_f	HP	potencia necesaria para mover los tornillos	0,0039	0,00197	0,0133
HP_{total}	HP	Potencia total del motor	0,048	0,189	0,106
T	lb*in	Torque necesario del motor	63,03	225,09	14,67

Fuente: Fuente: Elaboración propia

Una de las soluciones para el inconveniente de la deflexión en el tornillo, se evaluó el uso de un soporte intermedio, sin embargo, esta posibilidad puede presentar problemas de obstrucción de material, si no se toman medidas de prevención al respecto.

Para los cálculos térmicos, cuyo objetivo es determinar las pérdidas de calor presentes durante la reacción, se hizo uso de las ecuaciones de transferencia de calor por conducción y convección, con el fin de seleccionar elementos calentadores y aislantes térmicos (el cual por costo se optó por aislante a base de fibra de vidrio) para mantener la temperatura de trabajo lo más cercano a los 500°C. Se especificaron las propiedades térmicas de los materiales, y los variables límites de temperatura, para llevar a cabo la reacción.

Se hizo uso de los números de Nusselt [24], de Grashof [25] y de Prandtl [26], con el fin de calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección (h), y mediante éste, calcular el diámetro del material aislante (el cual se asumió de forma cilíndrica hueca). La ecuación que finalmente se determinó fue la

$$D = \frac{C^4}{2.3642} \times \frac{g \cdot \beta \cdot \mu \cdot C_p}{v^2} \times (T_s - T_\infty)^{-1/3} \times K^3 \quad (5)$$

Donde:

C : valor constante que depende de la geometría del cuerpo.

Para un cilindro hueco, $C = 0.53$

g : aceleración gravitacional [m/s^2]

β : coeficiente de expansión volumétrica $\left[\frac{1}{K}\right]$ $\left(\beta = \frac{1}{T}; \text{para gases ideales}\right)$

μ : viscosidad dinámica [$kg/m \cdot s$]

ν : viscosidad cinemática del aire [m^2/s]

C_p : calor específico del fluido [$J/kg \cdot K$]

T_s : temperatura superficial del cuerpo [$^{\circ}C$]

T_∞ : temperatura del aire lejano a la superficie [$^{\circ}C$]

K : conductividad térmica [$W/m \cdot K$]

A continuación, se resumen los resultados obtenidos:

Tabla 7. Resumen de cálculos térmicos del reactor de tornillos

Símbolo	Unidad	Descripción	Magnitud
T_1	K	Temperatura de las paredes del reactor	773
$K_{ac.inox.@773K}$	W/m K	Coefic. de conductividad térmica del acero a 773K	21.5
$K_{aislante}$	W/m K	Coeficiente de conductividad térmica del aislante	0.038
T_2	K	Temperatura de la pared interna del aislante	773.2
T_3	K	Temperatura de la pared externa del aislante	308
T_{aire}	K	Temperatura ambiente	298
$e_{reactor}$	M	Espesor de las paredes del reactor	0.00277
$\rho_{aire @298K}$	Kg/m ³	Densidad del aire a 298 K (25°C)	1.184
$C_{p_{aire}}$	J/kg K	Calor específico del aire a 298 K	1007
K_{aire}	W/m K	Conductividad térmica del aire a 298 K	0.02551
μ_{aire}	Kg/m s	Viscosidad cinemática del aire a 298 K	1.849×10^{-5}
ν_{aire}	m ² /s	Viscosidad dinámica del aire a 298 K	1.562×10^{-5}
$e_{aislante}$	m	Espesor del aislante	0.1315
\dot{Q}_{transf}	W	Calor transferido desde el interior del reactor hasta la superficie externa del aislante	87 015
$A_{ext.react}$	cm ²	Área superficie externa de reactor	2365.32
φ	W/cm ²	Potencia calorífica requerida	0.0736

Fuente: Fuente: Elaboración propia

Teniendo definidos los parámetros dimensionales para el reactor, el siguiente paso fue realizar una simulación de análisis de esfuerzos en cuerpos finitos para el tornillo transportador a través de la herramienta informática Solidworks® [27]. Los resultados de esta simulación se resumen en las siguientes tablas:

