



Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS)

Gabriel Andrés Obando

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2015

Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS)

Gabriel Andrés Obando

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director:
Ph.D. Walter Murillo Arango.

Línea de Investigación:
Línea de investigación en Biosistemas integrados

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2015

DEDICATORIA

*A mi familia, en especial y por encima de todo a mi madre! apoyo incondicional en
mi proceso académico Y MI VIDA.
A mi Ginna que trajo cambios positivos...
A mis amigos, los verdaderos! ... LQM*

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Manizales por construir conocimiento a través de esta maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente, al tutor y a todos los docentes por sus enseñanzas y formación. Mil gracias...

Resumen:

El crecimiento desmedido de la población, el poco espacio apropiado para disponer los residuos, el consumismo, y otros factores socio-culturales han llevado a un incremento de la contaminación causada por la generación y acumulación de residuos en el mundo. Colombia y específicamente la ciudad de Pasto no son ajenas a esta situación; en la ciudad de Pasto se generan alrededor de 6.359 Ton/mes de residuos sólidos, con una participación por habitante que pasó de 0.64 kg /habitante día en 1997 a 0.73 kg/habitante día en el 2003 un aumento del 14% (Alcaldía de Pasto, 2007), lo anterior precisa desarrollar procesos innovadores que permitan el tratamiento de los residuos, de los cuales más del 70% corresponden a Residuos Orgánicos Sólidos (ROS).

Esta investigación establece las condiciones de diseño de un reactor a escala de laboratorio para la transformación de ROS valorizándolos en un bioabono en fase sólida comúnmente denominado Biocarbón o Biochar, caracterizadas estas por un reactor de tornillo de 250 mm de largo y 10 mm de diámetro, con un flujo másico máximo de 1,55 g/min; energéticamente el sistema requiere un suministro de 93,25 Watt para mover los ROS dentro del sistema y 68 Watt para calentar los ROS hasta su transformación. El material del reactor es cuarzo debido a su alta conductividad térmica $7,5 \text{ Watt/m}^{\circ}\text{K}$ @ 20°C ; el calentamiento es provisto por un horno microondas doméstico modificado de 1200 Watt de potencia máxima para trabajar en un rango de temperaturas entre 450°C y 600°C , temperaturas donde se encuentra la mayor proporción de producto en fase sólida sobre la líquida y la gaseosa. La energía necesaria para el funcionamiento del horno se abastece de paneles solares con una inversión inicial de \$ 1.690.000 pesos colombianos. Finalmente el sistema cuenta con entrada de helio gaseoso que se encarga de proveer la atmosfera adecuada durante la pirolisis.

Palabras clave: pirolisis de tornillo, residuos sólidos, biocarbono.

Abstract:

The excessive growth of the population, bad appropriate space for disposing waste, consumerism, and other socio-cultural factors have led to increased pollution caused from the generation and accumulation of waste in the world. Colombia and specifically Pasto city are no strangers to this situation, in Pasto city are generated around 6,359 tons / month of solid waste, with a share per habitant which increased from 0.64 kg / per day in 1997 to 0.73 kg / per day in 2003, an increase of 14%, the above mentioned needs to develop innovative processes to treat waste, of which over 70% are Organic Solid Waste (ROS).

This project identified the design conditions of a laboratory scale reactor for processing ROS to a valuing biofertilizer commonly referred like Biochar or Biocarbón, characterized by a screw reactor of 250 mm long and 10 mm diameter, for a maximum mass flow of 1.55 g / min; the system requires a supply of 93.25 watt in order to move ROS into the system and 68 watt to heat up processing ROS; the reactor material is quartz because of its high thermal conductivity 7.5 Watt / m * K @ 20 ° C; heating provided by a modified microwave domestic 1200 Watt to work in a temperature range between 450 ° C and 600 ° C where the best performance of the solid phase, the energy required for operation of the furnace is obtained from a solar panel system with an initial investment of \$ 1,690,000; the system has helium gas inlet that is responsible for providing the right atmosphere during pyrolysis.

Key words: screw pyrolysis, solid waste, biochar.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras	X
Lista de tablas	XI
Introducción	12
1. Fundamentación Teórica	14
1.1 Los Residuos orgánicos sólidos (ROS)	14
1.2 Procesos termoquímicos	16
1.3 Transformación a través de pirólisis	16
1.4 Reactores pirolíticos	18
1.4.1 Reactor batch	18
1.4.2 Reactor semi-batch	19
1.4.3 Reactor de lecho fijo	20
1.4.4 Reactor de lecho fluidizado	21
1.4.5 Reactor de tornillo	22
1.5 Sistemas de calentamiento	22
1.5.1 Resistencias eléctricas	22
1.5.2 Microondas	23
1.5.3 Concentradores solares	23
1.6 Normatividad y políticas de residuos sólidos	23
2. Antecedentes de la investigación	24
2.1 Incineración	24
2.2 Gasificación	25
2.3 Compostaje y Lombricultura	25
2.4 Rellenos sanitarios	26
2.5 Casos varios	26
2.6 Biochar – Biocarbón	27
3. Objetivos y metodología general	29
3.1 Objetivos	29
3.1.1 Objetivo general	29
3.1.2 Objetivos específicos	29
3.2 Metodología general	29
3.2.1 Tipo de investigación	30
3.2.2 Condiciones de diseño de un reactor de pirólisis selectivo al producto sólido.	31

4.	Resultados y discusión	33
4.1	Selección de la tecnología	33
4.1.1	Reactor batch	35
4.1.2	Reactor semi-batch	35
4.1.3	Reactor de lecho fijo	35
4.1.4	Reactor de lecho fluidizado	36
4.1.5	Reactor de tornillo	36
4.2	Sistemas de calentamiento	41
4.2.1	Calentamiento por resistencias eléctricas.	41
4.2.2	Calentamiento por microondas.	41
4.2.3	Calentamiento por concentradores solares	42
4.3	Material del reactor	43
4.4	Variables de la pirolisis obtención al producto sólido	44
4.4.1	Temperatura de reacción	44
4.4.2	Tiempo de residencia – velocidad de reacción	44
4.5	Condiciones de diseño del reactor de pirolisis	45
4.5.1	Base de cálculo	45
4.5.2	Caracterización del reactor	46
4.5.3	Consideraciones generales del reactor	51
4.5.4	Cálculo del flujo del reactor	52
4.5.5	Tiempos de residencia	55
4.6	Valoración energética.	56
4.6.1	Potencia requerida en el tornillo	56
4.6.2	Elección del motor	58
4.6.3	Balance de Energía del sistema de calentamiento	59
4.6.4	Abastecimiento de energía	60
4.6.5	Consideraciones finales	62
	Conclusiones	64
	Recomendaciones	65
	Bibliografía	66

Lista de Figuras

		Pág.
Figura 1-1	Reactor Batch	19
Figura 1-2	Figura 1-2. Reactor semi batch	20
Figura 1-3	Reactor lecho fijo	21
Figura 1-4	Reactor lecho fluidizado	22
Figura 1-5	Reactor de tornillo	23
Figura 3-1	Bosquejo sistema de reacción - general	35
Figura 4-1	Bosquejo partes tornillo y barril del reactor.	47
Figura 4-2	Render sistema de reacción – 3D	62
Figura 4-3	Motor y tornillo acotado	62
Figura 4-4	Tolva, barril acotado y salidas de gas y sólido	62
Figura 4-5	Horno microondas acotado vista frontal	62

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Caracterización física de los residuos sólidos	15
Tabla 1-2: Caracterización química de los residuos sólidos	15
Tabla 1-3: Procesos termoquímicos	16
Tabla 1-4: Tipos de pirolisis	17
Tabla 1-5: Velocidades vs Productos	17
Tabla 4-1: Cantidad de referencia de tecnologías de pirolisis	34
Tabla 4-2: Criterios de búsqueda elegidos	35
Tabla 4-3: Aspectos y relevancia ponderada	37
Tabla 4-4: Calificación aspectos	38
Tabla 4-5: Matriz tecnologías de pirolisis	38
Tabla 4-6: Cantidad de patentes pirolisis tornillo	39
Tabla 4-7: Matriz patentes pirolisis de tornillo	39
Tabla 4-8: Sistemas de calentamiento	43
Tabla 4-9: Propiedades térmicas	44
Tabla 4-10: Propiedades químicas	44
Tabla 4-11: Propiedades eléctricas	44
Tabla 4-12: Especificaciones horno microondas	46
Tabla 4-13: Dimensiones del Tornillo Sinfín	50
Tabla 4-14: Flujos máxicos en función de la velocidad de giro	56
Tabla 4-15: Sistema de paneles solares	61

Introducción

La disposición de los residuos ha ocasionado problemas sociales y ambientales a través de la historia, en este sentido las comunidades han asumido el desafío de mejorar estas condiciones, estableciendo diferentes alternativas acordes a cada época y desarrollo de conocimientos, sin embargo con el tiempo se han convertido en soluciones poco eficaces y eficientes tal como los rellenos sanitarios (Noguera, 2010), una de las más recientes alternativas; a su vez, el crecimiento desmedido de la población, el escaso espacio apropiado para la disposición final de los residuos, el consumismo y otros factores de orden social, económico y cultural suman a la problemática (Noguera, 2010; Avendaño, 2015). Colombia y específicamente la ciudad de Pasto no son ajena a esta situación; la ciudad de Pasto genera 6.359 Ton/mes con una participación por habitante que pasó de 0.64 kg/habitante día en 1997 a 0.73 kg/habitante día en el 2003, un aumento del 14% en tan solo 6 años (Alcaldía de Pasto, 2007), lo anterior precisa desarrollar procesos innovadores que permitan el tratamiento de los residuos, de los cuales más del 70% corresponden a Residuos Orgánicos Sólidos (ROS).

En Colombia se han establecido diferentes estrategias dedicadas a la gestión de los residuos sólidos (MinAmbiente, 2002; MinAmbiente, 2005), desde hace más de dos décadas se han emitido normativas que permitan el control de la disposición (Presidencia de la república de Colombia. Decreto 2811 de 1974; Ministerio De Desarrollo Económico, Decreto 1713 de 2002; Gobierno Nacional, Ley 1259 de 2008) y del tratamiento de estos residuos (Gobierno Nacional, Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001; ICONTEC, 2007); una de las herramientas más difundidas a nivel nacional son los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) (Ministerio De Desarrollo Económico, Decreto 1713 de 2002; Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, Resolución 1045 De 2003) planes de accionamiento municipal que pretenden abordar la problemática desde la fuente (doméstica, comercial, institucional, etc.) con campañas de concientización para separar los residuos según su tipo, hasta promover la investigación y desarrollo de alternativas para la transformación, la disposición

final de los residuos, o en otros casos el tratamiento para los que no se pueden reciclar (Ministerio de Ambiente, 2007); sin embargo en su gran mayoría, los PGIRS no presentan opciones de valorización de los ROS (Alcaldía de Santiago de Cali, 2009; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2008).

Las alternativas más utilizadas en Colombia referentes a la gestión de residuos y particularmente los residuos orgánicos sólidos son técnicas de transformación y aprovechamiento tales como compostaje, biodigestores, lombricomposteo, y algunas alternativas de generación de biocombustibles (Alcaldía de Santiago de Cali, 2006; Jaramillo, 2008; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2008; Alcaldía de Pasto, 2007); puntualmente en la ciudad de Pasto, apenas cerca del 10 % de los residuos generados son transformados o reciclados, en cuanto a transformación o aprovechamiento se refiere, la opción más utilizada es el compostaje, realizado a mediana escala en empresas como Aproborca y a pequeña escala en fincas rurales (Alcaldía de Pasto, 2007; Aproborca, 2006); las otras alternativas mencionadas para el aprovechamiento de los ROS como biodigestión, lombricomposteo y otras alternativas para generar biocombustibles se realizan incipientemente en fincas de producción agrícolas (Alcaldía de Pasto, 2007; CORPONARIÑO, 2002; Argotty, 2009).

Opciones de transformación térmica de residuos tales como pirolisis o gasificación, procesos que ocurren en presencia de cantidades específicas de oxígeno (García, 1993) no se evidencian de ser utilizadas en la ciudad de Pasto; en consecuencia la mayor cantidad de residuos terminan en el relleno sanitario del municipio (Quiceno & Ramos, 2014; Argotty, 2009) incrementando la contaminación originada por la acumulación y el derivado desaprovechamiento de los ROS en la ciudad; de todo lo anterior resulta evidente la oportunidad de investigar un proceso alternativo que apunte a disminuir la contaminación causada por ROS valorizándolos en un producto favorable.

Se sabe de un material en fase sólida, que se obtiene mediante pirólisis de biomasa llamado Biocarbón o Biochar que promete por una parte, mejorar las condiciones del suelo aumentando la captación de nutrientes como ningún compostaje lo hace, siendo capaz de convertir tierra árida en tierra productiva, y por otra parte, mitigar el cambio climático almacenando las emisiones naturales de CO₂ en la tierra (Lehmann, 2003; Domene et al, 2014; Wang et al, 2014; Yin et al, 2014).

Esta investigación se dedica a establecer las condiciones de diseño de un reactor de pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de ROS, privilegiando las siguientes condiciones, una alternativa escalable

industrialmente con una tecnología que permita el estudio de la pirólisis mediante diversos parámetros, cuente con respaldo bibliográfico contundente, un diseño sencillo y de fácil transferencia tecnológica, económica tanto en sus materiales como en su implementación y energéticamente sostenible.

1. Fundamentación Teórica

El proceso para obtener Biochar transformando los Residuos Orgánicos Sólidos ROS se caracteriza por disponer de residuos orgánicos sólidos (ROS) que se pirolizan hasta obtener tres productos, un bioabono sólido (Biocarbón), la fase de interés de esta investigación, una fase líquida (bio aceite) y una fase gaseosa (gas de síntesis); para esto se requiere por una parte, identificar las variables de proceso tales como propiedades físicas y químicas de los ROS, cantidad y tamaño de muestra, temperatura del reactor, velocidad de reacción, presión y tiempo de residencia, y por otra parte, definir el tipo de reactor apropiado para la obtención el producto deseado (sólido en este caso), los materiales del reactor, el sistema de calentamiento y otras condiciones particulares del proceso. A continuación se establece los supuestos teóricos.

1.1 Características de Los Residuos orgánicos sólidos (ROS).

Las características más importantes a tomar en cuenta de la materia orgánica a transformar son:

- Poder calorífico
- Análisis elemental
- Tamaño de partícula
- Cenizas: contenido (C, Si, K, Na, P, Ca, Mg...) y punto de fusión
- Densidad y forma de la muestra
- Análisis inmediato

Estas variables son claves para definir la calidad y propiedades del bioabono sólido que se obtiene; por resultar tan complejo el control de cada una de las variables es aconsejable trabajar con muestras aleatorias tratando de obtener una homogenización completa de la materia prima, involucrando diferentes tipos de residuos orgánica más precisamente residuos orgánicos putrescibles.

La caracterización de los residuos sólidos manifiesta el potencial de transformación de ROS en Bioabono sólido, teniendo como factores de mayor relevancia, la cantidad de residuos orgánicos producidos que indica la disponibilidad de materia prima y el análisis elemental de los componentes que

muestra la cantidad de carbono disponible en los ROS necesario para obtener el bioabono sólido, en las Tablas 1-1 y 1-2 se consignan estos valores:

Tabla 1-1. Caracterización física de los residuos sólidos.

COMPONENTE	%
RESIDUOS ORIGEN ORGÁNICO	
Residuos de comida putrescible	70
Papel y cartón	8.31
Plástico	8.57
Textiles	1.41
Caucho	0.92
Maderas	0.73
Podas	0.39
RESIDUOS INORGÁNICOS	
Vidrio	3.92
Metales	1.51
Baterías	0.44
Otros	3.80

Fuente: elaboración propia a partir de Alcaldía de Pasto (2007).

Tabla 1-2. Caracterización química de los residuos sólidos.

PARÁMETRO	CONTENIDO
pH	5.52
Humedad	72.56
Material seco	25.96
Cenizas	30.15
Material orgánico	44.15
Nitrógeno	1.65
Fosforo	0.19
Potasio	1.91
Carbono	25.62

Fuente: elaboración propia a partir de Alcaldía de Pasto (2007).

Esta investigación en cuanto al requerimiento tecnológico para transformar los ROS se basa en procesos termoquímicos, los cuales se detallan a continuación:

1.2 Procesos termoquímicos.

Como su nombre lo indica se trata de las técnicas utilizadas para obtener una serie de productos de diferentes características y en diferentes estados de la materia a través del *tratamiento térmico* de una materia prima, la cual sufre una serie de *reacciones químicas* provocadas por diferentes temperaturas y otras variables a considerar (Arauzo et al, 2014; Fernández, 2011; Ripoll & Mauri, 2008); tal como se muestra en Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Procesos termoquímicos.

Procesos Termoquímicos	Fase del producto	Utilización del producto
Pirólisis	Gases	Energía
	Líquido: bio-oil (bio-aceite)	Energía y productos químicos
	Sólido: Bioabono	Fertilizante orgánico, sumidero de carbón, Energía.
Gasificación	Gases: Metano, Hidrógeno Gas de síntesis (CO, H ₂ ,...)	Energía Térmica, eléctrica y productos químicos
Combustión	Gases: Metano, Hidrógeno Gas de síntesis (CO, H ₂ ,...)	Energía

Fuente: elaboración propia a partir de (Arauzo et al, 2014; Chicaiza & Tania, 2015; Fernández, 2011; Ripoll & Mauri, 2008).

De los tres procesos descritos, la pirólisis se destaca básicamente por dos razones: una porque es accesible y asequible en las condiciones tecnológico-económicas del entorno donde se desarrolla la investigación y porque se obtiene el producto en la fase que pretende este trabajo.

1.3 Transformación a través de pirólisis.

El aprovechamiento energético de la materia orgánica es tan antiguo como el hombre, ya los egipcios utilizaban procesos de pirólisis para transformar madera en carbón, alquitrán y ácidos piroleñosos que empleaban para embalsamar. La pirólisis sufrió una época de retroceso, cuando después de la II Segunda Guerra Mundial los combustibles líquidos se depreciaron y su consumo explotó, sin embargo, la crisis energética del mundo ha estimulado de nuevo la investigación y desarrollo de los sistemas de conversión termoquímica de la materia orgánica, es así como la pirólisis resulta una alternativa ambiental atractiva, no solo como generadora de energía sino como vía de eliminación de residuos y mitigación para el cambio climático (García, 1993). La *pirólisis* se puede definir como la

descomposición térmica de un material en ausencia o mínimas cantidades de oxígeno (Castillo, 2008; Klug, 2013; Salvador, 2010).

