

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



**Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR DE OBTENCIÓN DE
BIOCHAR MEDIANTE PIROLISIS PARA SU USO COMO
COMBUSTIBLE EN PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

**Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en
Mantenimiento Eléctrico**

Autor:

Henry Wladimir Vaca Guevara

Tutor:

Msc. Julio Esteban Guerra Masson

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100357368-8		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vaca Guevara Henry Wladimir		
DIRECCIÓN:	Cotacachi, Parroquia de Quiroga		
EMAIL:	hwwacag@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062 537 392	TELÉFONO MÓVIL:	0985493665
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	Implementación de un reactor de obtención de biochar mediante pirolisis para su uso como combustible en plantas de generación eléctrica.		
AUTOR (ES):	Vaca Guevara Henry Wladimir		
FECHA: DD/MM/AAAA	14/02/2023		
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO		
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico		
ASESOR /DIRECTOR:'	Msc. Julio Esteban Guerra Masson.		



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACION DE USO Y PUBLICACION
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de marzo de 2023

EL AUTOR:

A handwritten signature in blue ink that reads "Henry Vaca". The signature is stylized with loops and a horizontal line underneath.

Vaca Guevara Henry Wladimir



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. Julio Guerra MSc.

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Vaca Guevara Henry Wladimir, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR DE OBTENCIÓN DE BIOCHAR MEDIANTE PIROLISIS PARA SU USO COMO COMBUSTIBLE EN PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA”** para la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico.

Ing. Julio Guerra MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo quiero dedicar en primer lugar a Dios y a mis Padres, Elena Guevara y Patricio Vaca por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria, en segundo lugar se lo quiero dedicar a mis hermanos: Jenny, Álvaro e Israel que de igual manera fueron parte importante para poder alcanzar este logro académico.

RESUMEN

El biochar es un producto con un alto contenido en carbono resultado de un proceso de pirolisis que consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno y con temperaturas que van desde los 200 °C hasta los 600 °C. El biochar se lo utiliza principalmente para mejorar las propiedades del suelo, sin embargo, existen estudios que analizan la aplicación del biochar como un tipo de combustible alternativo y con mejores propiedades físico-químicas que los combustibles convencionales. En el proyecto de tesis se presenta información acerca de la metodología y el procedimiento para la realización del diseño, construcción y funcionamiento de un reactor de pirolisis para la obtención de biochar a partir de las astillas de eucalipto como biomasa. El diseño y dimensionamiento del reactor se establecieron parámetros operacionales del reactor en base al valor de temperatura, cantidad y el tipo de biomasa a pirolisar. Se optó por realizar una pirolisis intermedia con un rango de temperatura de 400 - 500 °C. El reactor está constituido principalmente por un tubo de acero ASTM A 36, la cámara de reacción construida del mismo material con una capacidad máxima de 60 gramos de biomasa, el sistema de aislamiento térmico compuesto de una capa de material aislante de fibra de cerámica o Kaowool, el sistema de calentamiento compuesto por una resistencia eléctrica de 1200 W y un sensor que están conectados a un controlador de temperatura digital configurado en un control PID esto con el objetivo de controlar la temperatura de la biomasa durante todo el proceso de pirolisis, en el cual la biomasa es transformada a biochar. Para la validación del funcionamiento del reactor se realizaron tres pruebas de funcionamiento, en las cuales se adquirió las muestras de biochar. Para la caracterización del biochar se realizaron las pruebas de pH y conductividad obteniendo resultados de 8.6 y 25.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente además se realizó la prueba de humedad con un porcentaje de 3.29 %.

Palabras clave: Biochar, pirolisis, reactor, biomasa, adsorción, reacción.