Tabla 8. Propiedades del acero inoxidable 316

Material	Acero inoxidable austenítico 316
Densidad	8 g/cm ³
Masa	0,962237 kg
Límite de elasticidad	250 MPa
Resistencia máxima a tracción	540 MPa
Módulo de Young	193 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3 su
Módulo cortante	74,2308 GPa

Fuente: Solidworks 2019 [27]

Tabla 9. Resumen de cargas sobre el tornillo sinfín

Tipo de carga	Magnitud
Fuerza radial de rodamiento 1	4,720 N
Fuerza radial de rodamiento 2	4,720 N
Peso del tornillo	9,440 N
Fuerza axial o de empuje	26,350 N
Torque motor	54,161 Nm
Momento de arrastre del material	1,150 Nm
Momento de fricción de rodamientos	0,00143 Nm

Fuente: Solidworks 2019 [27]

Los resultados del esfuerzo de tensión de Von mises sobre el tornillo sinfín [27] tuvieron como valor mínimo 1,43104 MPa, y un valor máximo de 117,618 MPa; el desplazamiento tuvo un valor mínimo de 0 mm y un máximo de 14,4809 mm, por último, el coeficiente de seguridad tuvo como valores mínimo y máximo 2,12553 su y 15 su, respectivamente.

Conclusiones

En el presente documento investigativo, se llevó a cabo el diseño mecánico para la construcción de un reactor de tornillos sinfín para producir bioaceite a partir de biomasa residual mediante pirólisis rápida.

En primer lugar, se caracterizaron las propiedades de una biomasa general, a partir de las propiedades físicas de las tres biomásas de mayor disponibilidad en el país: cascarilla de arroz, raquis de palma de aceite y bagazo de caña de azúcar. Los valores promedio de sus propiedades dieron lugar a las propiedades de la biomasa general, sobre el cual se realizó el diseño del reactor. Por consiguiente, éste es capaz de producir bioaceite, bajo ciertas condiciones, con un alto rendimiento de vapores condensables (60-70%). Además, se demandan ciertos requisitos previos a la entrada al reactor: un tamaño de partícula menor de 2 mm, el cual se puede obtener mediante el paso de la biomasa por un molino de cuchillas y un tamizado estándar; y un porcentaje de humedad menor a 10% en masa, lo cual se alcanza mediante secado en horno. Esto último es importante dado que la presencia del oxígeno en la biomasa disminuye el poder calorífico del producto final (bioaceite), dificulta la miscibilidad con otros combustibles y confiere inestabilidad, lo cual se traduce a aparición de reacciones secundarias, por lo general, de polimerización, con la consecuente sedimentación de los productos pesados. Además, el alto contenido de grupos oxigenados (entre ellos el agua) altera la presión de vapor, la viscosidad, y el punto de inflamación de la mezcla gasolina/bioaceite, diésel/bioaceite, lo cual trae como consecuencia pérdida de potencia, y en algunos casos problemas de cavitación en los motores. Asimismo, la aparición de humedad en la biomasa está relacionada con el bajo pH del bioaceite (de 2 a 4), confiriéndole la condición ácida y las implicaciones que conlleva a nivel de corrosión para materiales ferrosos.

Seguido a la caracterización de la biomasa y los tratamientos de la biomasa previos a su entrada en el reactor, se realizó la selección del modelo de reactor con mejores condiciones técnicas y económicas mediante la metodología Despliegue de la función Calidad, y su técnica más utilizada, la Casa de la Calidad. En ella se compararon tres modelos de reactores, todos tipos Auger o de tornillo sinfín: uno de un solo tornillo y dos modelos con dos tornillos cada uno. La diferencia entre estos dos últimos radicaba en la forma del canal contenedor: el primero consistía en un canal en forma de omega y el segundo, con un canal en forma de U con la base plana. Los resultados arrojaron que la mejor alternativa era el modelo de dos

tornillos con canal en forma de U plana. Entre sus ventajas se encuentran mayor capacidad volumétrica de transporte y mayor capacidad de mezcla, en comparación con el modelo de un solo tornillo; y menores costos de fabricación, debido a la simplicidad del canal, en comparación al modelo de doble tornillo con canal en omega.