El proceso de pirólisis puede ser definido por diferentes variables tales como: la velocidad de reacción, la temperatura, el tiempo de reacción o la presión de operación, a continuación se muestra como la temperatura define los tipos de pirólisis en primera instancia.

Tabla 1-4: Tipos de pirólisis.

TIPOS DE PIROLISIS	PRINCIPALES PRODUCTOS
Lenta (horas, días)	30 - 35 % Peso de bioabono sólido
Convencional (minutos)	20 - 25 % Peso bioabono sólido 10-15 % Peso bio-oil
Flash (segundos o menos)	40-60 % Peso bio-oil/gas

Fuente: elaboración propia a partir de (Klug, 2013; Castillo, 2008; Manals- Cutiño et al, 2015; Salvador, 2010).

Ahora se detalla las condiciones de proceso, haciendo énfasis en el tipo de pirólisis objetivo que es la que obtiene la mayor cantidad de producto sólido (Biochar - Bioabono sólido); tal como se muestra a continuación:

Tabla 1-5: Velocidades vs Productos.

PIROLISIS	TIEMPO RESIDENCIA	VELOCIDAD CALENTAMIENTO	PRESIÓN (BAR)	TEMPERATURA (°C MAX.)	PRODUCTO MAYORITARIO
Carbonización	Horas-días	Muy baja	1	400	Sólido
Convencional	5 – 30 min	Baja	1	600	Gas, líquido y sólido
Fast	0.5 – 5 min	Muy alta	1	650	Líquido
Flash líquido	< 1 seg	Alta	1	< 650	Líquido
Flash gas	< 1 seg	Alta	1	> 650	Gas
Ultra	< 0.5 seg	Muy alta	1	1000	Gas
Vacio	2 – 30 seg	Media	>0.1	400	Líquido

Fuente: elaboración propia a partir de (Gómez, Adolfo y Gil, 2015; Palacio S, 2010; Rodríguez, 2012).

La velocidad de reacción se puede entender como la velocidad correspondiente referida al tiempo necesario para que las partículas se calienten desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de transformación requerida. De acuerdo a lo anterior se establece que el término apropiado para determinar los tipos de pirólisis en esta investigación, es tiempo de reacción o tiempo de

residencia, expresada en horas o minutos. Este tiempo estará modelado por la ecuación 13.

Como se puede observar, las bajas temperaturas (hablando de temperaturas de pirólisis) y velocidades lentas de reacción (tiempos de residencia prolongados dentro del reactor) favorecen la producción del producto sólido, sin embargo, otra variable a tener en cuenta que indirectamente está relacionada con la temperatura, es la humedad de la muestra, ya que parte del calor transferido se emplea para evaporar la humedad de la muestra (Aguilera & Alvarado, 2015; Chocarro de la Fuente, 2015), se tienen indicios que la humedad de la muestra favorece la carbonización del producto y disminuye la formación de fase líquida (bio aceite) de manera que aunque su composición cualitativa permanece invariable se aprecian cambios cuantitativos (Beaumont y Schwob, 1984, citado por Kalogiannis et al, 2015; Mehrabian , 2014; Caballero, 1995; Montoya et al, 2015).

Finalmente es necesario nombrar la atmósfera de reacción, ya que es importante la ausencia o la menor cantidad de oxígeno posible en la reacción, es preferible usar nitrógeno o hidrógeno, sin embargo por razones económicas y de seguridad se sugiere trabajar con gases como metano, propano, GLP o helio.

1.4 Reactores pirolíticos.

Existen una gran variedad de trabajos sobre pirólisis tanto térmica como catalítica donde se emplean diferentes tipos de reactores. Resulta que la caracterización de cada uno depende de muchos factores, entre ellos, el tiempo de residencia, el tipo de contacto entre la muestra a degradar (directo - indirecto), el catalizador o las cinéticas de reacción, incidiendo en mayor o menor medida sobre los resultados obtenidos lo cual complica sustancialmente realizar un contraste objetivo con los resultados de cada investigación.

Sin embargo, entre los distintos tipos de reactores se pueden destacar los siguientes reactores:

1.4.1 Reactor batch.

Un equipo batch es un tipo de reactor caracterizado por poseer un depósito cubierto por una chaqueta calefactora y en la mayoría de los casos, por poseer un dispositivo de agitación mecánico (Acosta & Pérez, 2012; Scheirs & Kaminsky,

2006). Este tipo de reactores se caracteriza por no poseer flujos gaseosos inertes que vayan desplazando los volátiles desprendidos por la reacción (Basu, 2013; Lechuga, 2008), debido a esto ocurren reacciones secundarias (como lo son aromatizaciones o ciclaciones) que afectan el correcto desempeño del equipo en el sentido de que se obtienen productos no deseados.

Figura 1-1. Reactor Batch.



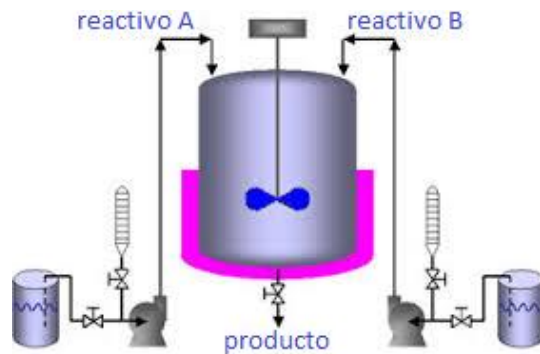
1.4.2 Reactor semi-batch.

Un reactor semi-batch es un tipo de equipo bastante similar al reactor batch, con la diferencia de que tiene un flujo de gas inerte (por lo general es nitrógeno) capaz de desplazar y guiar a los volátiles generados a otros sectores, disminuyendo las reacciones secundarias en el volumen del equipo (Coronel Aguilar, 2014; Acosta y Pérez 2012).

Por lo general, tanto los reactores batch, como los reactores semi-batch son escogidos dada la simplicidad que significa su diseño e implementación, lo que en muchos casos viene acompañado de un ahorro en los costos de la confección del equipo (Álvarez, 2015).. Sin embargo, este tipo de reactores se caracterizan por requerir tiempos de reacción elevados, lo que eleva los costos operacionales. Por ejemplo, el coque (o residuo carbonoso) que queda adherido a las paredes de estos equipos dificulta la transferencia de calor, elevando los tiempos de reacción y por ende los costos operacionales.

Por otra parte, los reactores semi-batch junto con sus similares batch, disminuyen la efectividad del catalizador, haciendo que los rendimientos obtenidos se mantengan similares entre las reacciones térmicas y las catalíticas (Sendrós, s/f).

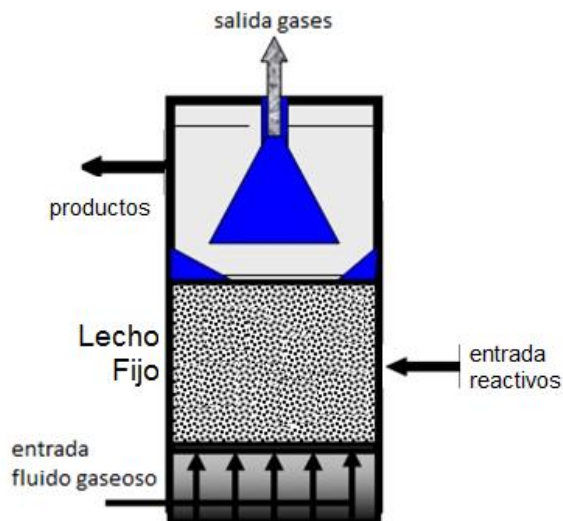
Figura 1-2. Reactor Semi batch.



1.4.3 Reactor de lecho fijo.

Un reactor de lecho fijo consiste en un tipo de equipo donde se sitúa el catalizador en una posición fija con respecto al reactor, permaneciendo inmóvil. A través de este lecho se hace circular el reactivo ya sea en estado líquido o gaseoso, teniendo como consecuencia la degradación de éste en el lecho. Este tipo de equipo es utilizado ampliamente en muchas reacciones catalíticas heterogéneas. Sin embargo presenta desventajas asociadas a las reacciones de pirólisis de residuos orgánicos (Basu, 2013; Bermejo, 2013; Arbeláez et al, 2013).

Figura 1-3. Reactor lecho fijo.



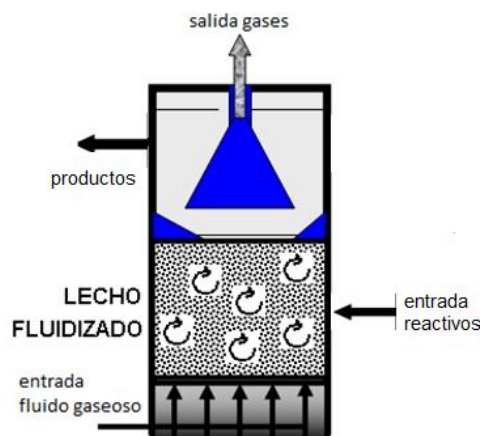
1.4.4 Reactor de lecho fluidizado.

A diferencia del reactor de lecho fijo, en el que el flujo de reactivos no provoca movimiento en el lecho de sólidos, en el reactor de lecho fluidizado existe un flujo ascendente que hace que las partículas del lecho se dispersen mejorando tremendamente la transferencia de calor y de masa en su volumen de reacción (Flores y Posada, 2007; Arauzo et al, 2014; Ángel et al, 2013). Justamente, la facilidad relativa en la que se dan estos fenómenos, es la ventaja clave que tiene este equipo frente al lecho fijo, manifestándose como una alternativa atractiva desde un punto de vista industrial, puesto que permite la operación en continuo de la pirólisis, sin necesidad de conllevar los problemas del lecho fijo que hacían dificultoso su escalamiento. Este tipo de equipos se caracteriza por tener un lecho que se moverá cuando el peso aparente de sus partículas sea igual o menor a la fuerza de arrastre originada por la velocidad del flujo del gas portador. En ese sentido, toma relevancia el factor de la velocidad de fluidización, parámetro clave que determinará la distribución de tiempos de residencia de los productos obtenidos en el reactor.

El reactor de lecho fluidizado, debe sus ventajas a factores como el buen contacto entre el catalizador y el reactivo, ocupando gran parte del volumen de reacción en llevar a cabo la pirólisis. Esto trae como consecuencia una operación sencilla sin formación de puntos calientes en la mayoría de los casos (de no existir canalizaciones) y de gradientes uniformes, facilitando el control y siendo una opción más real a la hora de pensar en su implementación a escala industrial.

Algunas desventajas halladas en este tipo de reactor, se relacionan con la necesidad de altos contenidos de catalizador para homogenizar el volumen del reactor y el desgaste de los sólidos y del reactor mismo producto de la fricción generada por el movimiento de las partículas en el lecho (Basu, 2013).

Figura 1-4. Reactor lecho fluidizado.



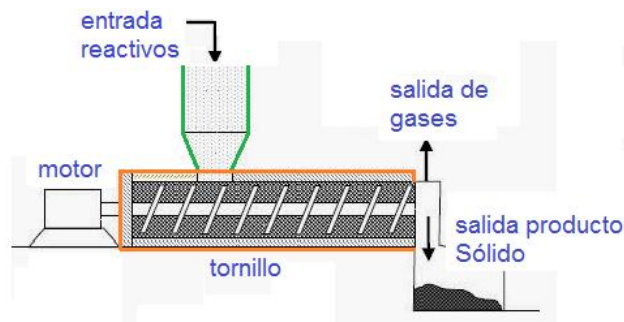
1.4.5 Reactor de tornillo.

El reactor de tipo tornillo, es un equipo que básicamente consiste en una tolva de entrada, por donde ingresan los reactivos a un tornillo sinfín encargado de transportar la materia prima a través de un barril calentado, donde se llevan a cabo las reacciones de transformación. En otras palabras es muy similar a una extrusora de polímeros.

Los reactores del tipo tornillo son una tecnología relativamente nueva en comparación a las anteriormente mencionadas. Se caracteriza por tener la ventaja de controlar el tiempo de residencia mediante la velocidad del giro del tornillo sinfín (Conesa, 2001; Díaz et al, 2015). Lo anterior es una ventaja en el sentido de que se puede otorgar una mayor orientación a los rendimientos de los productos deseados (Guzmán et al, 2015; Gómez, 2015, Aguado et al, 2006).

Por otro lado, el reactor de tornillo es una alternativa que al igual que otros reactores descritos, 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 (Cobo, 2012; Walendziewski, 2005).

Figura 1-5. Reactor de tornillo.



1.5 Sistemas de calentamiento.

En cuanto al sistema de calentamiento se destacan tres alternativas pertinentes para esta investigación por el uso de la tecnología, las cuales se describen a continuación:

1.5.1 Resistencias eléctricas.

Es un dispositivo sencillo que utiliza energía eléctrica convencional, es un horno de tipo modular, el cual se escoge de acuerdo a la potencia requerida, la cual es convertida en temperatura máxima de reacción por medio del uso de resistencias

eléctricas, se debe adaptar para las condiciones de operación requeridas (Ramírez González, 2009; Fuentes Hernández, 2005).

1.5.2 Microondas: resonante multimodo.

Básicamente es un horno microondas doméstico, que se adapta para la recogida de los gases y líquidos desprendidos en el proceso. Su potencia y frecuencia son fáciles de escoger por la oferta en el mercado, generalmente constan de una cavidad cuyas dimensiones son varias veces la longitud de la onda en al menos dos direcciones, pudiendo funcionar con un gran número de modos de resonancia. Las ondas se generan en el magnetrón, propagándose a lo largo de la guía de ondas. Estas ondas se dispersan a su paso por un dispositivo móvil con placas metálicas logrando así una distribución homogénea del campo eléctrico oscilatorio (Iguanzo, 2004; Fernández, 2010).

1.5.3 Concentradores solares.

Es un dispositivo adaptado para aprovechar la energía del sol a través de su concentración por medio de diferentes sistemas tales como colectores cilíndrico parabólicos, sistemas de receptor central y los discos parabólicos (Velasco, 2012), particularmente los dos últimos por alcanzar las temperaturas de reacción de pirolisis.

1.6 Normatividad y políticas de residuos sólidos.

La política para la gestión de los residuos sólidos (Ministerio Del Medio Ambiente; 2005.) ha establecido el marco normativo correspondiente a la estructuración de una metodología utilizada en el diseño de los planes para la gestión integral de residuos sólidos (PGIRS). Los PGRIS se vienen desarrollado en cada ciudad con sus respectivas entidades gubernamentales (Noguera & Olivero, 2004; Alcaldía de Pasto, 2007).

La correcta disposición está suficientemente reglamentado y documentado en Colombia Las leyes 09 de 1979, 142 de 1994, 430 de 1998, el Documento Conpes 2750 de 1994, los decretos 2462 de 1989 y 605 de 1996, varias resoluciones y el reciente Decreto 2981 de 2013 expedido por el actual Gobierno; así mismo el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, en conjunto con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, expidió el 25 de noviembre del

2014, la Resolución 0754, estableciendo la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de planes de Gestión (Presidencia de la Republica de Colombia, 2008).

2. Antecedentes tratamiento y disposición residuos sólidos

La necesidad de tratar y disponer los residuos sólidos ha llevado al desarrollo e implementación de alternativas pertinentes a cada época y tecnología accesible alrededor del mundo, se pueden citar como las más referenciadas (incineración, gasificación, pirolisis, vertimiento controlado, relleno sanitario, compactación, trituración, reciclaje, compostaje, lombricultura y biodigestión) (Jaramillo, 2008; Alcaldía de Pasto, 2007; Avendaño, 2015; MINAMBIENTE, 2008; Noguera, 2010), para el interés de esta investigación se describen a continuación las más comunes.

2.1. Incineración.

La incineración consiste en uno de los procesos utilizado en el tratamiento de los residuos sólidos con la finalidad de disminuir su volumen y aprovechar la energía que contiene (Romero Salvador, s/f; Sánchez Muños, 2015).

Los países industrializados con densidades altas de población han empleado la incineración como un procedimiento alternativo, la mayor tendencia en la actualidad en aplicación de esta alternativa es el caso de China que cambiaron de la tecnología de vertedero a la incineración, debido a la enorme ocupación de tierras causada por los vertederos (Xingang Zhao, 2015; Zhao Xin-gang, 2016). Sin embargo algunos aspectos medioambientales causan preocupación debido a las emisiones atmosféricas, especialmente las dioxinas, furanos y cenizas (Zhao Xin-gang, 2016).

En Países poco desarrollados industrialmente como los de América Latina y particularmente Colombia la incineración tiene una baja participación en el tratamiento de los residuos orgánicos sólidos, básicamente por la contaminación ocasionada a la atmósfera, los costos elevados que se requieren para instalar las plantas o por la falta de mercado (Sánchez Muñoz, 2015). En la ciudad de Pasto no se evidencian aplicaciones industriales ni estudios orientados a esta alternativa.

2.2. Gasificación

Se denomina gasificación al conjunto de reacciones químicas que ocurren en atmosferas con bajas cantidades de oxígeno y que obtiene como producto un gas combustible que contiene principalmente monóxido de carbono e hidrogeno que puede ser empleado para generar electricidad o ser utilizado como combustible en una turbina o en un motor (Gobierno Español,s/f; Pala, 2006).

Los sistemas de gasificación de biomasa de origen forestal, agrícola o urbanos se enmarcan dentro del desarrollo sostenible de los países, ya que se integran con planes de manejo de residuos sólidos, generando energía eléctrica, disminuyendo la dependencia energética de combustibles derivados del petróleo y reduciendo las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera (Clavijo, 2001; Kihedua, 2016).

Actualmente se han desarrollado investigaciones experimentales de gasificación por plasma de carbón evidenciando su potencial de electricidad de 100 kWatt (Messerle, 2016).

2.3 Compostaje y Lombricultura.

El compostaje es un proceso natural y bioxidativo, en el que intervienen numerosos y variados microorganismos aerobios que requieren una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, implica el paso por una etapa termófila dando al final como producto de los procesos de degradación de dióxido de carbono, agua y minerales, como también una materia orgánica estable, libre de patógenos y disponible para ser utilizada en la agricultura como abono acondicionador de suelos sin que cause fenómenos adversos (Arroyave & Vahos, 1999; Tortosa, 2011).