ABSTRACT

Biochar is a product with a high carbon content resulting from a pyrolysis process that consists of the thermal discharge of biomass in the absence of oxygen and with temperatures ranging from 200 °C to 600 °C. Biochar is mainly used to improve soil properties, however, there are studies that analyze the application of biochar as a type of alternative fuel and with better physical-chemical properties than conventional fuels. The thesis project presents information about the methodology and procedure for carrying out the design, construction and operation of a pyrolysis reactor to obtain biochar from eucalyptus chips as biomass. The design and dimensioning of the reactor will produce operational parameters of the reactor based on the value of temperature, quantity and the type of biomass to be pyrolyzed. It was decided to carry out an intermediate pyrolysis with a temperature range of 400 - 500 °C. The reactor is mainly assembled by an ASTM A 36 steel tube, the reaction chamber built of the same material with a maximum capacity of 60 grams of biomass, the thermal insulation system composed of a layer of material used of ceramic fiber or Kaowool. , the heating system composed of a 1200 W electrical resistance and a sensor that are connected to a digital temperature controller configured in a PID control with the aim of controlling the biomass temperature throughout the pyrolysis process, in the which biomass is transformed into biochar. For the validation of the operation of the reactor, three performance tests were carried out, in which the biochar samples were obtained. For the characterization of the biochar, the pH and conductivity tests were carried out, obtaining results of 8.6 and 25.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectively, in addition, the humidity test was carried out with a percentage of 3.29%.

Keywords: Biochar, pyrolysis, reactor, biomass, adsorption, reaction.

ÍNDICE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
DEDICATORIA	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
A.1. ANTECEDENTES	XIV
A.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XV
A.3. JUSTIFICACIÓN	XV
A.4. ALCANCE	XVI
A.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	XVII
A.5. OBJETIVO GENERAL.....	XVII
A.6. Objetivos Específicos	XVII
1. CAPÍTULO 1.....	1
1.1 Definición de biomasa	1
1.1.1 Composición de la biomasa	1
1.1.2 Tipos de biomasa	2
1.1.3 Clasificación de la biomasa según su composición	3
1.1.4 Clasificación de la biomasa según su Origen.....	4
1.1.5 Clasificación de la biomasa según su estado.....	5
1.2 Características energéticas de la biomasa	5
1.3 Bioenergía.....	7
1.3.1 Tecnologías para la transformación de la biomasa en bioenergía.....	7
• Termoquímica.....	8
• Combustión	8
• Gasificación	8
• Pirolisis	8
• Físico-Química	9
• Producción de pellets.....	9
• Producción de biodiesel.....	9
• Biológica	9
1.4 Biochar.....	10
1.4.1 Propiedades físicas - químicas del biochar	10
1.4.3 Biochar como fuente de emisión negativa	11
1.5 Pirolisis de biomasa	12
1.6 Tipos de pirolisis para la obtención de biochar	14
1.6.1. Carbonización.....	14

1.6.2. Pirolisis Lenta (Convencional).....	14
1.6.3. Pirolisis Intermedia	15
1.6.4. Pirolisis Rápida.....	15
1.6.5. Pirolisis Flash	15
1.7 Características del biochar como combustible	15
1.7.1 Biochar y su uso como combustible en plantas de generación eléctrica.	16
1.8 Reactores de pirolisis.....	16
2. CAPÍTULO II.....	24
2.2 Metodología.....	24
2.3 Selección de Materiales.....	26
2.3.1 Acero ASTM A36	26
2.3.2 Material aislante (Fibra de cerámica o Kaowool).....	26
2.3.3 Resistencia eléctrica tubular	27
2.3.4 Termocupla Tipo K.....	28
2.3.5 Controlador de temperatura TC4S	30
2.3.6 Manómetro	31
2.3.7 Relé de estado sólido SSR (Solid State Relay)	31
2.4 Software.....	32
2.4.1 Solidworks	33
2.4.2 Matlab.....	33
2.5 Diseño y dimensionamiento del reactor de pirolisis	33
2.5.1 Parámetros de operación del reactor de pirolisis	34
2.5.1.1 Selección del tipo de biomasa	34
2.5.1.2 Selección del tipo de pirolisis	34
2.5.2 Diseño del recipiente de reacción	35
2.5.3 Aislamiento térmico	37
2.5.4 Diseño final del reactor de pirolisis.	38
2.5.5 Resultados obtenidos del diseño del reactor de pirolisis	39
2.6 Sistema de calentamiento.	40
2.6.1 Potencia requerida por la resistencia eléctrica.....	40
2.7 Controlador PID.....	41
3. CAPÍTULO 3.....	47
3.1 Zona de reacción	47
3.2 Sistema de aislamiento.....	47
3.3 Sistema de calentamiento y control de temperatura	47
3.4 Implementación del reactor de pirolisis.....	49