Teniendo el modelo de reactor definido, se procedió al diseño del reactor. Los resultados de los flujos másicos y volumétricos de los reactantes y productos dependieron directamente de las propiedades térmicas de la biomasa y el portador de calor, dada la transferencia de calor necesaria para llevar a cabo la reacción de pirólisis. Por otro lado, otros valores, tales como la longitud del reactor, dependían en gran medida del diámetro del tornillo, entre otros factores.

En la figura 2, se ilustra los comportamientos de la longitud y el inverso de la capacidad del tornillo en función del diámetro del mismo. De ella se seleccionó un diámetro de 1-1/4" con el fin de conservar un equilibrio entre la longitud y la capacidad volumétrica del tornillo, debido a que valores mayores a este diámetro significaban mayores longitudes, y por consiguiente, inminentes problemas de deflexión en el tornillo; y menores diámetros representaban menores capacidades volumétricas. Para la selección de los tornillos para los alimentadores de biomasa y portador de calor se siguió el mismo lineamiento.

Los mecanismos de transferencia de calor presentes en el reactor son la convección y la conducción. Dado que el flujo de calor circula a través de paredes paralelas, éste se considera constante. El valor calculado fue 87.015 W. Se seleccionó una cinta calentadora de 0.1 W/cm², dada una densidad calculada de 0.07 W/cm². Además, se optó por un sistema de aislamiento térmico de banda cerámica con un espesor de 131.5 mm.

Para el sistema de transmisión de movimiento y potencia se optó por un sistema de engranajes rectos y se seleccionó un motor de 1/4 HP, 53 rpm y 20.3 Nm.

Para futuros trabajos, se recomienda implementar un sistema de control que permita intervenir las variables que influyen en el rendimiento de los productos finales tales como el flujo volumétrico de los reactantes, la presión y temperatura de trabajo. Se recomienda también pormenorizar en el diseño del sistema de recuperación de calor, como forma de continuación del presente trabajo. Por último, y con el fin de optimizar recursos para la fabricación del reactor, se propone también estudiar un modelo matemático que permita establecer la relación que existe entre cada uno de las variantes con el fin de predeterminedar el comportamiento en el rendimiento de los productos finales.

Referencias Bibliográficas

1. A. Bamido, "Design of a fluidized bed reactor for biomass pyrolysis", Master Thesis, University of Cincinnati, USA, 2018.
2. Jo. Yong Park Jae-Kon Kim, Chang-Ho Oh, Jong-Wook Park and Eilhann E.Kwon, Production of bio-oil from fast pyrolysis of biomass using a pilot-scale circulating fluidized bed reactor and its characterization, March 2019.
3. G. Obando, "Condiciones de diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos", Trabajo de investigación, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia, 2016
4. J. Pardo y V. Rodríguez, "Análisis de la producción de combustibles alternativos a partir de polietileno de baja densidad (LDPE) mediante pirólisis", Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.