2.4 Rellenos sanitarios.

Esta alternativa tiene mayor tendencia en América Latina, concretamente en Colombia la gran mayoría de residuos son destinados a los rellenos sanitarios (Noguera & Olivero, 2004; Argotty, 2008; Quiceno, 2014; Alcaldía de Pasto, 2007). Los rellenos sanitarios no representan la mejor alternativa en cuanto a energías renovables, existen diversos problemas operativos, emisión de malos olores y un bajo manejo de la cobertura de residuos. (Contraloría general de Antioquia, 2005; Noguera & Olivero, 2004; Avendaño, 2015).

2.5 Casos varios.

En América Latina se encuentran experiencias motivadoras como una empresa pionera en el manejo de residuos orgánicos y del compostaje en Chile (Reciclajes Industriales S.A., 2008); el de México que presenta una variedad de alternativas, entre otros está el uso de la lombriz roja de California (*Eisenia foetida*) con la cual se obtiene la vermicomposta (Aguirre, 2007) o en Argentina con un proyecto innovador de la Escuela Técnico Agraria N° 4-035 Julia Silva de Cejas, ubicada en la localidad de Vista Flores, Tunuyán (UNCU, 2011).

En Colombia se adelantan los planes de acción de gestión de residuos (Alcaldía de Pasto, 2007), que en su mayoría han implementado procesos de compostaje, entre otros se pueden citar; el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos mediante procesos microbiológicos en Puerto Inírida – Guainía (Matíz, 2009) o elaboración de compost en Manizales a partir de residuos orgánicos urbanos (Castillo, 2007).

En el municipio de Pasto el aprovechamiento es relativamente bajo, solo se transforma 630 ton/mes, cantidad recolectada por APROBORCA que representa el 10% del total generado y el 14% del total de residuos orgánicos producidos, el resto de los residuos orgánicos es depositado en el relleno sanitario residuos (Alcaldía de Pasto, 2007).

La secretaria de agricultura y desarrollo económico del municipio de Pasto, implementa campañas de educación a los agricultores de la región mediante charlas, capacitaciones y propagandas radiales que llegan a la mayoría de las comunidades, con el fin de fomentar la utilización de bioabonos en reemplazo de los fertilizantes y abonos químicos (Alcaldía de Pasto, 2007; Liang, 2014).

2.6 Biochar – Biocarbón

Aparecen alternativas poco difundidas de tratamiento de los residuos orgánicos, como el proceso limpio que obtiene productos aprovechables entre los que se encuentra el llamado Biocarbón (Biochar) o Bioabono sólido, a continuación se relacionan algunas experiencias.

El biochar a nivel mundial y nacional es conocido como un derivado del carbón muy característico para mejorar las cualidades físicas y químicas del suelo, resulta de transformar biomasa por medio de un proceso de pirolisis; el biochar se puede utilizar como una enmienda en suelos contaminados en procesos de fitorremediación (Someus, 2013), además se presume que aumenta la fertilidad de suelos, aumenta la producción agrícola y ayuda a disminuir el cambio climático debido al secuestro de las emisiones de carbono (Lehmann, 2003; Domene et al, 2014; Wang et al, 2014; Yin et al, 2014),.

A nivel mundial se vienen realizando diferentes proyectos para comprobar su potencial como remediador de suelos y en sistemas de compostaje y tratamiento de Biochar hacia un tratamiento avanzado eficiente e integral de los bio-residuos y procesos de recuperación de nutrientes con emisiones cero, el Biochar es igualmente importante para el medio ambiente la protección del clima y la economía sostenible, básicamente existen dos tipos basados en biomasa, uno de tipo vegetal y otro de tipo animal (Novak, 2016).

Investigaciones en pirolisis muestran que a bajas temperaturas se favorece la producción de Biocarbón, es decir producto sólido (Gaunt, 2010; Luo et al 2014), quien afirma que el principal beneficio del Biocarbón sobre muchas otras tecnologías de bioenergía es la amplia variedad de materias primas que se pueden transformar para su producción; en Japón la corporación Kansai quien es pionera en el uso de biomasa para lograr reducciones del dióxido de carbono producido por el uso agrícola de carbón con su producto líder llamado BIO TAN (Kansai, 2010), otras experiencias como en China muestran potencial en la disminución de gases efecto invernadero (Li et al, 2014); en Italia procesos como el de la compañía A.G.T. que ha desarrollado uno que no genera polución, no genera ninguna salida hídrica y produce carbono vegetal puro (Bioabono) (A.G.T., 2011); o en la India casos como Appropriate Rural Technology Institute una ONG que sirve como instrumento de desarrollo sostenible a través de la aplicación del conocimiento científico y tecnológico (ARTI, 2012), casos de importancia en España como el estudiado de la emisiones de dióxido de carbono de suelos semi áridos recuperados con biocarbón o mezclado con minerales o fertilizantes

orgánicos (Fernandez et al, 2014), o el caso del estudio para establecer las necesidades en investigación de la pirolisis para propósitos de obtención de biocarbón (Manya, 2014). En América Latina también existe evidencia de algunos estudios como el del Efecto del Biocarbón combinado con fertilizantes orgánicos y microorganismos benéficos sobre el desarrollo, productividad y resistencia de las plantas (Henreaux, 2012), o el caso del uso de vinazas en suelos de caña de azúcar brasilera, donde muestran una disminución del carbono orgánico en estos suelos (Eykelbosh et al, 2014).

En Colombia se destacan propuestas como la de utilizar Biocarbón mezclado con abono que incrementa la materia orgánica del suelo (MOS) en forma rápida y sostenible (Luna, 2009); o la de la agroindustria de la palma aceitera con publicaciones favorables al desarrollo del Biocarbón (Fedepalma, 2008); o las propuestas del Biocarbón como un compuesto fertilizante para los cultivos (Ortega, 2009), también en la Reserva Natural La Pedregosa se ha desarrollado un proyecto el cual consiste en la construcción de tres grandes retortas (Reserva natural la Pedregosa, 2014) es decir, cajas selladas que se ponen dentro de los hornos que permiten que el operador pueda controlar la quema en un ambiente de bajo oxígeno con la finalidad de producir un promedio de una tonelada de carbón cada día (Rosales, 2008) y cargarla con materia orgánica para obtener mayores cantidades de biochar para mejorar el suelo.

En San Juan de Pasto no se encuentra documentación de procesos para producir Biocarbón o Biochar por pirólisis.

Finalmente se puede decir que existen diferentes procesos alrededor del mundo tanto para aprovechar los residuos orgánicos sólidos como para obtener Bioabono sólido de diferentes materias primas orgánicas; sin embargo, a nivel mundial no existe suficiente evidencia de investigaciones y procesos que utilicen específicamente los residuos orgánicos sólidos para obtener Biochar - Bioabono sólido; en Colombia y la región de Nariño no se encuentra documentación de estar utilizando esta alternativa.

3. Objetivos y metodología general

3.1 OBJETIVOS

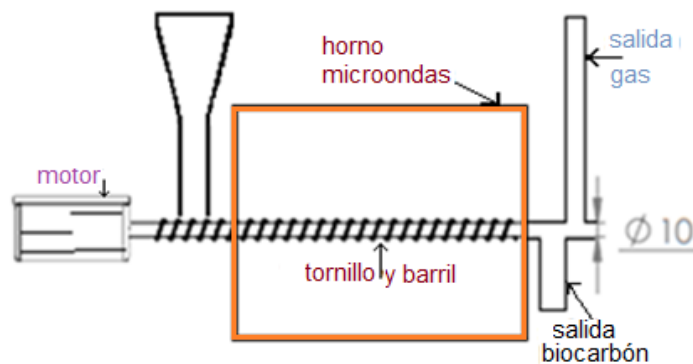
3.1.1 Objetivo general. Establecer las condiciones de diseño de un reactor de pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS)

3.1.2 Objetivos específicos

- Seleccionar de las tecnologías de pirolisis más utilizadas, una apropiada para el diseño del sistema deseado.
- Evaluar sistemas de calentamiento y materiales en reactores de pirolisis.
- Establecer las variables de reacción críticas para la selectividad hacia el producto sólido en la etapa de pirolisis.
- Valorar el consumo energético asociado a la tecnología seleccionada.

3.2 Metodología general

Figura 3.1 Bosquejo sistema de reacción - General.



El desarrollo de la investigación se llevó a cabo inicialmente seleccionando una tecnología de pirolisis apropiada, a partir del estudio de las tecnologías de pirolisis más utilizadas a nivel académico e industrial en los últimos 10 años, favoreciendo aquella con mayor versatilidad de escalado industrial, menos costos asociados a su implementación, con menos restricciones de operación y que se caracterice por obtener producto en fase sólida; posteriormente se eligió el sistema de calentamiento y los materiales del reactor, en cuanto al sistema de calentamiento se estudió los sistemas de calentamiento más referenciados en investigaciones en los últimos 10 años, inclinándose por aquellas con mayor versatilidad de

implementación, mínimas restricciones al momento del escalado y principalmente aquella con menor consumo energético; en cuanto a los materiales del reactor se tuvo en cuenta materiales, aptos para trabajar en sistemas de microondas, resistentes a la corrosión provocada por los ROS, con mayor transparencia a las microondas, y fundamentalmente materiales con mayor conductividad térmica; luego se estableció cuáles son las variables del proceso de pirolisis y que magnitudes, favorecen la mayor obtención de producto en fase sólida sobre la líquida y la gaseosa; posteriormente se estableció la caracterización del reactor tomando como base el uso de un horno microondas doméstico lo cual limitará las dimensiones del reactor y sus partes, para lo cual se tomaron las restricciones y condiciones del diseño de tornillos sinfín, tales como ángulo del hilo, cantidad de filetes o la relación largo/diámetro, la expansión térmica radial utilizada para determinar la tolerancia tornillo-barril variable crucial para disminuir el desgaste de las piezas, la alineación del tornillo sujeta a la colocación de bujes a los extremos del reactor, el sellado del sistema de reacción que establece la hermeticidad de los gases dentro del sistema de reacción provisto por materiales aptos para trabajar bajo microondas y el tiempo de residencia de los ROS; finalmente se estableció los consumos energéticos, el balance de energía y el sistema de suministro de energía.

Para lograr lo anterior, se estableció las condiciones de diseño de un reactor de pirolisis de residuos orgánicos sólidos a escala de laboratorio privilegiando las siguientes características:

- Ser una alternativa escalable industrialmente.
- Ser una tecnología que permita el estudio de la pirólisis mediante diversos parámetros.
- Tener un respaldo bibliográfico contundente.
- Poseer un diseño sencillo y de fácil transferencia tecnológica.
- Ser económico tanto en sus materiales como en su implementación.
- Ser energéticamente sostenible.

3.2.1 Tipo de investigación

La investigación se circunscribe en un estudio de corte cuantitativo, aplicando el método científico, que pretende describir las condiciones de diseño de un reactor de pirolisis apropiado para transformar Residuos Orgánicos Sólidos (ROS) en un bioabono sólido.

La unidad de análisis serán las tecnologías de pirolisis utilizadas en la transformación de Residuos Orgánicos Sólidos y las variables pertinentes para obtener una fase sólida como producto preferente.

3.2.2 Condiciones de diseño de un reactor de pirolisis selectivo al producto sólido.

- **Selección de la tecnología de pirolisis.**

Para la selección de la tecnología de pirolisis, se tomó aquellas que cumplan con las restricciones mencionadas arriba y las más utilizadas a nivel industrial y académico en los últimos 10 años. El criterio de selección privilegió la tecnología con mayor versatilidad de escalado industrial, menores costos asociados a su implementación, con menos restricciones de operación, menos productos secundarios no deseados y favorecer la obtención de producto en fase sólida.

Las tecnologías analizadas fueron: reactor batch, reactor semi batch, reactor de lecho fijo, reactor de lecho continuo y reactor de tornillo.

- **Evaluación del sistema de calentamiento y materiales del reactor.**

Se analizó diferentes sistemas de calentamiento y materiales del reactor, en cuanto al sistema de calentamiento preferiblemente se tuvo en cuenta los más referenciados a nivel académico en los últimos 10 años en sistemas de pirolisis y los criterios de selección privilegiaron la tecnología con mayor versatilidad de implementación, menos restricciones al momento del escalado y principalmente aquella con menor consumo energético.

Los sistemas analizados fueron: calentamiento por resistencias eléctricas, calentamiento por microondas y calentamiento por concentradores solares,

Para la selección de los materiales del reactor se tuvo en cuenta materiales, aptos para trabajar en sistemas de microondas, resistentes a la corrosión provocada por los ROS, con mayor transparencia a las microondas, y fundamentalmente materiales con mayor conductividad térmica.

Los materiales que se analizaron fue cuarzo y vidrio boro silicato llamado comúnmente vidrio Pyrex.

- **Determinación de las variables relevantes hacia el producto sólido.**

Dentro de las reacciones de pirolisis se tienen diferentes variables a tener en cuenta, la selección se enfocó en determinar cuáles son las más influyentes en la selectividad hacia el producto sólido.

Las variables que se tuvo en cuenta fueron: temperatura, velocidad de calentamiento, presión, humedad y tamaño de la muestra.

▪ **Caracterización del reactor**

Para establecer la caracterización del reactor se debe tener en cuenta que esta investigación pretende el reuso de un horno microondas doméstico convencional, en este sentido se tomó inicialmente para la base de cálculo del reactor, se tomó un horno caracterizado con 60 Cm de largo, 45 Cm de alto y 40 Cm de profundidad, a partir de esto se calculó el flujo másico y el flujo del reactor o flujo volumétrico, no obstante, para determinar la base de cálculo es necesario determinar otras variables las cuáles se describen a continuación.

Las otras características a tener en cuenta son las pertinentes a las disposiciones y partes del sistema de reacción, siempre limitadas como se dijo, por el tamaño del horno microondas. Estas son, el dimensionamiento del reactor que está sujeto a restricciones y condiciones del diseño de tornillos sinfín, tales como ángulo del hilo, cantidad de filetes o la relación largo/diámetro; la expansión térmica radial, utilizada para determinar la tolerancia tornillo-barril, crucial para disminuir el desgaste de las piezas; la alineación del tornillo sujeta a la colocación de bujes a los extremos del reactor; el sellado del sistema de reacción que establece la hermeticidad de los gases dentro del sistema de reacción provisto por materiales aptos para trabajar bajo microondas; finalmente se procedió a calcular el tiempo de residencia.

▪ **Valoración del consumo energético.**

A partir de la selección de la tecnología de pirolisis, la valoración de los materiales del sistema de reacción y el sistema de calentamiento, luego de determinar las variables influyentes en la selectividad hacia el producto sólido y establecer la caracterización del reactor; se procedió a valorar el consumo energético asociado, las cuales deben cumplir como primer aspecto la sostenibilidad energética del proceso y en segundo lugar ser accesible y asequible.

Inicialmente se estableció la cantidad de energía necesaria para mover el material dentro del reactor, esto por medio del cálculo de la potencia requerida por el tornillo, y con este dato elegir el motor reductor y las partes eléctricas del sistema apropiados; finalmente se calculó el balance de energía, el cual se calculó a partir de determinar la energía del sistema de calentamiento para obtener la temperatura máxima.

Las alternativas fueron dos: una, la energía solar a través de paneles solares y otra, la energía eléctrica obtenida de la red doméstica.

4. Resultados y discusión

4.1 Selección de la tecnología

De los reactores y hornos de pirolisis reportados en la bibliografía tales como discontinuo/batch, semi continuo/semi batch, lecho fijo, lecho en movimiento, lecho fluidizado, lecho fluidizado burbujeante, Auger/tornillo/barrena, ablativo/de abrasión, cono rotatorio y caída libre (Arbeláez et al, 2013; Martínez & Lora, 2015; Basu, 2010), se tomaron para su análisis las tecnologías de batch, semi batch, lecho fijo, lecho fluidizado y tornillo.

Teniendo en cuenta las restricciones definidas en la metodología, se procedió a seleccionar la alternativa más apropiada con base en la información encontrada en bases de datos de corte científico y académico, algunas libres como Google Académico y otras exclusivas asociadas a la biblioteca de la universidad de Manizales tales como Science Direct o Elsevier. Se utilizó métodos de búsqueda avanzado con operadores booleanos y palabras clave como: reactores+pirolisis; reactores+batch; reactores+semi+batch; reactores+lecho+fijo; reactores+lecho+fluidizado; reactores+tornillo.

En la tabla 4-1 se relaciona la cantidad de documentos encontrados aplicando los criterios de búsqueda en la base de datos de Google académico entre los años 2005 y 2016, también se muestra un filtro adicional considerando que las palabras de búsqueda estén relacionadas exclusivamente en el título del documento para reducir aún más el espectro de búsqueda.

Tabla 4-1. Cantidad de referencia de tecnologías de pirolisis según criterios de búsqueda.

Tecnología	Criterio de búsqueda	Filtrado por	No. de resultados
Batch	Pirolisis+reactor+batch	A	16.900
		B	0
	Pirolisis+"reactor batch"	A	64
		B	0
	Pirolisis+batch	A	625
		B	2
Semi batch	Pirolisis+reactor+semi batch	A	8.250
		B	0
	Pirolisis+"reactor semi batch"	A	27
		B	0
	pirolisis +"reactor semibatch"	A	12
		B	0
	pirolisis+"semibatch"	A	42
		B	0
	pirolisis+"semi batch"	A	27
		B	0

Tabla 4-1. Continuación

Lecho fijo	Pirolisis+reactor+lecho fijo	A	784
		B	0
	Pirolisis+"reactor+lecho fijo"	A	14
		B	0
	Pirolisis+lecho fijo	A	793
		B	0
Lecho fluidizado	Pirolisis+reactor+lecho fluidizado	A	577
		B	0
	Pirolisis+"reactor+lecho fluidizado"	A	11
		B	0
	Pirolisis+lecho fluidizado	A	935
		B	3
Tornillo	Pirolisis+reactor+tornillo	A	268
		B	0
	Pirolisis+"reactor+tornillo"	A	1
		B	0
	Pirólisis+tornillo	A	502
		B	0

Fuente: elaboración propia.

Dónde:

A: búsqueda sin filtro adicional.