3.5 Pasos a seguir para el proceso de pirolisis.....	50
3.5.1 Preparación de la biomasa.....	51
3.5.2 Carga del reactor	51
3.5.3 Calentamiento y reacción de pirolisis.....	53
3.5.4 Proceso de descarga	53
3.5.5 Recolección de las muestras	54
3.7 Caracterización del biochar	54
3.7.1 Preparación de la muestra.....	54
3.7.2 Prueba de pH y conductividad eléctrica	55
3.7.3 Prueba de humedad	57
3.7.4 Cálculo del rendimiento de pirolisis	59
3.8 Análisis de resultados experimentales y discusión	60
3.9 Costos	61
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS	66
ANEXOS.....	70
Características generales técnicas:	73
Descripción de parámetros de display general.....	74
Control de Temperatura: Configurar “SET POIN” o ajustes de SV.	75
Control de Temperatura: Modificación de Tipo de Sensor de Temperatura	75
Control de Temperatura: Control de la ventana de histéresis para el CONTROL ON/OFF	76
Control de Temperatura: Modificación de salida de control: Tipo Relé Mecánico o RSS (Relé de Estado Sólido).....	77
Control de Temperatura: Configuración de PID	77
▪ Configuración PID.....	78
▪ Tipo de Control PID	78
▪ Auto-tunnig.....	79
Control de Temperatura: Configuración de Alarma 1 o 2	80
Control de Temperatura: Configuración de Bloqueo	80
Ajustes de fábrica	81
▪ Primer grupo de ajustes.....	81
▪ Segundo grupo de ajustes	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Tipos de biomasa formados a partir de la fotosíntesis.....	1
Fig. 2. Estructura de la biomasa compuesto por celulosa, lignina y hemicelulosa. (Ortiz, 2015)	2
Fig. 3. Cuadro de clasificación de los tipos de biomasa.	2
Fig. 4 Residuos de biochar	10
Fig. 5 Biochar como tecnología de emisión negativa (NET)	12
Fig. 6 Producción de biochar en función del aumento de temperatura.	14
Fig. 7 Esquema básico de un reactor de pirolisis.	17
Fig. 8 Partes que componen un reactor de tanque agitado.	18
Fig. 9 Reactor de lecho fijo.	19
Fig. 10 Esquema de un reactor de lecho fluidizado.....	19
Fig. 11. Reactor tipo Batch.....	20
Fig. 12 Reactor tipo horno.....	21
Fig. 13 Diagrama de bloques del procedimiento realizado para la construcción del reactor de pirolisis.....	25
Fig. 14 Fibra de cerámica	27
Fig. 15 Resistencia eléctricas tubulares	28
Fig. 16 Termocupla tipo K.....	29
Fig. 17 Gráfica teórica de representación de termopar tipo K – Letra K	29
Fig. 18 Control de temperatura PID TC4S	30
Fig. 19 Relé térmico.....	32
Fig. 20 Vista frontal y vista superior del recipiente de reacción	35
Fig. 21 Diseño final del recipiente de reacción y porta-cenizas	36
Fig. 22 Casco cilíndrico.....	36
Fig. 23. Diseño isométrico del reactor de pirolisis realizado en Solidworks.	39
Fig. 24 Gráfica experimental de temperatura vs tiempo horno biochar.....	43
Fig. 25 Gráfica de función de transferencia con sus respectivos polos	44