5. Semana Sostenible, "Los secretos ocultos de la biomasa", *Revista Semana*, septiembre 2017.
6. J. Rincón y E. Silva. *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*, La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, Bogotá, 2015.
7. J. Rincón, D. Durán Hernández, O. Quintero Montoya, C. Duarte González, P. Guevara Patiño y M. Velásquez Lozano, "Disponibilidad de biomasa residual y su potencial para la producción de biogás en Colombia", *CIDET*, Centro de desarrollo industrial TECSOL – Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, noviembre 2018.
8. R. Arias, J. Meneses, "Caracterización fisicoquímica de residuos industriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol," Tesis pregrado, Depto. Química, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 2016.
9. L. Suárez, "Pirólisis del bagazo de caña panelera para la producción de combustibles líquidos", Tesis de Magister, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 2015.
10. E. Becerra, "Caracterización del desecho agroindustrial de la palma de aceite para el mejoramiento de las capas granulares de la estructura de pavimento" trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2017.
11. N. Gómez, S. W. Banks, D. J. Nowakowski, J. G. Rosas, A. V. Bridgwater, "Effect of temperature on product performance of a high ash biomass during fast pyrolysis and its bio-oil storage evaluation," *Fuel Processing Technology* Vol. 17, pp. 97-105, 2 April 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.11.021>
12. C. Wang, Z. Luo, S. Li, X. Zhu, "Coupling effect of condensing temperature and residence time on bio-oil component enrichment during the condensation of biomass pyrolysis vapors," *Fuel*, vol. 274, Article 117861, 15 August 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117861>
13. J. Montoya, F. Chejne-Janna, M. García-Pérez, "Fast pyrolysis of biomass: A review of relevant aspects. Part I: Parametric study", Washington State University, USA, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2015.
14. T. Lestander, L. Sandström, H. Wiinikka, O. Öhrman, M. Thyrel "Characterization of fast pyrolysis bio-oil properties by near-infrared spectroscopic data," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 13, pp. 9-15, 3 August 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.05.009>
15. J. Brown, "Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology", Master Thesis, Iowa state university, Ames, Iowa, USA, 2009
16. T. Hessing, "Quality Function Deployment (QFD) and House of Quality(HOQ), QFD tutorial online, disponible: <https://sixsigmastudyguide.com/house-of-quality-hoq/>, 2016.
17. J. Klinger, T. Westover, R. Emerson, C. Williams, J. Ryan, "Effect of biomass type, heating rate, and sample size on microwave-enhanced fast pyrolysis product yields and qualities," *Applied Energy*, vol. 228, pp. 535-545, 15 October 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.107>
18. G. Clavijo, "Formulación del modelo teórico del proceso de gasificación de biomasa de un reactor de lecho fijo", Tesis de grado, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia, 2015.
19. A. Díaz, J. Martínez, R. García, et al., "Análisis para la modelación y optimización geométrica de un reactor tipo tornillo sin-fin empleando el método de grafos dicromáticos", Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica, Habana, Cuba, 2015.
20. P. Brassard, S. Godbout, V. Raghavan, "Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production: A review," *Biosystems Engineering*, vol. 16, pp. 80-92, 1 September 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.020>

21. K. Guzmán, D. Castilla Caballero y J. Colina, "Diseño, construcción y evaluación de un reactor fotocatalítico solar de placa plana para degradar ácido tereftálico", Trabajo de grado, Facultad de Ciencias E Ingenierías, Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, 2015.
22. D. Heldman, R. Singh, Food process engineering, New York: Springer, 1981.
23. A. Funke, R. Grandl, M. Ernst, N. Dahmen, "Modelling and improvement of heat transfer coefficient in auger type reactors for fast pyrolysis application," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 1, pp. 67-75, 30 August 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.05.023>
24. W. Hussam, T. Tsai, G. Sheard, "The effect of rotation on radial horizontal convection and Nusselt number scaling in a cylindrical container," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 7, pp. 46-59, 7 October 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.007>
25. C. Ghernoug, M. Djezzar, A. Bouras, "The Natural Convection in Annular Space Located Between Two Horizontal Eccentric Cylinders: The Grashof Number Effect," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 293-302, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.034>
26. K. Gangawane, "Computational analysis of mixed convection heat transfer characteristics in lid-driven cavity containing triangular block with constant heat flux: Effect of Prandtl and Grashof numbers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 10, pp. 34-57, 5 February 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.061>
27. SolidWorks 2019, Dassault Systèmes SE, Suresnes, Francia, 2018.
28. J. Pardo, M. Sierra, "Diseño mecánico de un reactor de doble tornillo para la obtención de bioaceite mediante pirólisis rápida de biomasa residual," Trabajo de grado, Departamento de ingeniería mecánica, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, 2020.