B: búsqueda por palabras incluidas exclusivamente en el título.

La tabla 4-1 permite realizar dos análisis: el primero, que los resultados se reducen considerablemente por el filtro de palabras incluidas exclusivamente en el título, y el segundo, que es evidente que la cantidad de resultados está supeditada a los operadores booleanos y palabras clave utilizadas, en algunos casos arrojan un número excesivamente grande y en otros un resultado muy pequeño, inclusive cero. Debido a la heterogeneidad de resultados fue necesario establecer que criterios utilizar para la búsqueda de las tecnologías de pirolisis teniendo en cuenta siempre que se pretendía una muestra importante del universo de documentos de cada tecnología a revisar, en la tabla 4-2 se relacionan que criterios de búsqueda se utilizó para cada tecnología.

Tabla 4-2. Criterios de búsqueda elegidos.

Tecnología	Criterio de búsqueda
Batch:	Pirolisis+"reactor batch"
Semi batch:	Pirolisis+"reactor semi batch"
Lecho fijo:	Pirolisis+"reactor+lecho fijo"
Lecho fluidizado:	Pirolisis+"reactor+lecho fluidizado"
Tornillo:	Pirólisis+tornillo

La extensión de la información encontrada es enorme, resulta extremadamente complejo establecer una revisión de cada una de las referencias; por tal razón la información descrita de cada tecnología, el contraste y su discusión estarán limitados por una parte, por los alcances y lineamientos de esta investigación y

por otra, por el acierto del investigador en la pertinencia de las referencias citadas, tal como se muestra a continuación:

4.1.1 Reactor batch

Coronel Aguilar (2014) expone que los reactores de tipo batch poseen un diseño de fácil implementación, sin embargo es un equipo que promueve la aparición de productos secundarios no deseados (compuestos cíclicos, aromáticos, etc.) tal como lo expresa Acosta y Pérez (2012) debido a la no existencia de un flujo gaseoso que vaya desplazando los volátiles generados en la reacción, por esta razón esta tecnología es poco utilizada, siendo mejorada por el reactor semi-batch.

Por otra parte, este tipo de reactor opera exclusivamente de manera batch, haciendo que desde un punto de vista industrial esté en desventaja frente a aquellos que lo hacen de manera continua (Sendrós, s/f), sin embargo es una alternativa que promueve la obtención de producto en fase sólida (Basu, 2013).

4.1.2 Reactor semi-batch

El reactor semi-batch, posee características similares al batch, con la ventaja de orientar los productos a compuestos primarios de la pirólisis, restándole presencia a los componentes cíclicos y aromáticos (Coronel Aguilar, 2014; Acosta y Pérez 2012).

Los resultados obtenidos a través de los reactores de tipo semi-batch por lo general muestran selectividades altas hacia los líquidos (Quintero, 2008). Una variable a tener en cuenta es que el diseño sencillo influye directamente en el bajo costo de los materiales necesarios para la implementación de este equipo, sin embargo, este reactor también se caracteriza por limitar la transferencia de calor, lo cual aumenta los tiempos de las reacciones, consecuentemente reflejado en un incremento de los costos operacionales (Álvarez, 2015).

Al igual que el reactor de tipo batch, su versatilidad hacia un mayor escalamiento es limitada al operarse de un modo discontinuo (Sendrós, s/f).

4.1.3 Reactor de lecho fijo

El reactor de lecho fijo es uno de los equipos que obtiene mejores resultados en cuanto a la selectividad hacia productos líquidos, puede ser operado de manera

continua y batch lo que soluciona los vacíos que llevaron al descarte de las dos tecnologías anteriores. Sin embargo este tipo de reactor es propenso a sufrir obstrucciones en sus conductos a la hora de ser escalado (Burgos, 2015), además de presentar problemas de transferencia de materia y calor en el lecho, fenómenos más complejos en este tipo de equipo en comparación a otros (Basu, 2013; Bermejo, 2013; Arbeláez et al, 2013).

Este tipo de reactor requiere de pretratamientos que involucren la adición de presión y temperatura para facilitar el ingreso de los reactivos al lecho, o bien de la realización de una etapa de pirólisis térmica previa (Arbeláez et al, 2013; Conesa, 2001). En cualquiera de los casos, el diseño del equipo presenta varias limitantes para el objetivo de esta investigación y eleva los costos necesarios para su funcionamiento.

4.1.4 Reactor de lecho fluidizado

El reactor de lecho fluidizado permite la operación en continuo, siendo recomendada para un proceso industrial. El reactor de lecho fluidizado permite el estudio de la pirólisis mediante la modificación de diversos parámetros, en donde también se incluye la velocidad de fluidización (Flores y Posada, 2007; Arauzo et al, 2014; Ángel et al, 2013). En general, este tipo de equipo corrige las desventajas que presentan los reactores batch, semi-batch y de lecho fijo, siendo uno de los más utilizados en la investigación de pirólisis de diferentes materias primas (Arroyo et al, 2013). Además, una de las mejoras que presenta, es la facilidad con que se transmite el calor en el reactor, lo cual conlleva una selectividad hacia productos gaseosos no condensables (Arteaga, 2015); la desventaja de este método es que puede incrementar los gastos de electricidad.

Pese a las ventajas expuestas, es una tecnología que cumple un mejor trabajo bajo pirólisis rápidas obteniéndose como producto mayoritario la fase líquida (Arauzo et al, 2014).

4.1.5 Reactor de tornillo

El reactor de tornillo es un equipo que en general cubre todas los vacíos de las tecnologías anteriores, puede operar en modo continuo y batch, además de ser una alternativa con viabilidad de escalado industrial (Cobo, 2012; Walendziewski, 2005).

Un factor de importancia que posee este equipo es la posibilidad de controlar el tiempo de residencia de los reactivos mediante la velocidad del motor que gira el

tornillo (Conesa, 2001; Díaz et al, 2015), lo cual es un parámetro de control adicional al resto de las tecnologías revisadas, permitiendo el control de la conversión, selectividad y rendimiento necesario para maximizar la producción de sólido (Guzmán et al, 2015; Gómez, 2015, Aguado et al, 2006). Es importante mencionar que un parámetro fundamental para su diseño, es la capacidad de tratar una muestra heterogénea en cuanto a la forma, tamaño y densidad (Pellicer, 2015), aspecto evidente en los ROS. Una limitante de este reactor es la escases de trabajos investigativos en torno a esta tecnología, no obstante, esto abre oportunidades de realizar investigaciones en esta tecnología contribuyendo a su desarrollo epistemológico.

Se establecieron tres criterios para ponderar cada tecnología, aspectos técnicos, económicos y complementarios y de esta manera proceder a la selección de la más apropiada para el interés de esta investigación. En las tablas 4-3, 4-4 y 4-5 se discriminan las condiciones de cada uno de ellas para su mejor entendimiento.

Tabla 4-3. Aspectos y relevancia ponderada.

Aspectos	Relevancia ponderada %	observación
Selectividad producto sólido	25	Por ser el aspecto más relevante de la investigación
Fácil diseño	15	Factor importante para su implementación.
Fácil operación y mantenimiento	15	Factor importante al momento de operación
Altos costos asociados	15	Por los costos de inversión inicial, mantenimiento y operación
Sub productos no deseados	10	No supone mayor problema de operación pero no se desean.
Bajo consumo energético	10	Por la eficiencia energética del proceso
Fácil escalado	5	Si bien se desea escalar el proceso, no es una variable determinante para la escala de laboratorio
Suficientes antecedentes	5	Se considera que las referencias establecen la información suficiente para el diseño de las tecnologías
TOTAL	100	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4-4. Calificación aspectos.

Calificación	
muy importante	5
importante	3
poco importante	1

Fuente: elaboración propia.

Tomando la relevancia ponderada de cada aspecto y la calificación que se le asignó a cada una de acuerdo a la teoría estudiada, se elaboró la siguiente tabla que muestra en resumen el total de cada tecnología.

Tabla 4-5. Matriz tecnologías de pirolisis.

Aspectos		Fácil diseño	Subproductos no deseados	Selectividad producto sólido	Fácil escalado	Bajo consumo energético	Suficientes antecedentes	operación y mantenimiento	Altos costos asociados	total
Tecnología	ponderación máxima	15	10	25	5	10	5	15	15	100
Batch		5	1	1	2	4	5	4	4	3,05
Semi batch		5	4	1	4	4	5	4	4	3,45
Lecho fijo		4	5	1	2	4	4	2	2	2,65
Lecho fluidizado		3	5	1	4	2	4	2	4	2,7
Tornillo		4	5	5	4	2	2	3	4	3,9

Fuente: elaboración propia a partir de (Basu, 2010; Coronel Aguilar, 2014; Álvarez, 2015; Acosta y Pérez 2012; Sendrós, s/f; Quintero, 2008; Burgos, 2015; Bermejo, 2013; Arbeláez et al, 2013; Arauzo et al, 2014; Ángel et al, 2013; Arteaga, 2015; Cobo, 2012; Walendziewski, 2005; Gómez, 2015; Aguado et al, 2006; Cobo, 2012; Walendziewski, 2005; Flores y Posada, 2007; Díaz et al, 2015; Pellicer, 2015; Martínez & Lora, 2015; Basu, 2010; Conesa, 2001; Arroyo et al, 2013; Guzmán et al, 2015)

Los resultados de la matriz arrojan que la tecnología que más se ajusta a los requerimientos de la investigación es el reactor de tornillo con una calificación ponderada de 3.9.

Una vez escogida la tecnología, se procedió a establecer su estado del arte, para lo cual se revisó la base de datos de las patentes de Google, incluyendo la oficina de patentes de Estados Unidos, Europa y China. Se utilizó métodos de búsqueda avanzados con operadores booleanos y palabras clave como: pirolisis+reactor+tornillo, pirolisis+tornillo. En la tabla 4-6 se relaciona la cantidad de patentes encontradas de pirolisis de tornillo de acuerdo a los criterios de búsqueda.

Tabla 4-6. Cantidad de patentes de pirolisis de tornillo según criterios de búsqueda.

Criterio de búsqueda	No. de resultados
pirolisis+reactor+tornillo-gasificación	24
pirolisis+tornillo-gasificación	28

Fuente: elaboración propia.

Los criterios de búsqueda arrojaron una cantidad razonable de documentos para el contraste y discusión de los resultados de la investigación.

En la tabla 4-7 se relacionan algunas patentes o solicitud de patente de pirolisis de tornillo.

Tabla 4-7. Matriz patentes pirolisis de tornillo.

Patente	Título	Autor (es)	Estado/año publicación	Materia prima	Observaciones	Características
WO 2012127084 A1	Aparato basado en un transportador de sólidos y su uso	MARTÍNEZ Tomás GARCÍA, Villuendas Ramón Murillo	Publicada/2012	Biomasa	Resuelve problemas energéticos, no utiliza gas de arrastre.	Reactor de tornillo perforado que permite el intercambio de calor de un fluido que permite secar y pirolizar la biomasa, obtiene producto en fase líquida.
WO 2010124406 A1	Equipos y un proceso para generar biocombustible a partir de pirólisis rápida de biomasa	Wilkomirsky, F.I	Solicitada/2010	biomasa	Se enfoca en la obtención de fase líquida, Mejora las condiciones energéticas del estado del arte pero no resuelve la ineficiencia de transferencia debido a la conducción y convección entre los diferentes sistemas.	Sistema de tres reactores de lechos fluidizados en serie, con tornillo a temperaturas entre 350 hasta 950°C. Tiempo de residencia varía entre 0,1 hasta 30 segundos
WO 2005044952 A1	Máquina ecológica procesadora de desechos orgánicos e inorgánicos	Gomez R.A et al.	Publicada/2005	Residuos orgánicos e inorgánicos	Obtiene las tres fases, gas, líquido y sólido. Requiere de gas y electricidad. No resuelve los problemas de evaporación de agua y los altos consumos energéticos.	Reactor de tornillo, a vacío que opera temperatura de 250 a 410° C y 10 a 35 mm Hg
WO 2008066950 A3	Miscible, multi-component, diesel fuels and methods of bio-	Thomas Adams, Manuel García, Dan Geller, John W Goodrum, Joshua T	Publicada/2009	Biomasa	Limitaciones energéticas para su escalado industrial por utilizar energía	Reactor de tornillo, Calentamiento entre 350 y 700 °C, obtención de fase

	oil transformation	Pendergrass			eléctrica para el calentamiento	liquida como producto principal en 10 minutos de reacción.
WO 1999009115 A1	A method and apparatus for gasifying or liquefying biomass	Alex E S Green	Publicada/1999	Biomasa	Posible baja transferencia de calor y difícil de controlar debido al uso de dos zonas de transferencia, el del reactor de pirólisis y la cámara de combustión	Reactor de tornillo, el calentamiento se da por contacto con un portador de calor que en este caso es parte del carbonizado producido.
WO 2009138757 A2	Thermal treatment of biomass	Andreas Hornung, Andreas Apfelbacher	Publicada/2009	Biomasa	Resuelve inconvenientes energéticos de otras tecnologías, pero reduce la eficiencia global del proceso al recircular el Biocarbón obtenido.	Doble tornillo en direcciones opuestas, sin gas de arrastre, trabaja a 600°C la etapa de pirolisis. Recirculación de productos para mejorar balance de energía.
RU2346026 (2)	Método para producir gas de síntesis y carbón biomasa pirólisis. Traducido del Ruso	Baybursky Leonovich Vladimir (RU), Shapovalov, Vyacheslav Dmitrievich (RU), Hombre Gennady Stepanovich (RU), Nightshade Viktor (UA)	Publicada/2009	Biomasa	Limitaciones por bajos coeficientes de transferencia de energía debido a las bajas superficies de contacto por la configuración	transferencia de energía se realiza de forma convectiva entre las paredes de la cámara del reactor y las partículas de biomasa, y el medio de calor lo abastece una cámara de combustión

El estudio de las tecnologías relacionadas en la tabla 4-7 muestra mejoras sistemáticas a través del tiempo en cuanto a la eficiencia de transferencia de calor y el consumo energético. A excepción de la patente WO 2012127084 A1 las demás tecnologías presentan limitaciones en este aspecto, sea por los inconvenientes asociados a la etapa de evaporación del agua de la materia prima o por la requerimiento de equipos adicionales para mejorar la transferencia de calor. Es importante decir que del análisis del estado del arte, se establece que algunos resultados de los criterios de búsqueda incluían tecnologías de gasificación incorporadas a etapas de pirolisis lo cual reduce la cantidad real de patentes que se asemejen a los lineamientos de esta investigación, y por otra parte que es crucial innovaciones que cubran los vacíos del aprovechamiento de sistemas de calentamiento que reduzcan el consumo energético y mejoren el balance de energía global vs cantidad de residuos procesados.

4.2. Sistemas de calentamiento

Un apartado muy importante en la selección del paquete tecnológico; existen diferentes fuentes para proveer el sistema de calentamiento, se pueden citar productos piroleñosos, gas, resistencias eléctricas y microondas como las principales; sin embargo los residuos piroleñosos y el gas no se tomaron en cuenta para el análisis por pretender un sistema de bajo impacto ambiental y que pueda funcionar con energía renovable, si bien se podría analizar e implementar un sistema de generación de biogás, estaría sujeto a otro análisis más profundo y no representa los intereses de esta investigación. Así entonces se presenta a continuación dos tecnologías considerables resaltando los parámetros de selección.

4.2.1 Calentamiento por resistencias eléctricas.

Existen numerosas investigaciones y aparatos industriales que operan con este sistema (Riquelme, 2014; Carranza et al 2014; Morales, 2012; Hidalgo et al, 2014); sin embargo, la forma en que los materiales se calientan (de afuera hacia adentro) representa una deficiencia en la transferencia de calor del sistema (Riquelme, 2014), por otra parte el mantenimiento de las resistencias una vez implementado el montaje dificultan y elevan los costos de operación (Alessandrini, 2014).

A pesar de algunas dificultades que presenta este sistemas de calentamiento no se descarta su posible utilización.

4.2.2 Calentamiento por microondas.

Existen numerosas investigaciones de tratamientos térmicos de diferentes materias primas entre las que resaltan lodos EDAR's en donde se han validado las ventajas de utilizar este sistemas de calentamiento (Iguanzo, 2004) y las síntesis de nano partículas (Gómez & Garib, 2014); por otra parte se pueden citar ventajas para la pertinencia de esta investigación, entre otras que, este sistema de calentamiento permite reducir el contenido de humedad de la muestra (evaporación) en el mismo recinto de la pirólisis y no necesita etapas previas de secado, lo cual reduce el consumo de energía, disminuye tiempos de operación y gastos de pretratamiento (Reyes, 2013; Hoogenboom, 2009); otra consideración de importancia es la forma del calentamiento de las microondas, que se da de

adentro hacia afuera del material permitiendo mejor transferencia de calor en la muestra (Garino et al 2013).

A pesar que existen algunas consideraciones a tener en cuenta como la generación de puntos calientes (Ruisanchez et al, 2014), la poca información disponible de investigaciones y resultados, y que no se pueden calentar todo tipo de material, es una tecnología apropiada para el interés de esta investigación.

4.2.3 Calentamiento por Concentradores solares.

Esta es una tecnología apta para trabajar en zonas donde no existan o sea difícil el acceso a redes de energía eléctrica, difícil provisión de gas o gasolina.

Una de las principales desventajas es la limitación de la zona de calentamiento (Carletto et al, 2013; Saravia et al, 2001), la gran extensión que se requiere para implementar el espejo paraboloide, caracterizados en su gran mayoría por un diámetro de 2,8 m para un foco de apenas 15 cms (Velasco, 2012); por otra parte, no es una tecnología de fácil acceso y es necesario conocimientos bastante específicos para su instalación.

Sin embargo es una tecnología que no se descarta para su posible utilización.

En la tabla 4-8 se resumen los sistemas de calentamiento, realizando una evaluación de las mejores características de cada una, con el ánimo de identificar con facilidad que tecnología resulta más apropiada para el interés de esta investigación.

Tabla 4-8. Sistemas de calentamiento.