Fig. 26 Grafica de respuesta de la planta a un escalón unitario sin controlador	45
Fig. 27 Grafica de respuesta de la planta a un escalón unitario con controlador PID ..	46
Fig. 28 Instalación del material aislante alrededor del tubo de acero ASTM A36	48
Fig. 29 Diagrama de conexión eléctrica y control de temperatura.	48
Fig. 30 Conexión eléctrica del sistema de control de temperatura.	49
Fig. 31 Partes de la planta.	50
Fig. 32 Astillas de eucalipto	51
Fig. 33 Carga de la biomasa en el recipiente de reacción.	52
Fig. 34 Ajuste de la tapa superior del reactor.	52
Fig. 35 Temperatura máxima de la planta.....	53
Fig. 36 Muestras de biochar obtenido.	54
Fig. 37 A) Peso de la muestra, B) biochar triturado.....	55
Fig. 38 A) Peso de la muestra para pH, B) Peso de la muestra para conductividad....	55
Fig. 39 Mezcla de la muestra mediante un agitador.	56
Fig. 40 A) Medición de Ph, B) Medición de la conductividad.	56
Fig. 41 Disecador.....	57
Fig. 42 Peso del crisol vacío	58
Fig. 43 Peso de la muestra de biochar.....	58
Fig. 44 Retiro de la muestra.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CONTENIDO DE LIGNOCELULOSA EN DIFERENTES TIPOS DE BIOMASA.	4
TABLA 2. PODER CALORÍFICO DE ALGUNOS MATERIALES COMBUSTIBLES. (SÓLIDOS, LÍQUIDOS Y GASEOSOS)	6
TABLA 3 TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA	8
TABLA 4. REACCIONES QUÍMICAS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS.	13
TABLA 5. ASPECTOS Y RELEVANCIA PONDERADA	23
TABLA 6 CARACTERÍSTICAS DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA TUBULAR.	28
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE TERMOCUPLAS INDUSTRIALES.....	30
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DE TEMPERATURA TC4S.....	31
TABLA 9 CARACTERÍSTICAS DEL RELÉ TÉRMICO.....	32
TABLA 10 TIPOS DE PIROLISIS.....	34
TABLA 11. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL REACTOR	39
TABLA 12 ESPECIFICACIONES DE LOS DISPOSITIVOS PARA EL CONTROLADOR PID.	41
TABLA 13. DATOS EXPERIMENTALES DEL REACTOR.	42
TABLA 14. VALORES EXPERIMENTALES PID PARA LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	45
TABLA 15. RENDIMIENTO DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS	60

A.1. ANTECEDENTES

La energía eléctrica es una pieza clave en el desarrollo de la sociedad y en vista que no se la puede encontrar almacenada de forma natural, hasta la actualidad se han visto un sinnúmero de posibilidades de generar electricidad, desde el uso de combustibles fósiles como la quema de carbón, gas natural y otros para mover turbinas, transformando de esta manera, la energía calórica en energía eléctrica, hasta el uso del agua y el viento para transformar la energía mecánica en electricidad, sin embargo, hay que considerar que muchos de los recursos naturales utilizados para este fin son no renovables, además que generan contaminación al medio ambiente como es la generación eléctrica por medio de combustibles fósiles.

Hoy en la actualidad cada vez es más la necesidad de buscar energías sustentables y amigables con el medio ambiente que ayuden a disminuir la dependencia de combustibles fósiles y evitar o reducir las emisiones de CO₂, para generar industrias a partir de una economía circular. Las diferentes formas de generación de energía que existen en la actualidad, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, ayudan a disminuir los problemas antes mencionados, no obstante ninguna de estas tecnologías será capaz de revertir el cambio climático.

En el Ecuador prevalecen las centrales hidroeléctricas como la forma más importante de generación eléctrica, sin embargo para poder complementar la demanda que requiere el País, un gran porcentaje del total de la generación eléctrica proviene de las centrales térmicas, hasta diciembre de 2018 el Ecuador cuenta con 204 centrales termoeléctricas, 186 centrales termoeléctricas con motores de combustión interna (MCI), 11 centrales termoeléctricas con turbinas a gas (turbo gas) y 7 centrales termoeléctricas con turbinas a vapor (turbo vapor), las cuales utilizan una gran cantidad de combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo y sus derivados) para su funcionamiento.