Tecnología	Fácil diseño	Fácil implementación	Fácil acceso	Versatilidad de escalado	Bajo consumo energético	Suficientes antecedentes	Altos costos asociados
Resistencias eléctricas	Si	Si	Si	No	No	Si	Si
Microondas	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No
Concentradores solares	Si	No	No	No	Si	No	Si

Fuente: Elaboración propia a partir de (Riquelme, 2014; Carranza et al 2014; Morales, 2012; Hidalgo et al, 2014; Alessandrini, 2014; Iguanzo, 2004; Gómez & Garib, 2014; Reyes, 2013; Hoogenboom, 2009; Garino et al 2013; Ruisanchez et al, 2014, Carletto et al, 2013; Saravia et al, 2001; Velasco, 2012)

Los tres sistemas presentan posibilidades de utilización, sin embargo la opción de las microondas se destaca fundamentalmente porque resuelve el problema de la transferencia de calor para la etapa de evaporación del agua de los ROS y optimiza el uso de la energía por volumen de materia prima transformada.

4.3 Material del reactor

Debido al uso de microondas para el sistema de calentamiento, la selección del material del reactor estará restringida. Existen muchos materiales disponibles en el mercado aptos para el calentamiento mediante microondas, para el interés de esta investigación convienen materiales transparentes que permitan el paso de las microondas a través de estos, por esto y por cuestiones de disponibilidad y de accesibilidad se plantearon dos materiales a tener en cuenta, vidrio y cuarzo.

El vidrio presenta ventajas económicas frente al cuarzo, sin embargo una limitante en su uso radicaría al momento de hacer pruebas a temperaturas elevadas alrededor de los 1000 °C, sin embargo si las temperaturas están por debajo de los 600°C es una opción para el diseño.

El cuarzo es un material apto para trabajar bajo microondas, posee buenas propiedades mecánicas, resistente a altas temperaturas, a la corrosión y a la oxidación, por tanto es una opción para las condiciones de proceso deseadas.

Ambos materiales son apropiados para el proceso de pirolisis, sin embargo se decidió escoger el cuarzo por su versatilidad en el momento de variación de temperaturas, su resistencia mecánica, a la corrosión y a la oxidación, y su por encima de todo por su alta conductividad térmica 7,5 Watt/m*K @20°C comparada con la del vidrio 0,75 Watt/m*K. (Corberan, 2001). A continuación se listan algunas propiedades del cuarzo que interesan en esta investigación.

Tabla 4-9: Propiedades térmicas (Vidrasa, 2015).

Coeficiente medio de dilatación lineal térmica (20 - 300 °C)	$0,55 * 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$
--	------------------------------------

Tabla 4-10: Propiedades químicas (Vidrasa, 2015).

Clase hidrolítica (DIN 12111)	1
Clase de resistencia a los ácidos (DIN 12 116)	1
Clase de resistencia a los álcalis (DIN 52322)	1

Tabla 4-11: Propiedades eléctricas (Vidrasa, 2015).

Factor de pérdida dieléctrica (a una frecuencia de 7,5 GHz)	$\tan d = 5 \cdot 10^{-4}$	Temperatura (°C)	Resistencia eléctrica específica (Watt · cm)
Constante dieléctrica (a 20 °C/7,5 GHz)	= 3,7		
Resistencia dieléctrica (kV/cm) a 20 °C a 500 °C	250 - 400 40 - 50	100	10^{18}
		200	$4 \cdot 10^{13}$
		400	10^{10}
		800	$6,3 \cdot 10^8$
		1000	10^8
		1200	$4 \cdot 10^5$

4.4 Variables de la pirolisis obtención al producto sólido.

Existen diferentes variables en la pirolisis, la humedad de la muestra y el gas de arrastre entre otras, sin embargo las dos variables más importantes para la preferencia hacia el producto sólido, son la temperatura y el tiempo de residencia (Caballero, 1995). Con base en esto, a continuación se presenta la elección de las magnitudes de estas dos variables.

4.4.1 Temperatura de reacción.

Para el interés de esta investigación orientada hacia el producto sólido se tiene que, para diferentes materias primas sometidas a reacciones de pirolisis, inclusive biomasa, la mayor proporción de fase sólida sobre la líquida o la gaseosa se dan en el rango de 450° C a 600° C (Caballero, 1995). Se eligió el límite superior de este dato para el desarrollo de esta investigación, 600°C, para determinar los cálculos en donde la temperatura se vea involucrada.

4.4.2 Tiempo de residencia – velocidad de reacción.

Para el interés de esta investigación dedicada al producto sólido se tiene que su mejor rendimiento se obtiene en pirolisis lentas, caracterizadas por tiempos

extensos de reacción, por encima de los 30 minutos inclusive días. Se decidió tomar 1 (una) hora para el tiempo de residencia como primera aproximación.

4.5 Condiciones de diseño del reactor de pirolisis.

A partir del estado del arte sobre pirolisis, luego de haber seleccionado la tecnología por fluidización mecánica (tornillo), definido el sistema de calentamiento por microondas (microondas), y determinar las variables críticas para la mayor obtención de producto en fase sólida sobre la líquida y la gaseosa (temperatura y tiempo de residencia), se procedió a establecer las condiciones de diseño del reactor de pirolisis selectivo hacia el producto sólido. A continuación se presentan las consideraciones, suposiciones y decisiones para ello.

4.5.1 Base de cálculo

El punto de partida para establecer las condiciones de diseño del reactor son las dimensiones de un horno microondas doméstico comercial; si bien los tamaños de estos aparatos varían, se decidió tomar un horno caracterizado por una cavidad interna que es capaz de albergar un reactor con un largo de 25 centímetros, que será la base de cálculo de esta investigación, cuya magnitud es coherente con la escala de laboratorio que se propone.

Las dimensiones del reactor se tomaron como referencia, contrastando las demás dimensiones con los parámetros de diseño de cada una de las piezas o bien mediante las restricciones físicas que ponen las piezas propuestas. Con lo anterior y para comprender mejor las dimensiones del reactor, a continuación se propone las especificaciones de un reactor que cumpla estas condiciones:

Tabla 4-12: Especificaciones horno microondas.

ESPECIFICACIONES	Horno marca LG
Largo, mm	600
Alto, mm	450
Profundidad, mm	400
Potencia, Watt	1200
Voltaje, V	110
Temperatura máxima de operación, °C	1000

Fuente: elaboración propia.

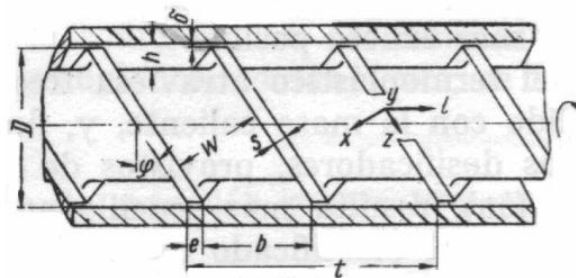
Es importante aclarar que se tomó este horno para cumplir con las condiciones de la pirólisis, y no quiere decir que esta marca, modelo o especificaciones fueron exclusivas para su elección; entendiendo de esta forma que otros hornos podrían ser considerados.

4.5.2 Caracterización del reactor

De acuerdo a la tecnología de reacción seleccionada, a continuación se relacionan las condiciones para el dimensionamiento de las piezas principales del reactor de tornillo, es importante resaltar que son valores teóricos que deberán ser validados en caso de implementar el sistema y que están sujetos a la factibilidad de ser logrados en un taller mecánico o estar disponibles comercialmente.

Para una mejor comprensión de las partes del tornillo, a continuación se presenta un bosquejo.

Figura 4-1. Bosquejo partes tornillo y barril del reactor. (Gómez, J y Gutiérrez, J., 2007).



- D : Diámetro del tornillo
- h : Profundidad del canal
- w : Amplitud del canal
- e : Espesor del filete
- t : Paso del hilo
- φ : Ángulo del hilo
- δ : Tolerancia entre el tornillo y el barril.

▪ Dimensionamiento del tornillo

Para esto se tomó las condiciones teóricas de un proceso mecánico denominado extrusión (Gómez, J y Gutiérrez, J., 2007), el cual cumple los requerimientos de un reactor de pirólisis de tornillo. Se debe tener en cuenta que las relaciones

diámetro largo varían dependiendo de la materia prima, generalmente se utilizan tornillos caracterizados por una relación largo/diámetro (L:D) entre 20 y 32 (Lyondell Chemical Company, 2004).

Teniendo en cuenta lo anterior y con una longitud del reactor de 25 centímetros, se estableció un diámetro de 10 mm, resultando una relación (L:D) de 25, valor consistente con la teoría propuesta.

Otro parámetro del tornillo es el ángulo del hilo, el cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi * D}$$

(Ecuación 1)

Ángulo del hilo del tornillo (Lyondell Chemical Company, 2004).

Dónde:

D, mm: Es el diámetro del tornillo.

t, mm: Es el paso del tornillo.

π , Adimensional: Número Pi.

Existe un caso simplificado de tornillo, denominado tornillo de paso cuadrado, el cual está caracterizado por tener un diámetro de igual magnitud que su paso (Wampler, 2007), es decir $t = D$, de lo cual al reemplazarlo en la Ecuación 1, resulta:

$$t = D, \varphi = 17,65^\circ$$

Es posible simplificar el diseño utilizando esta condición, sin embargo, el paso se relaciona inversamente con la cantidad de filetes que posee el tornillo y esto tiene relación directa con el tiempo de residencia dentro del equipo.

La ecuación que determina la cantidad de filetes se relaciona a continuación:

$$\frac{L}{t} = \text{Cantidad de filetes}$$

(Ecuación 2)

Cantidad de filetes del tornillo (Lyondell Chemical Company. 2004).

Dónde:

L, mm: Es el largo del tornillo.

Ahora bien, la velocidad axial del tornillo sinfín se puede expresar en función de la velocidad de giro η de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V = t * \eta \quad (\text{Ecuación 3})$$

Velocidad axial del tornillo (Gómez, J y Gutiérrez, J, 2007).

Se evidencia que para una velocidad axial fija en el tornillo, a medida que aumenta el paso, la velocidad de giro es menor. Lo anterior se hace especialmente importante para velocidades de giro bajas, donde los controladores no operan con tanta precisión.

De acuerdo a la teoría de pirolisis lentas las cuales aumentan la relación de producto en fase sólida frente a la líquida y la gaseosa, se estableció un tiempo de una (1) hora para la reacción (tiempo en que tarda una partícula sólida en viajar con la misma velocidad axial del tornillo desde el inicio hasta el fin del reactor). Esto significa que la velocidad axial del tornillo, es:

$$V = \frac{250 \text{ mm}}{60 \text{ min}} = 4,17 \text{ mm/min}$$

Reemplazando este valor en la Ecuación 3, se obtiene la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{4,17 \text{ mm/min}}{t}$$

Aplicando un tornillo de paso cuadrado ($t = D = 10 \text{ mm}$) para el caso anterior, se tendría que controlar el giro de la pieza a una velocidad de 0,417 RPM (Revoluciones Por Minuto).

$$\eta = 0,417 \text{ RPM}$$

Otra variable a tener en cuenta es la profundidad del canal, esta tendrá efectos en la velocidad de transferencia de calor desde el barril, haciendo que aumente a menor distancia; por lo cual se tomó una profundidad de 2 mm, sujeta a la viabilidad de maquinado del cuarzo.

Las relaciones restantes son para establecer el dimensionamiento de la tolerancia entre el barril y el diámetro del tornillo (δ , en mm); y el espesor del filete (e , en mm). A continuación se expresan en la Ecuación 4 y 5 (Gómez, J y Gutiérrez, J, 2007).

$$\delta = 0,002 * D$$

(Ecuación 4)

Tolerancia entre el barril y el tornillo (Gómez, J y Gutiérrez, J, 2007)

$$e = 0,12 * D$$

(Ecuación 5)

Espesor del filete del tornillo (Gómez, J y Gutiérrez, J, 2007).

Si bien el espesor del filete arrojó un resultado de 1,2 mm y la tolerancia de 0,002 mm, estas magnitudes están sujetas a las condiciones de maquinado del material, por esta razón se propone una tolerancia mínima de 0,5 mm ya que el valor de 0,002 mm presume ser un valor demasiado pequeño y difícil de lograr. La tabla 4-13 resume el dimensionamiento del tornillo sinfín.

Tabla 4-13: Dimensiones del Tornillo Sinfín.

Largo, mm	250
Diámetro, mm	10
L:D	25
Ángulo de Hilo, °	17,65
Paso, mm	10
Profundidad de Canal, mm	2
Espesor del filete, mm	1,2
Tolerancia con el barril, mm	0,5

▪ Expansión térmica radial

Con los valores anteriores es posible determinar la tolerancia que existirá entre la pared interior del barril y el diámetro del tornillo sinfín cuando este se expande mediante la adición de calor.

La expresión que expresa la expansión térmica radial, se adjunta a continuación:

$$\Delta r = 2\pi * r_0 * \alpha * (T_f - T_i)$$

(Ecuación 6)

Expansión térmica radial.

Esta expresión rige tanto para el diámetro del tornillo como para la pared interior del barril. De esta manera, los valores anteriores corresponden a:

- Δr , mm: Es la diferencia entre el radio final expandido y el radio inicial del tornillo.
- r_0 , mm: Es el radio inicial del cuerpo (5 mm en el tornillo y 5,5 mm en el barril).
- α , 1/K: Es el coeficiente medio de dilatación térmica lineal del cuarzo ($0,55 \cdot 10^{-6}$ 1/K) (Vidrasa, 2015).
- T_f , T_i , K: Son las temperaturas finales e iniciales respectivamente ($T_i = 293$ K).

Utilizando la expresión anterior, la tolerancia se puede expresar como sigue:

$$\delta = \Delta r_{barril} - \Delta r_{tornillo} = 2\pi * (r_{o.barril} - r_{o.tornillo}) * \alpha * (T_f - T_i)$$

(Ecuación 7)

Tolerancia en función de la expansión radial.

Si la temperatura final máxima es de 600 °C la tolerancia resulta

$$\delta = 0,0004 \text{ mm}$$

Un valor despreciable, por lo cual se puede apreciar que si el reactor llegase alcanzar esta temperatura no presenta problemas de diseño en desviaciones del husillo u otras consideraciones imprevistas de implementación de los materiales. Asegurando que no existan roces de los materiales, alargando la vida por desgaste.

▪ Dimensionamiento del barril

El barril es la pieza que cumple la función de ser la frontera del volumen del reactor, a través de esta pieza se transfiere el calor desde el exterior del equipo hacia el interior del equipo.

Como se dijo anteriormente por efectos de precisión, se determinó una tolerancia entre el diámetro del tornillo y la pared interior del barril de 0,5 mm. De este modo, el diámetro interno del barril es de 11 mm. Como se ha dicho consistentemente esta dimensión está sujeta a las condiciones de maquinado del material.

Es necesario aclarar que el largo del reactor de 25 Cm ó 250 mm se considera dentro del horno microondas, por razones obvias esta magnitud será modificada debido a otras condiciones como lo son los soportes del reactor o las uniones con otras piezas, afectando de igual manera la longitud del barril.

4.5.3 Consideraciones generales del reactor

En la presente sección se relaciona la elección de las piezas y sistemas respectivos para generar de mejor manera las condiciones de operación necesarias para que se lleve a cabo el proceso de pirólisis.

- **Sellado**

El reactor debe operar en una atmósfera ausente de oxígeno, eso quiere decir que debe estar aislado del medio exterior de manera hermética con los reactivos cargados. Un sistema propicio para tapar sin filtraciones el reactor, es el de bridas de cuarzo con sello de grafito se dimensionará un sello de grafito, el cual resiste altas temperaturas (no posee temperatura de fusión a presión atmosférica y ebulle a los 3500 °C (The Engineering Toolbox, 2012).

- **Alineación del tornillo sinfín**

La alineación del tornillo sinfín es fundamental para que el borde externo de éste no roce con el barril, lo cual podría ocasionar desgaste en las piezas, así como provocar que el motor se desacople del eje del tornillo en medio de la operación, forzando su detención. Esto toma mayor relevancia cuando las tolerancias entre el barril y el tornillo son tan pequeñas lo que justamente ocurre en el caso de esta investigación.

Ahora bien, las alineaciones más comunes se hacen con rodamientos, los cuales están lubricados con grasas que se queman a temperaturas cercanas a los 200 °C. Debido a que el medio donde se llevarán a cabo las reacciones de esta investigación estará a una temperatura mucho más alta, la alineación del tornillo mediante rodamientos convencionales se hace imposible. Por lo anterior, se implementará un sistema de alineación mediante la adición de bujes de cuarzo, teniendo como ventaja el poder trabajar a temperaturas mayores. Ante lo anterior, debido a sus propiedades físicas (resistencia al roce) y térmicas, es que se han de construir estos bujes de cuarzo.

El principio de funcionamiento del buje es básicamente ser la pieza de apoyo para permitir el giro del eje; la pared exterior del buje va apoyada en la pared interior del barril mientras que la pared interior del buje va apoyada sobre el eje del tornillo (esto quiere decir, que para el centrado del tornillo, se debe alargar el eje del sinfín por ambos lados a modo de tener una superficie de apoyo para el centrado del buje). De esta manera, el eje del tornillo resbala por sobre la pared interior del buje, permitiendo el giro, pero asegurando su centrado.

▪ **Delimitación física del reactor**

El buje, pese a ser una pieza que funciona como pared delimitante del volumen del reactor, no permite que el medio sea hermético, permitiendo fugas de los gases generados a través de pequeños espacios. De este modo, para la delimitación del volumen del reactor (sobre todo para los gases) se utilizarán retenes de doble labio.

Los retenes de doble labio poseen básicamente la misma forma que un buje, solamente que su material es grafito. Su función principal es el evitar las fugas líquidas y gaseosas desde un medio (Hositrad Vacuum Technology, 2013). De esta manera, la implementación de retenes en el barril del reactor aparte de cumplir la función de asegurar aún más el centrado del tornillo impide que los gases escapen fuera de ellos.

4.5.4 Cálculo del flujo del reactor.

Teniendo como base que la tecnología de pirolisis seleccionada propone el uso de un tornillo bajo las teorías y principios de extrusión, la cantidad de material que circula a través de un tornillo se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Q_v = \left(\frac{\alpha * \kappa}{\kappa + \beta + \gamma} \right) * \eta$$

(Ecuación 8)

Flujo volumétrico de un tornillo (Gómez, J y Gutiérrez, J, 2007).

Dónde:

- Q_v , cm^3/min : Flujo volumétrico del tornillo.
- α , cm^3 : Flujo de arrastre del tornillo.
- β , cm^3 : Flujo de presión del tornillo.
- γ , cm^3 : Flujo de filtración del tornillo.
- η , RPM : Velocidad de giro del tornillo.
- κ : Constante total del cabezal de la zona del dado.

Estas variables están sujetas a las dimensiones del tornillo antes resueltas. A continuación se presenta el cálculo de cada una de ellas.

▪ **Cálculo del flujo de arrastre**

El flujo de arrastre corresponde al resultado dinámico entre el esfuerzo del tornillo arrastrando la mezcla y las fuerzas de fricción generadas entre los ROS y las paredes del barril (Morton&Jones, 1993) (medido en unidades de volumen, pues al igual que el flujo de presión y filtración, dependerá de la velocidad del giro del tornillo, factor que está incluido en la Ecuación 9).

Este flujo se puede entender de mejor manera si se analiza como el resultado de las fuerzas viscosas provocadas en un fluido entre una placa estacionaria y móvil.

La expresión del flujo de arrastre se adjunta a continuación:

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos^2(\varphi)}{2 * 1000}$$

(Ecuación 9)

Flujo de arrastre.

Dónde:

M, Adimensional: Es el número de hilos del tornillo (m=1)

D, mm: Diámetro del tornillo (D=10 mm)

h, mm: Profundidad del canal (h=2 mm)

t, mm: Paso del tornillo (t=10mm)

e, mm: Espesor del filete del tornillo (e=1,2mm)

φ , °: Ángulo del hilo ($\varphi = 17,65^\circ$)

De este modo, reemplazando los valores anteriores en la Ecuación 9, se obtiene:

$$\alpha = 0,25 \text{ cm}^3$$

▪ **Cálculo del flujo de presión**

Dada la disminución en la profundidad del tornillo sinfín, se genera un gradiente de presión en el interior del reactor tipo tornillo, el cual aumenta a medida que el tornillo se acerca a la parte posterior del reactor. Este gradiente incide en un flujo ficticio denominado flujo de presión. Esta expresión se calcula de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{m * h^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos(\varphi) * \operatorname{sen}(\varphi)}{12 * 1000 * L} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Flujo de presión (Gómez, J y Gutiérrez, J., 2007).

Dónde:

- L, mm: Es el largo del tornillo (L=250 mm)

Reemplazando los valores en la Ecuación 10, se obtiene:

$$\beta = 6,78 * 10^{-6} \text{ cm}^3 \approx 0$$

▪ Cálculo del flujo de filtración

El flujo de filtración es una medida de las fugas provocadas en el espacio existente entre el tornillo y el barril. La expresión que rige esta ecuación se muestra a continuación

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan(\varphi)}{10 * 1000 * e * L} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Flujo de filtración (Gómez, J y Gutiérrez, J., 2007).

Dónde

- δ , mm: Tolerancia entre el tornillo y el barril ($\delta = 0,5$ mm)

Reemplazando los valores en la Ecuación 11, se obtiene:

$$\gamma = 5.23 * 10^{-5} \text{ cm}^3 \approx 0$$

De esta manera, se puede apreciar que el flujo por arrastre (α) es considerablemente mayor a los flujos de presión (β) y filtración (γ), teniendo en cuenta lo anterior se puede resumir la ecuación de la siguiente forma:

$$Q_v = \alpha * \eta$$

$$Q_v = 0,25 \text{ cm}^3 * \eta$$

A la vez, el resultado anterior se puede expresar en términos de masa como sigue:

$$Q_m = 0.25 \text{ cm}^3 * \eta * \rho$$

(Ecuación 12)

Flujo másico.

Dónde ρ es la densidad del material a transportar, expresada en g/cm^3 .

Para el interés de esta investigación se relacionan algunos cálculos de flujo para Residuos Orgánicos Sólidos para distinta velocidad de giro.

Tabla 4-14: flujos másicos en función de la velocidad de giro.

Velocidad de giro, RPM	ROS, $\rho=0,291 \text{ g/cm}^3$ (PGIRS)	ROS, $\rho=0,310 \text{ g/cm}^3$ (PNUD)
1	0,07275	0,0775
5	0,36375	0,3875
10	0,7275	0,775
15	1,09125	1,1625
20	1,455	1,55

4.5.5 Tiempos de residencia

En una reacción de pirólisis no todos los productos tienen el mismo tiempo de residencia debido a que algunos compuestos pueden pasar al estado gaseoso y ser arrastrados mediante el flujo del gas de arrastre, en este sentido se tomó que el tiempo de residencia es el tiempo en que un sólido tarda en recorrer el largo del tornillo de acuerdo a la velocidad de giro.

La expresión que expresa el tiempo de residencia en función de la velocidad de giro, para el largo del tornillo, es la siguiente:

$$\tau = \frac{\left(\frac{L}{t}\right)}{\eta} = \frac{25}{\eta}$$

(Ecuación 13)

Tiempo de residencia en un tornillo sinfín.

Donde (L/t) es la expresión que da el número de filetes totales en el tornillo y (η) la velocidad de giro del eje.

De esta manera, aplicando los límites de las velocidades de giro de la Tabla 4-14, se puede decir que el tiempo de residencia del equipo variará entre 1,25 min @ 20 RPM) y 25 min @ 1 RPM. Estos valores en los tiempos de residencia serán los límites para analizar los casos que se exponen más adelante, dado que se espera que las reacciones de pirólisis ocurran dentro de este rango.

4.6 Valoración energética.

Teniendo en cuenta que esta investigación se desarrolla en un contexto de sostenibilidad, es de suma importancia presentar una alternativa para abastecer la energía del sistema, a continuación se analiza por una parte los consumos y balances de energía del sistema y por otra parte el uso de una fuente de energía renovable.

4.6.1 Potencia requerida en el tornillo

La potencia requerida para mover un tornillo sinfín se divide en tres componentes. La potencia requerida para mover el material, la potencia requerida para mover el tornillo sin carga, y la potencia requerida para compensar el caso de que el sinfín tenga inclinación.

La ecuación de lo anterior, se adjunta a continuación (Departamento de Ingeniería Mecánica, 2007)

$$P = P_H + P_N + P_{St} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Potencia requerida para mover un tornillo sinfín (Departamento de Ingeniería Mecánica, 2007).

Dónde:

- P, kWatt: Potencia total requerida.
- P_H , kWatt: Potencia requerida para mover el material.
- P_N , kWatt: Potencia requerida para mover el tornillo.
- P_S , kWatt: Potencia requerida para mover un sinfín con inclinación.

▪ **Cálculo de la potencia requerida para mover el material**

La ecuación que determina la potencia requerida para transportar el material, se adjunta a continuación:

$$P_H = \frac{Q_m * L * \lambda * g}{3600}$$

(Ecuación 15)

Potencia requerida para mover material (Departamento de Ingeniería Mecánica, 2007).

Dónde:

- Q_m , Ton/h: Es el flujo másico, se utilizará un escenario que involucre un alto flujo másico (relativo a la Tabla 4-14) con el fin de sobredimensionar el equipo para asegurar los cálculos ($Q_m=10 \text{ g/min} = 6*10^{-4} \text{ Ton/h}$).

- λ , adimensional: Es el coeficiente de fricción del material transportado (asumido como 0,4 en los ROS).

- g , m/s^2 : Aceleración de gravedad ($g=9,81 \text{ m/s}^2$).

Reemplazando los valores anteriores en la Ecuación 15:

$$P_H = 1,635 * 10^{-7} \text{ KW}$$

▪ **Cálculo de la potencia requerida para mover el tornillo**

La ecuación que determina la potencia requerida para mover el tornillo, se señala a continuación. En esta expresión, tanto el diámetro como el largo del tornillo deben estar expresados en metros:

$$P_N = \frac{D * L}{20}$$

(Ecuación 16)

Potencia requerida para mover el tornillo (Departamento de Ingeniería Mecánica, 2007).

Reemplazando se tiene:

$$P_N = 2,5 * 10^{-4} \text{ KW}$$

- **Cálculo de la potencia requerida para la inclinación del tornillo**

En este caso, no existe inclinación, por ende no se requiere de potencia adicional para compensar tal caso. De esta manera:

$$P_{St} = 0$$

Y finalmente:

$$P = P_N + P_H + P_{St} = 2,5 * 10^{-4} KW$$

4.6.2. Elección del motor

Los límites de los tiempos de residencia obtenidos fueron 1,25 min para 30 RPM y 25 min para 1 RPM, en este sentido la primera consideración para la elección del motor es que posea una caja reductora para que el giro de salida del equipo esté dentro de ese rango. De hecho, el tiempo de residencia es inversamente proporcional a la velocidad de giro del motor, haciendo que ligeras variaciones a velocidad de giro bajas generen cambios grandes en el tiempo de residencia. Por esto mismo, el giro de salida del motor reductor debe estar más orientado a las velocidades bajas que a las altas.

Por otra parte, de acuerdo a lo calculado se requiere muy poca potencia para mover la carga del tornillo, incluso bajo un sobredimensionamiento en la producción. Por se opta por un motoreductor de 0,09325 kWatt o 1/8 HP, cuya potencia alcanza holgadamente a cubrir las necesidades del tornillo.

- **Cálculo de la potencia transmitida al tornillo sinfín.**

$$P_{trans} = P_{motor} * \epsilon_{motor} * \epsilon_{trans}$$

(Ecuación 17)

Potencia transmitida al tornillo sinfín.

Suponiendo eficiencias de transmisión y del motor del 75% y 65% respectivamente (Rauwendaal, 2001) y una potencia de 1/8 HP, la solución de la ecuación anterior, resulta:

$$P_{trans} = 0,125 \text{ HP} * 0,75 * 0,65 = 0,061 \text{ HP}$$

De acuerdo al resultado anterior se puede evidenciar que la elección del motor es satisfactoria debido a que transmite una potencia al tornillo superior a la requerida, incluso en condiciones de sobredimensionamiento.

4.6.3 Balance de Energía del sistema de calentamiento

El reactor se calentará por medio de microondas generadas por un horno doméstico comercial de esta tecnología. La temperatura máxima que se seleccionó es 600°C, a partir de este valor se puede establecer el balance de energía, si bien esta es la temperatura máxima considerada para el interés de esta investigación, este balance obtendrá el límite inferior necesario para la potencia en el horno microondas, lo cual luego se sobredimensionará.

El modelo del problema se puede analizar como una tubería, cuya pared interior está a 600 °C y que está ubicada en un espacio a temperatura ambiente (20 °C). Los radios del barril fueron relacionados anteriormente, se pueden observar en la Tabla 4-5.

$$Q = \frac{T_{int} - T_{amb}}{\frac{1}{2\pi * r_2 + L + h_{aire}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * L * \kappa_{cuarzo}}}$$

(Ecuación 18)

Balance de calor en una tubería.

Dónde:

- Q, Watt: Potencia mínima requerida para calentar la pared interior hasta los 600 °C
- T_{int}, °C: Temperatura de la pared interior del barril.
- T_{amb}, °C: Temperatura ambiente, fijada como 23 °C.
- r₁, m: Radio de la pared interior del barril.
- r₂, m: Radio de la pared exterior del barril.
- L, m: Largo del reactor.
- h_{aire}, Watt/m²-K: Coeficiente de convección natural del aire (10 Watt/m²*K).
- k_{cuarzo}, Watt/m-K: Coeficiente de conductividad térmica del cuarzo (7,5 Watt/m*K @25°C).

Reemplazando los valores anteriores en la Ecuación 18, se obtiene lo siguiente:

$$Q = 67,77 \text{ W} \approx 68 \text{ W}$$

Lo anterior significa que la potencia mínima requerida en condiciones ideales para llevar la pared interior del barril a 600 °C es 68 Watt, valor perfectamente alcanzable con un horno microondas convencional modificado.

4.6.4 Abastecimiento de energía.

Existen diferentes alternativas para abastecer la energía requerida tanto para el movimiento del material dentro reactor como para su calentamiento, siempre energía eléctrica según lo escogido. En este sentido se tomaron dos alternativas para su análisis, una, la energía eléctrica provista por la red comercial doméstica y otra, la energía eléctrica provista por un sistema de generación renovable, para este caso paneles solares por su fácil acceso e instalación.

El precio del kiloWatt hora de la red doméstica es de \$450 pesos Colombianos (CREG, 2015).

El sistema de energía solar y sus costos asociados se describen a continuación, con una vida útil de 20 años.

Tabla 4-15. Sistema de paneles solares.

Material - equipo	cantidad	Costo – pesos colombianos
Paneles solares de 250 Watt	2	\$ 1.300.000
Regulador a 12 V	1	\$ 40.000
Batería de 100 Ah @ 12 V	1	\$ 250.000
Inversor de 1400 Watt	1	\$ 100.000
Total		\$1.690.000

Fuente: elaboración propia.

Si bien el costo de instalar un sistema de energía solar resulta alto comparado con el costo en la red eléctrica doméstica, tan solo 270 pesos cada 30 minutos de operación según los datos mencionados anteriormente, su relevancia radica en ser una fuente renovable de energía, pertinente y consistente con el enfoque de la maestría en desarrollo sostenible.

Por otra parte es importante mencionar que existen fondos financieros a nivel nacional que promueven la utilización e implementación de estos sistemas de generación de energía renovable, en cuyo caso se podría obtener financiación para llevar esta tecnología a comunidades de bajos recursos, entre otras porque el área de instalación es de menos de 2 m² y los otros materiales no ocupan mayor espacio.

Figura 4-2. Render sistema de reacción – 3D.

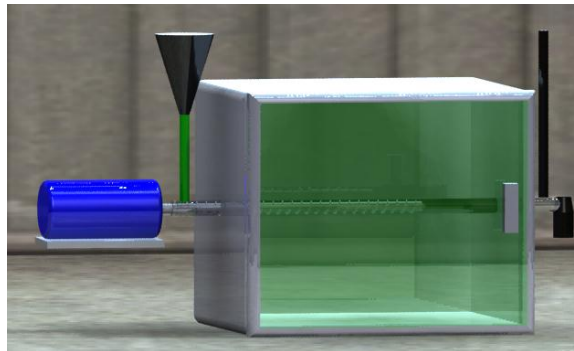


Figura 4-3. Motor y tornillo acotado.

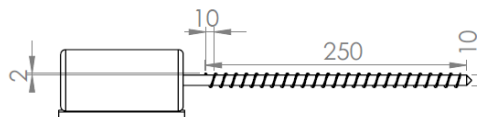
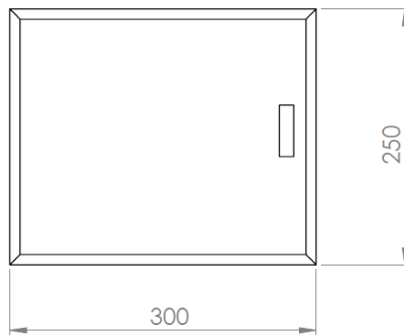


Figura 4-4. Tolva, barril acotado y salidas de gas y sólido.



Figura 4-5. Horno microondas acotado vista frontal.



4.6.5 Consideraciones finales.

- **Impacto de la propuesta de diseño a nivel de la sostenibilidad.**

Esta propuesta se diferencia del estado del arte en cuanto a que, además de plantear las condiciones energéticas y de transformación de ROS, la intención de esta investigación es proponer un dispositivo que realice fundamentalmente el proceso a escala de laboratorio en el interior de cada hogar, apuntando contundentemente a disminuir su generación desde la fuente y eliminando su disposición final en los rellenos sanitarios, masificando este proceso de transformación de ROS través del uso y re uso de hornos microondas domésticos (modificados).

Por otra parte es importante mencionar que del análisis del estado del arte se observa que del producto en fase sólida (Biocarbón) que pretende esta investigación, se ha comprobado sus bondades y beneficios en diversas

investigaciones, tales como secuestro de carbono, reducción de emisiones contaminantes y se establece como un producto que valoriza los ROS.

Del análisis del sistema de calentamiento se puede decir que cubre los vacíos del estado del arte en cuanto a que elimina etapas previas o alternas de calentamiento para eliminar el agua disminuyendo el consumo energético.

- **Productos de la pirolisis.**

Es importante mencionar que por los lineamientos de la investigación, esta se enfocó en las condiciones de diseño de un reactor con preferencia hacia la obtención del producto en fase sólida con relación a la fase líquida y/o gaseosa, por cuanto se percibe una gran oportunidad para generar el Biocarbón por las bondades descritas. Sin embargo después de estudiar detalladamente el estado del arte, se observa que los productos en fase líquida y gaseosa tienen potencial de ser utilizados como materia prima para la obtención de subproductos en otros procesos.

Por otra parte, también es importante mencionar que el sistema de calentamiento propuesto si bien resuelve los problemas del estado del arte en cuanto a eficiencia energética de las patentes e investigaciones estudiadas, no tuvo en cuenta por los lineamientos de esta investigación, el aprovechamiento de los productos en fase líquida y gaseosa por su valor energético, lo cual sería mérito para establecer la continuidad de este proyecto en otra investigación.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se obtuvo las condiciones de diseño de un reactor de pirolisis en continuo, equipado con un tornillo de cuarzo para el movimiento del material, que utiliza microondas para el calentamiento mediante el uso o reúso de hornos microondas domésticos, para el abastecimiento de la energía necesaria del sistema utiliza una alternativa de energía renovable de paneles solares.
- La tecnología más apropiada resulta la de pirolisis en reactor de tornillo, por su versatilidad de operación, facilidad de instalación y fácil mantenimiento.
- Se escogió al cuarzo como el material del reactor debido principalmente a su excelente conductividad térmica, $7,5 \text{ Watt/m}^{\circ}\text{K}$.
- El sistema de calentamiento que mejor se adecua a las necesidades de reducción energética que pretende esta investigación es el de uso de microondas en comparación con la tecnología por resistencias eléctricas y calentadores solares.
- Se estableció que la temperatura y el tiempo de reacción son las dos variables más influyentes en la selectividad hacia el producto sólido, estableciendo una temperatura máxima de 600°C y un tiempo mínimo de media hora.
- Se estableció un sistema de paneles solares para abastecer de energía al sistema, con una inversión inicial de \$1.690.000, si bien sería más económico trabajar con energía de la red eléctrica doméstica, se eligió esta alternativa por ser una fuente de energía renovable pertinente al enfoque de la maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente
- El reactor de tornillo procesa un flujo máximo de $1,55 \text{ g/min}$ de operación.
- Las variables de diseño arrojan un consumo energético de $93,25 \text{ Watt}$ para mover el material dentro del reactor y de 68 Watt para el calentamiento de los ROS hasta su transformación.

Recomendaciones

- Estudiar y realizar un modelo de requerimiento energético por transferencia de calor, teniendo en cuenta al análisis por convección, reacciones químicas y radiación para la pirólisis de biomasa.
- Para el correcto desarrollo experimental de las pruebas y validación futura de las condiciones de diseño encontradas, se recomienda analizar modelamientos matemáticos o simulaciones de temperatura máxima de pirólisis, el tiempo de residencia de los gases en el reactor, el tamaño de la partícula, el porcentaje de humedad y el tipo de biomasa, los cuales deben estar dentro de los rangos de aceptabilidad mencionados en este documento.
- Estudiar el valor energético de los productos en fase líquida y gaseosa para su aprovechamiento en una integración energética.

Bibliografía

Arroyave S. M. & Vahos M. D. 1999. Evaluación del proceso de compostaje producido en un tanque bio reactor piloto por medio de bioaumentación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, s.p.

Astigarre Aguirre, J. (11 al 14, Mayo,2009). *Hornos De Alta Frecuencia Y Microondas*. Naiguatá, Venezuela. Obtenido de <http://hdl.handle.net/123456789/4922>

Lyondell Chemical Company. (2004). A Guide to Polyolefin Film Extrusion.

Acosta Mongua , j. a., & Pérez Moreno, r. j. (31 de diciembre del 2012). *Estudio experimental y simulación de la saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie*. (Tesis (Ingeniero Químico) --Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias E Ingenierías. Programa de Ingeniería Química) Obtenido de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/107>

Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Waste . (February 2013). *Department for Environment Food & Rural Affairs*.

Agnew, J. a. (2003). *The physical properties of compost*. *Compost Science*.

Agt. (s.f.). La Gasificación Syngas,(Gas De Sintesis), Y Carbon Vegetas Partir De Productos Y Sub Productos Agrícolas . Obtenido de http://www.agtgasification.com/esp/prodotti_agt.htm

Aguirre Bortoni, M. (s.f.). *lobricultura como alternativa para el aprovechamiento de desechos orgánicos. mexico*. Obtenido de <http://www.turevista.uat.edu.mx/Vol.%202%20Num%201/Microsoft%20Word%20-%20LOMBRICULTURA%20COMO%20ALTERNATIVA%20-%20%20DR.%20AGUIRRE%20BORTONI.pdf>

Alguacil, D. F. (SEPTIEMBRE 2013). *OBTENCIÓN DE BIOCARBONES Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS DE BIOMASA RESIDUAL*.

Álvaro-Fuentes, J. L.-M. (Febrero 2008). Efectos administrativos de los flujos de dióxido de carbono del suelo en las condiciones semiáridas del Mediterráneo. *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL* 72(1).

Antioquia, C. G. (2005). *Gestión para el control fiscal ambiental*. . Obtenido de <http://www.contraloriagdeant.gov.co/docs/>

Aras, E. L. (2011). *Ventajas en la utilización de cultivos para la generación de biocombustibles y su impacto en la producción agrícola argentina*. Obtenido de Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/ventajas-utilizacion-cultivos-generacion.pdf>

ARQUITECTURA, F. D. (OCTUBRE 2008). DISEÑO DE HORNO TIPO RETORTA.

Arroyo Morelos, c. v., Butrón Licon, g. s., & Paredes, r. d. (31 de diciembre de 31-diciembre-2013). *Diseño conceptual de un reactor catalítico para depuración de vapores de crudo y nafta generados en Oiltanking Colombia*. Recuperado el 18 de noviembre de 2015, de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/60>

Arti. (2012). *productos india recuperado de* . Obtenido de <http://www.arti-india.org/>

Avendaño Trocha, a., & García Muriel, Álvaro , a. (2014). *Estudio térmico y eléctrico del polímero electrolítico PEO/AgI+KI*. (Maestría en Física) Recuperado el 12 de septiembre de 2015, de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/2177>

B. Tamburic, F.W. Zemichael, G.C. Maitland, K. Hellgardt. (2010). Design of a Novel Flat-plate Photobioreactor System for Green. *Proceedings WHEC*.

Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors. (January 2016.). *Elsevier*, 48-55.

Castell, x. (s.f.). *Generacion De Lixiviados* . Obtenido de Tratamiento Y Valorizacion Energetica De Residuos, Madrid Dias De Santos, Pag,62 : <http://books.google.com.co/books?id=KBTPxli6IRsC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.

Castells, x. E. (2012). *Tratamiento y valorizacion Energetica de residuos*. Madrid: Ediciones Diaz De Santos, S.A .

Castillo Edgar Fernando, C. D. (Diciembre 2003). Estudio de las condiciones de operacion para la digestion anaerobia. *Revista Colombiana de Biotecnologia*, 11-22.

Castro Gómez , y., Vera Calderon , m. p., & Acevedo Morantes, m. t. (31 de diciembre de 2012). *Diseño de reactores de prepolimeración y polimerización para la producción de ácido polilactico en una planta industrial*. (Universidad de Cartagena) Recuperado el 18 de noviembre de 2015, de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/113>

Cedum. (2007). *Elaboracion Del Proyecto De Investigacion Elaboracion De Compost En Manzanas De Residuos Organicos* . Obtenido de Unidad 4, Revista Luna Azul Colombia : http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=com_content&task=view&id=239&Itemid=239

Cedum. (s.f.). *Conceptos De Investigacion* . Obtenido de Unidad 2. Recuperado De : <http://cedum.umanizales.edu.co/mds/ch4/investigacion1/unidad2/index.html>.

Cedum. (s.f.). *El Metodo Cientifico* . Obtenido de Unidad 3, Recuperado De : <http://cedum.umanizales.edu.co/mds/ch4/investigacion1/unidad3/index.html>.

Cedum. (s.f.). *Elaboracion Del Proyecto De Investigacion* . Obtenido de Unidad 4, Recuperado: <http://cedum.umanizales.edu.co/mds/ch4/investigacion1/unidad4/index.html>.

Cedum. (s.f.). *La Ciencia Y Su Evolucion* . Obtenido de Unidad 1, Recuperado De : <http://cedum.umanizales.edu.co/mds/ch4/investigacion1/unidad1/index.html>.

Cfu. (2012). *The Word Bank Colombia* . Obtenido de San Nicolas Agroforestry : Recuperasdo En <http://wbcarbonfinance.org/Router.cfm?Page=BioCF&FID=9708&ItemID=9708&ft=Projects&ProjID=9630>.

Chase, Su Shiung Lam Howard A. (2012). A Review on Waste to Energy Processes Using. *energies*, 24.

China se compromete por primera vez a reducir emisiones contaminantes. (12 de Noviembre de 2014). *El Pais*.

Chowdhury, M. J. (2012). Biofuels Production through Biomass Pyrolysis. *energies*.

Clavijo., G. D. (s.f.). Formulación del modelo teórico del proceso de gasificación de Biomasa en un reactor de Lecho Fijo. *Universidad Francisco de Pula Santander Ocaña*, 76.

Co, S. M. (2012). Efecto de los usos del suelo en la emisión de dióxido de carbono del suelo a la atmósfera en un agroecosistema semiárido del Valle del Ebro. . Valle del Ebro.

Conesa Ferrer, J. A. (2001- 2010). *Diseño de reactores heterogéneos*. (U. d. Publicaciones, Ed.) ISBN: 84-7908-652-1. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10045/15296>

Corberan,, J. (2000-2001). *R. 2001. Conducción. Fundamentos. Tema 2. Curso .*

Cordoba Liliana . (2008). *Uso De Microondas Para El Calentamiento. Departamento De Ingenieria Universidad De Las Americas San Andres Cholola Mexico, 50-57.*

Coronel Aguilar, J. C. (2014). *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK. En Reactor Batch. Universidad Internacional SEK, hdl.handle.net/123456789/1006.*

Council, T. I. (2006). *Characterization, Design, Construction., Technical/Regulatory Guideline, 111.*

Daniel Santosa, Alan Zacher, David Eakin . (2012). *Fast Pyrolysis Conversion Tests of. PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY.*

Diaz Consepccion, A., Martinez Escanavero, J., Garcia Ramirez, R., Benitez Montalvo, R., & Marrero Osorio, S. (septiembre del 2015). *Análisis para la modelación y optimización geométrica de un reactor tipo tornillo sin-fin empleando el método de grafos dicromáticos.* habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Domene , M., Hanley, s., & Lehmann, A. (2014). *Medium-term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. Soil Biology and Biochemistry.*

Dr. Robert T. Watson, D. M. (s.f.). *Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático.*

Economico, M. D. (2005). *Decreto 838 de 2005. En: Artículo 1. Definiciones. Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.* Obtenido de Recuperado de: http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto838_2005

Ellens, C. J. (2009). *Design, optimization and evaluation of a free-fall. Digital Repository @ Iowa State University, 155.*

Entender el Suelo Tropical. (27 Marzo 2014). *Reserva Natural La Pedregosa , Restoration , Jardín Botánico Semillas Sagradas , soil , tropical soils.*

España., G. (s.f.). *Biomasa y Gasificación.* Energías Renovables, energías de la Biomasa.

Estadísticas Ambientales. (12 de Diciembre de 2003). Obtenido de http://148.233.168.204/estadisticas_ambientales/estadisticas_am_98/residuos02.shtml

Eykelbosh , A., & Couto, M. (2014). *Biochar Decreases Dissolved Organic Carbon But Not Nitrate Leaching In Relation To Vinasse Application In A Brazilian Sugarcane Soil* . *Journal Of Environmental Management*.

Eykeñbosh , A., & Couto, M. (2014-2012). *Caracterización Físico-Química De Residuos Orgánicos Compostados, Evaluación De Su Potencial Nutritivo Y Aprovechamiento Agrícola*. Obtenido de Recuperado de: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/eeymar/default_archivos/EEymarcompstajeFerreriGuardia0910.pdf

Fedepalma , & Tertulia Palmera . (2008). *.Bioenergía Y Biocarbón Son El Futuro*. Obtenido de Recuperado de: http://portal.fedepalma.org/tertulias/julio_08.htm

Fei Hana, Y. C. (January 2016). Greenhouse gas emissions of a biomass-based pyrolysis plant in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1580–1590.

Flores Cordoba, D. M., & Posada Noreña, J. (2007). *Diseño conceputal de un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales*. (u. e. procesos, Ed.) medellin.

Flores Cruz, D. (14,octubre de 2004). *Introduccion A la Cinencia De Los Materiales Electricos*. Colombia.

Flores Gonzales Tania. (2013 Noviembre). *Elaboracion De M Ateriales Compuestos Polimeros Reforzados Con Nanoparticulas De Dioxido De Titanio Para Apliaciones Industriales*. Universidad Pontifia Bolivariana Medellin.

Garcia, c. (1993). *Estudio Termoquímico Y Cinético De La Pirólisis De Residuos Sólidos Urbanos*. Tesis Doctoral. Alicante. Universidad De Alicante. Departamento De Ingeniería Química. P. 6.

Garrido Szegedi, P. J. (2013). Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros.

Garrido Szegedi, P. J. (2013). Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros. *repositorio academico de la universodad de chile* , <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/116265>.

Gaunt. (2010). *Low-Temperature Slow Pyrolysis Offers An Energetically Efficient Strategy For Bioenergy Production*. . Obtenido de Recuperado de: http://biocharfarms.org/biochar_production_energy/

Gladys Jaramillo Henao, L. M. (s.f.). APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN COLOMBIA . 34-45.

Glauber, S. M. (2013). DESIGN AND COMMISSIONING OF A CONTINUOUS. *In Partial Fulfillment*.

Gómez, E. L. (Domingo 22 de Noviembre de 2015). De Basuras y algo más.

Gómez, J y Gutiérrez, J. 2007. Diseño de una Extrusora para Plásticos. Universidad Tecnológica de Pereira.

Lyondell Chemical Company. 2004. Guía para extrusion poliolefinas. Equistar. Houston, USA.

Wampler, T. P. 2007. Applied Pyrolysis Handbook, 2nd Edition. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press,

The Engineering Toolbox. 2012. Convective Heat Transfer, The Engineering Toolbox, Recuperado de: 153 http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html.

Departamento de Ingeniería Mecánica, 2007. Tornillos Sinfín, Transporte. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.

Morton-Jones, D. H. 1993. Procesamiento de Plásticos, 1ra Edición. México D.F., México: Limusa.

Rauwendaal, C. 2001. Polymer Extrusion, 4ta Edició. München, Alemania: Hanser Gardner Publications.

Hositrad Vacuum Technology. 2013. Vacuum Products / KF Flanges. Recuperado de: <http://www.hositrad.com/vacuum-products/kf-flanges>

Gutiérrez, J. G. (2007). Diseño de una Extrusora para Plásticos. *Universidad Tecnológica de Pereira*.

Guzmán Caraballo, k., Castilla Caballero, d. r., & Colina Marquez , j. a. (31 de diciembre de 2012). *Diseño, construcción y evaluación de un reactor fotocatalítico solar de placa plana para degradar ácido tereftálico*. (Universidad de

Cartagena, Tesis (Ingeniero Químico) --Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias E Ingenierías. Programa de Ingeniería Química) Recuperado el 18 de noviembre de 2015, de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/143>

H.A. Zondag V.M. van Essen R. Schuitema L.P.J. Bleijendaal A. Kalbasenka W.G.J. van Helden, M. Bakker. (2009). ENGINEERING ASSESSMENT OF REACTOR DESIGNS FOR THERMOCHEMICAL. *Energy Research Centre of the Netherlands*.

Hanley, S., Enders, k., Lehmann, A., & Domene, M. (2014). *Medium-Term Effects Corn Biochar Addition On Soil Biota Activities And Functions In A Temperate Soil Cropped To Corn, Soil Biology And Biochemistry*.

Haoran Yuana, b. T. (2015). Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 284-289.

Henreaux. (2012). *Efecto Del Biocarbón Combinado Con Fertilizantes Orgánicos Y Microorganismos Benéficos Sobre El Desarrollo, Productividad Y Resistencia De Las Plantas, Turrialba, Costa Rica. Tesis Magister Scientiae En Agricultura Ecológica. Turrialba, Costa Rica. Centro*.

Hernández Férez, M. d. (Alicante : Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 2008). *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados / M^a del Remedio Hernández Férez*. (l. q.--. doctorales, Ed.) 978-84-690-9287-3. Obtenido de <http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmck93n7>

Ing.Sonia Rincon, A. G. (2008). Pirolisis de Biomasa Departamento de Ingenieria Mecanica y Mecatronica.

Instituto Para La Energía Y El Medioambiente (lee Por Sus Siglas En Inglés). Convirtiendo La Basura En El lee. Universidad Estatal De Nuevo México . (2011). Obtenido de Recuperado de: <http://www.ieenmsu.com/2011/05/27/getting-the-dirt-at-the-iee/>

Iracane Daniel . (2006). *Nuevo Material De Prueba Reactor En Europa* (Vol. 38). Corea Sociedad Nuclear. Obtenido de http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=OJRHBJ_2006_v38n5_437

Joseph H. Kihedua, , , . (2016). Performance indicators for air and air–steam auto-thermal updraft gasification of biomass in packed bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 93-98.

Kansai, C. (2010). *Japón*. Obtenido de Recuperado de: <http://www.biwako.ne.jp/~kansai/e-pr-biotan.html>

Katia M. Noguera, J. T. (s.f.). Los Rellenos Sanitarios en Latinoamérica .

Lehmann L , S. (2009). *Biochar Terminology*. En: *Biochar for Environmental Management, Science and Technology*. London, Earthscan, p. 2. Obtenido de Recuperado de: http://books.google.com.co/books?id=w-CUty_JlfcC&printsec=frontcover&dq=Johannes+Lehmann&source=bl&ots=cmgWI_V3z5&sig=tnEdeJz1GA

Lehmann, I. (2003). *Soil fertility and production potential*. En: *Amazonian Dark Earths. Origin, Properties, Management*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 105. Obtenido de Recuperado de: <http://books.google.com.co/books?id=C6qGGAmxPBcC&printsec=frontcover&dq=Johannes+Lehmann&sour>

Li Chaia, J. B. (2015). Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. *Fuel Processing Technology*.

Li, B. Z. (2015). *Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China*. *Atmospheric Environment*.

Liang, F. G. (2014). *Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil*. *Journal of Integrative Agriculture*.

Libre, W. L. (3 de Junio de 2014). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Motor>

Liu, L. W. (2006). Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor. *Fuel Processing Technology*, 87, 863–871.

Lou, Y. Z. (2014). *Improvement to maize growth caused by biochars derived from six feedstocks prepared at three different temperatures* .

Luna. (2009). *Atavismo Agrario. Construir Suelos en los Llanos*. En: *Periódico El país*. Colombia. . Obtenido de Recuperado de: <http://historico.elpais.com.co/blogs/principal/blog1.php?b=36&n=1552>

Madrid, a. d. (2008). *departamento de residuos solidos* . Obtenido de recuperado de : <http://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Ayuntamiento/Medio-Ambiente/Residuos-y-limpieza-urbana/Parque-Tecnologico-de-Valdemingomez?vgnextfmt=default&vgnnextchannel=d6cd1a2a419be210VgnVCM1000000b205a0aRCRD>

Maharakham University, Kamriang, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand. (2013). Pyrolysis of cassava rhizome in a counter-rotating twin screw reactor unit. *Bioresource Technology*.

Manejo de residuos sólidos, de la norma a la gestión. (2015). *Portafolio* .

Manya. (2014). *Pyrolysis for Biochar Purposes: A Review to Establish Current Knowledge Gaps and Research Needs*. Thermo-chemical Processes Group (GPT), Aragón Institute of Engineering Research (I3A), University of Zaragoza, Technological College of Huesca, crta. Cuarte s.

Matiz. (2009). *Aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos mediante procesos microbiológicos en Puerto Inírida – Guainía*. Fundación Biológica Aroma Verde. Colombia. . Obtenido de Recuperado de: <http://www.aromaverde.org/contenido/RSD.pdf>

Maximino, R. I. (2013). Pyrolysis of Biomass Residues. 86.

Ministerio de Ambiente, V. y. (2007). Gestión integral de residuos o desechos peligrosos. 186.

Ministerio De Ambiente, V. Y. (2008). *Análisis de la producción de residuos sólidos de pequeños y grandes productores en Colombia, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA)*. . Obtenido de Recuperado de: http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/36666164373034386433323930303464/dimension_ca

Nacional, R. d.-G. (2008). *Ley 1269*. Bogota, D.C.

Navarro, A. L. (escuela superior politennica del litoral). Proyecto de investigación. Propiedades eléctricas de los materiales. facultad de ingeniería mecánica y ciencias de la producción.

Nieto Fernandez , J., Lopez De-Sa, E., & Plaza Mendez, A. (2014). *Carbon Dioxide Emissions From Semi-Arid Soils Amended With Biochar Alone Or Combined With Mineral And Organic Fertilizers*. *Science Of The Total Environment*.

OCADE, D. d. (s.f.). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*.

Ojeda , I. (2004). *Valorización energética y medioambiental de lodos de EDARS mediante pirólisis. Tesis Doctoral. Oviedo. Universidad de Oviedo. Departamento de Ingeniería Química y tecnología del medio ambiente. p 50.*

Ortega. (2009). *plan* . Obtenido de Recuperado de: <http://www.zonacatastrofica.com/el-biocarbon-procedente-del-reciclado-de-biomasa.html>

Osorio Velasco Jessi. (2013). *Efecto Catalico De Los Minerales Sobre La Calidad De Los Liquidos Producto Del Proceso De Pirolisis Rapida*. Colombia, Uinversidad Nacional De Colombia, Facultad De Minas Departamento De Procesos Y Energia.

P. Baggio M. Baratieri L. Fiori M. Grigiante D. Avi P. Tosi. (2009). Experimental and modeling analysis of a batch gasification/pyrolysis reactor. *Elsevier*, 1426–1435.

Paz Diego, A. G. (10 Noviembre 2014). Desarrollo de reactores de lecho fluidizado para la captura de CO₂ con CaO. En *Tesis presentada en el Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Unive*.

Pellicer, B. P. (2010/2011). *Torreaccion De Biomasa, Diseño Y Propuesta*. centro politecnico superior uinversida de zaragoza proyecto de carrera, ingenieria quimica.

Pgirs. (2007). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos. PGIRS 2007-2022. San Juan de Pasto. p. 63-64.*

Pgirs. (2007). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos. PGIRS 2007-2022. San Juan de Pasto. p. 8.*

PGIRS 2007-2022, R. D. (s.f.). Plan de Gestion Integral de Residuos Sólidos. San Juan de Pasto.

Plasticos/Extrusión. (s.f.). Obtenido de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.PLASTICOS.Extrusion.2005.pdf>

Qiang Hu, J. S. (November 2015). Effects of binders on the properties of bio-char pellets. *Applied Energy*, 508–516.

Quimica, A. R. (s.f.). *Incineración de Residuos Sólidos Urbanos*. Universidad Complutense de Madrid

Ramirez Gonzalez, H. H. 2009. Caracterización y modelamiento del perfil de temperatura al interior de un horno de pirólisis para biomasa. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de minas. Medellín.

Renza, J. E. (2008). Optimización del manejo de los residuos orgánicos para elaborar bio-abono en la planta de tratamiento de residuos sólidos. . *Especialización en Gerencia Ambiental* .

Rojas, L. R. (27 de mayo de 27 de mayo 2011). Diseño de un reactor catalítico de lecho fluidizado. *Universidad industrial de santander escuela de ingeniería química*, 01-02.

S. Murugan a, n. S. (2015). Research and development activities in pyrolysis – Contributions from Indian scientific community. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 282-295.

S.A., R. I. ((2008)). *Chile*. Obtenido de Recuperado de: <http://www.reciclajes.cl/>

Shantanu Kelkar Christopher M. Saffron Li Cha Jonathan Bovee Thomas R. Stuecken Mahlet Garedew Mahlet Garedew Robert M. Kriegel. (2015). Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. *Elsevier*, 137, 170-178.

Sirijanusorn S Sriprateep K Pattiya A. (2013). Pyrolysis of cassava rhizome in a counter-rotating twin screw reactor unit. *Elsevier*.

SKF, I. d. (s.f.). *Tolerancia ejes*. . Obtenido de <http://www.skf.com/uy/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/design-considerations/radial-location-bearings/dimensional-geometric-tolerances/tapered-shaft-seats/index.htm>

Someus, T. H. (2007-2013). Reducing mineral fertilisers & chemicals use in agriculture by recycling treated organic waste as compost and bio-char products. . *European Union Seventh Framework Programme*.

Soroush Aramideh Qingang Xiong Song-Chang Kong Robert C. Brown. (2015). Numerical simulation of biomass fast pyrolysis in an auger reactor. *fuel*, 234-242.

Sostenible, M. D. (2011). *Calentamiento global*. Obtenido de Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?conID=7715&catID=1265>.

Sostenible., M. d. ((2011)). *Calentamiento global*. . Obtenido de Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=135&conID=252>.

Stephen Joseph. (2010). Guidelines for the Development. *International Biochar Initiative*.

Suarez Caballero , J. (1995). *Estudio Cinetico De La Pirolisis De Lignina* . Obtenido de Tesis Doctoral Alicante, Universidad De Alicante Departamento De Ingenieria Quimica .

Szegedi, P. G. (15 de diciembre , 2013). Diseño E Implementacion De Un Reactor Continuo Para La Degradacion Quimica De Polimeros. santiago de chile facultad de ciencias fisicas y matematicas, departamento de ingenieria civil biotecnologia.

SZEGEDI, P. J. (2013). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR CONTINUO PARA LA.

Tchobanoglous, G. (Volumen 1 Pags. 47-48,). GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS. MC Graw Hill. .

Territorial, M. d. (2004). Agenda Ambiental Municipio de Pasto. Corponariño .

The Engineering Toolbox. 2012 “Melting and Boiling Temperatures,” The Engineering Toolbox. Recuperado de http://www.engineeringtoolbox.com/melting-boiling-temperatures-d_392.html.

Uncu. (2011,Argentina). Universidad Nacional De Cuyo. Obtenido de Recuperado de: <http://www.imd.uncu.edu.ar/paginas/index/aprovechamiento-de-residuos-organicos-para-la-produccion-de-biogas-en-colegio-tecnico-rural-escuela-n-4-035-julia-silva-de-cejas>

Messerle, V. E., Ustimenko, A. B., & Lavrichshev, O. A. (2016). Estudio comparativo de la gasificación por plasma de carbón: Simulation and experiment. *Fuel*, 164, 172-179.

Vidrasa. Vidrio Cuarzo / Propiedades. . (2015.). Obtenido de Recuperado de <http://www.vidrasa.com/esp/productos/cuarzo/cuarzoprop.html>.

Vilalta, M. D. G., & Corbella, L. P. (2008). *Estudio del comportamiento de reactores discontinuos y semicontinuos: modelización y comprobación experimental*. Universidad politécnica de Cataluña.

Wampler, T. P. (s.f.). Applied Pyrolysis Handbook, 2nd Editio. Boca Raton.

Wang, L. B. (2014). . Effect of crop residue biochar on soil acidity amelioration in strongly acidic tea garden soils. *Soil Use and Management*.

Xingang Zhao, Y. L. (2015). Waste incineration industry and development policies in China. *Waste Management*, 234-241.

Xinhao Ren, H. S. (February 2016). The changes in biochar properties and sorption capacities. *Elsevier, Chemosphere*, 2257–2263.

Yin Y-F He Gso, R. (2014). Effects of rice straw and its biochar addition on soil labile carbon and soil organic carbón. *Journal of Integrative Agriculture*.

Zajec, L. (2009). Slow pyrolysis in a rotary kiln reactor:. the School for Renewable Energy Science.

Zhao Xin-gang, J. G. (2016). Technology, cost, a performance of waste-to-energy incineration industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. pp 115-130.

Zurhold, R. (2014). Cómo limpio un horno eléctrico. *mia*, 01(NT), 01.

Vidrasa. 2015. VIDRIO CUARZO / Propiedades. Recuperado de <http://www.vidrasa.com/esp/productos/cuarzo/cuarzoprop.html>.

Sánchez Muñoz, M. del P. 2015. ¿Le apuestan los sistemas de manejo de residuos sólidos en el mundo al Desarrollo Sostenible?. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, núm. 12, 2015, pp. 445-450. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Estado de México, México

Coronel Aguilar, J. C. 2014. Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK, de Reactor Batch, Universidad Internacional SEK, <hdl.handle.net/123456789/1006>.

Acosta Mongua, J. A. y Pérez Moreno, R. J.. 2012. Estudio experimental y simulación de la saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie, Tesis (Ingeniero Químico) --Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias E Ingenierías. Programa de Ingeniería Química. Recuperado de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/107>.

Amicarelli, A., di Sciascio, F., Álvarez, H., & Ortiz, O. (2006). Estimación de Biomasa en un proceso Batch: Aplicación a la producción de-endotoxinas de Bt. In XXII congreso interamericano de ingeniería química.

Quintero, O. L., Amicarelli, A. A., di Sciascio, F., & Scaglia, G. (2008). Control basado en Metodos Numericos para la Obtencion de un Biocombustible.

Sendrós, C. F. (s/f). Modelización y Control de Temperatura de un Reactor "Batch" para un Proceso Químico Exotérmico.

Álvarez Medina, C. R. (2015). Monitoreo estadístico de procesos batch: aplicaciones a reactores de polimerización.

Burgos, A., Ignacio, M., Martínez, R., & Yohnny, F. (2015). Análisis y evaluación del cambio de diseño en una planta de bio-combustible móvil.

Bermejo, J. A. R. (2013). Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa (Doctoral dissertation, Universidad de La Rioja).

Arbeláez, J. I. M., Janna, F. C., Gutiérrez, C. A. G., Rentería, C. F. V., Velasco, J. O., Blanco, L. A.,... & Chaparro, J. A. S. (2013). Pirólisis rápida de biomasa. Universidad Nacional de Colombia.

Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J. L., & Gonzalo, A. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa.

Ángel, J. D. M., Vásquez, T. G. P., Zapata, J. P. L., & Vélez, M. B. (2013). Experimentos de combustión con cascarilla de arroz en lecho fluidizado para la producción de ceniza rica en sílice. Revista Facultad de Ingeniería, (51), 104-111.

Arteaga-Pérez, L. E., Casas-Ledón, Y., Cabrera-Hernández, J., & Machín, L. R. (2015). Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. Afinidad, 72(570).

Gómez, P., Adolfo, L., & Gil, N. J. (2015). Pirólisis de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) como alternativa de aprovechamiento en procesos de cogeneración [recurso electrónico].

Contreras Canteros, F. E. (2014). Estudio de la pirólisis catalítica de polietileno en un reactor semi-batch (Doctoral dissertation, Universidad de Chile).

Walendziewski, J. 2005. Craqueo continuo de residuos plasticos. Fuel Processing Technology. 86(12):1265_1278.

Aguado, J., Serrano, D.P., & Escola.J.M. 2006. Catalytic Upgrading of Plastic Wastes. Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels, pages 73_110.

Castro Gómez, Y., Vera Calderon M. P., & Acevedo Morantes M. T. «Diseño de reactores de prepolimerización y polimerización para la producción de ácido poliláctico en una planta industrial,» Universidad de Recuperado de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/113>.

Conesa Ferrer, J. A. 2001. Diseño de reactores heterogéneos, U. d. A. S. d. Publicaciones, Ed., ISBN: 84-7908-652-1.

Flores Cordoba, D. M. y Posada Noreña, J. 2007. Diseño conceptual de un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales, u. e. e. d. i. d. d. i. d. procesos, Ed., Medellín. pp. 24-25.

Díaz Concepción, A., Martínez Escanavero, J., García Ramírez, R. Benítez Montalvo R. y Marrero Osorio, S. 2015. Análisis para la modelación y optimización geométrica de un reactor tipo tornillo sin-fin empleando el método de grafos dicromáticos, habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Pellicer, B. P. 2010. Torreaccion De Biomasa, Diseño Y Propuesta, centro politecnico superior uinversida de zaragoza proyecto de carrera, ingenieria química.

Rojas, M. S. 2011. «Diseño de un reactor catalítico de lecho fluidizado,» uinersidad industrial de santander escuela de ingenieria quimica, pp. 01-02, 27.

Arroyo Morelos, C. V., Butrón Licon G. S., y Paredes, R. D. 2013. Diseño conceptual de un reactor catalítico para depuración de vapores de crudo y nafta generados en Oiltanking Colombia, Recuperado de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/60>.

Guzmán Caraballo K., Castilla Caballero D. R. y Colina Marquez J. A., 2015. Diseño, construcción y evaluación de un reactor fotocatalítico solar de placa plana para degradar ácido tereftálico. Universidad de Cartagena, Tesis (Ingeniero Químico). Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias E Ingenierías. Programa de Ingeniería Química. Recuperado de <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/143>.

Riquelme, H. U. C. (2014). Diseño de reactor, producción y caracterización de carbón activado de cáscaras de nuez para uso en separación de cianuros metálicos.

Carranza Campos, K., & Monge Leiva, M. (2014). Análisis tecno-económico y ambiental de una tecnología de tratamiento térmico para la generación de energía eléctrica mediante los residuos sólidos urbanos de la Zona de los Santos.

Morales Valdez, S. (2012). Proceso para la producción de un bicomcombustible de tercera generación, bioaceite, biogas y carbón a partir de una pirolisis solar (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Hidalgo Barrio, D., Marroquin, M., Ma, J., Gómez Rincón, M., Pesquera, A. A., & Giraldo, G. A. (2014). Sistema integral y sostenible para el reciclado y valorización de residuos múltiples--proyecto REVAWASTE. DYNA-Ingeniería e Industria, 89(3).

Villota Noboa, A. L., & Rubio Pullugando, G. M. (2012). Proyecto de factibilidad económica y financiera de una planta de producción de energía eléctrica utilizando biomasa de palma africana en el cantón La Concordia.

Alessandrini, M., & Ortíz, G. L. B. (2014). Biomasa y energía. Antecedentes, retos y perspectivas. Revista CINTEX, 8.

Gómez, K. A. C., & Garib, J. A. A. (2014). Síntesis de nanopartículas de β -SiC mediante microondas. Ingenierías, 17(63), 17.

Reyes Mejía, J. I. (2013). Reacción asistida por microondas para la obtención de hidrocarburos a partir de aserrín de madera.

Ferrera Lorenzo, N. (2015). Aprovechamiento integral del residuo de macoralga procedente de la obtención industrial de Agar-Agar. Aplicación en el campo de la Energía y el Medioambiente.

Garino, C. G. G., Mirasso, A. E., Storti, M. A., & Tornello, M. E. (2013). ANÁLISIS DE PERFILES DE TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE FRUTAS POR MICROONDAS.

Ruisánchez, E., Juárez-Pérez, E. J., Arenillas, A., Bermúdez, J. M., & Menéndez, J. A. (2014). Molienda asistida con microondas de un coque metalúrgico. Revista de Metalurgia, 50(2), e013.

Morales Infante, J. (2012). Contribución de las microondas en el desarrollo de la química verde, su descripción y aportación en procesos ambientalmente benignos (Doctoral dissertation).

Carletto, J., Bergoglio, M., Savarino, D., Medaglia, C., & Paz, L. (2013, October). CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO DE BAJO

COSTO CON REFLECTOR PASIVO DE ENLACE DE INTERNET Y ESPEJOS. In ASADES 2013-XXXVI Reunión de Trabajo-Tucuman.

Saravia, L., Cadena, C., Caso, R., & Fernández, C. (2001). El diseño de concentradores reflectores de tipo fresnel destinados a cocinas solares. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 57-65.

Fernández, J. L. A. (2011). La basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México. *Boletín IIE*.

Ripoll, X. F., & Mauri, F. S. (2008). 2. Situación actual en el tratamiento de los residuos orgánicos: aspectos científicos, económicos y legislativos. *Compostaje*, 43.

Klug, M. (2013). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37-40.

Salvador, A. R. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat.(Esp)*, 104, 331-345.

Castillo, E. (2008). Potencial del proceso de pirólisis como alternativa para la valorización de los residuos de cosecha en el sector azucarero colombiano.

Manals-Cutiño, E. M., Penedo-Medina, M., & Salas-Tort, D. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. *Tecnología Química*, 35(2), 244-255.

Chicaiza, P., & Tania, V. (2015). Análisis de alternativas de tratamientos de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para la EAP Zamorano.

Palacio Suárez, F. F. (2010). Estudio de la prefactibilidad de generar energía eléctrica utilizando como fuente primaria la cacota del café que se produce en la región de Cajamarca para satisfacer las necesidades de una finca que consume 1MWh por mes.

Gómez, P., Adolfo, L., & Gil, N. J. (2015). Pirólisis de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) como alternativa de aprovechamiento en procesos de cogeneración [recurso electrónico].

Rodríguez-Machín, L., López-Díaz, I., Ocaña-Guevara, V. S., Pérez-Bermúdez, R. A., & Clara, V. C. (2012). Termo-conversión de biomasa por pirólisis. Tendencias de investigación y desarrollo. Biomass thermo-conversion by pyrolysis. Trends in research and development. *Centro Azúcar*, 39(1), 27-32.

Aguilera, M. V., & Alvarado, A. F. A. (2015). Energía de fuentes vegetales de desecho: Biogás y Gasificación. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 1(2), 508-512.

Kalogiannis, K. G., Stefanidis, S. D., Michailof, C. M., Lappas, A. A., & Sjöholm, E. (2015). Pyrolysis of lignin with 2DGC quantification of lignin oil: Effect of lignin type, process temperature and ZSM-5 in situ upgrading. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 115, 410-418.

Mehrabian, R., Shiehnejadhesar, A., Scharler, R., & Obernberger, I. (2014). Multi-physics modelling of packed bed biomass combustion. *Fuel*, 122, 164-178.

Chocarro De La Fuente, A. (2015). Producción de hidrógeno a partir de biomasa en un proceso en dos etapas, pirólisis y reformado en línea.

Lechuga, F. T. (2008). ABC para comprender reactores químicos con multireacción. Reverte.

Martínez, J. M. R., & Lora, E. E. S. (Eds.). (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. José María Rincón Martínez, Electo Eduardo Silva Lora.

Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.

Scheirs, J., & Kaminsky, W. (Eds.). (2006). *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics*. John Wiley & Sons.