Constantemente se realizan nuevas investigaciones y pruebas experimentales de nuevas mezclas de combustibles con el fin de encontrar una alternativa que ayude a reducir la emisión de contaminantes al medio ambiente, el biogás ha sido una alternativa “aceptable” como fuente de energía renovable en los últimos años, sin embargo, su uso también produce contaminación en el medio ambiente.

El biochar o biocarbón, es un material rico en carbono que se puede adquirir de diferentes biomásas, como son los residuos agrícolas, forestales y los residuos sólidos urbanos. Una de las técnicas de obtención de combustibles en base a la materia orgánica es la pirólisis que es un proceso de conversión termoquímica en ausencia de

oxígeno de la materia orgánica para obtener biocarbón, que es un material de alto nivel de presencia de carbono (80%) y un poder calorífico de entre 29,68 y 32,87 MJ/kg.

La biomasa en fase sólida, que originalmente fue concebido como fertilizante y como una solución al problema del manejo de desechos en las ciudades, pero que también se puede usar como combustible que reemplaza al carbón activado, pudiendo reducirse las emanaciones de CO₂ en un 50%.

A.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de esta investigación surge de la necesidad de encontrar nuevas alternativas de combustibles que ayuden a reducir la contaminación en el medio ambiente, por lo que el uso de combustibles para la generación en plantas termoeléctricas representa una gran cantidad de emisiones de CO₂, además de la contaminación que representa la obtención y los procesos de producción de combustibles fósiles. El Ecuador importa anualmente grandes cantidades de combustibles como el etanol y biodiesel para la generación eléctrica en centrales térmicas, lo que representa un gran costo para el Estado.

Según el Plan de Expansión de Generación (PEG) elaborado por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables se estimaron el consumo promedio de combustibles para el uso en las centrales térmicas del País, y las emisiones de dióxido de carbono por cada tipo de combustible. Para el año 2020, se estimaron las siguientes cantidades: 10925 [KPC] de gas natural, 81439.6 [Galón] de gas natural, 1140.1 [Galón] de diésel y 118297.8 [Galón] de Fuel Oil. Para ese mismo año se estimaron más de un millón de toneladas de emisiones de dióxido de carbono debido a la combustión, siendo el Fuel Oil y el gas natural respectivamente los combustibles con más emisiones de CO₂, lo cual genera un grave impacto ambiental.

Por otro lado, es necesario considerar que el mal manejo de residuos sólidos en las ciudades del País es cada vez más conflictivo, provocando problemas de salud en las personas, contaminación e insalubridad. Además estos desechos pueden servir como materia prima para la producción de combustibles, y no se los está aprovechando.

A.3. JUSTIFICACIÓN

La realización de este trabajo de grado es de gran relevancia, sin duda alguna el biochar es una alternativa de acción climática, accesible, de bajo costo y sostenible. Ayuda al manejo de residuos, mitigación del cambio climático, producción de energía y mejoramiento del suelo. Por esto es necesario implementar el biochar como una tecnología de emisión negativa (retiran el CO₂ de la atmósfera) frente al cambio

climático, para así poder disminuir los impactos negativos en el ambiente y salvaguardar la salud de las personas.

El biochar puede ser usado en centrales eléctricas para su uso como combustión sin la necesidad de tener que hacer adaptaciones en las instalaciones, a diferencia de lo que ocurre con la biomasa sin procesar, por lo que es mucho más rentable para las empresas que producen energía; además, esta co-combustión no produce alquitranes que dañen los quemadores de la planta. Por otro lado, la generación de biochar ayuda al medio ambiente al aportar al manejo adecuado de los residuos sólidos en el País.

Como combustible, el biochar representa beneficios en aspectos socioeconómicos y ambientales en comparación con los combustibles fósiles tradicionales, además posee una gran capacidad energética y de adsorción.

Además, la obtención de biochar mediante pirólisis, es un proceso atractivo y prometedor ya que los reactores de pirolisis representan una mejor alternativa que los reactores de combustión e incluso de gasificación, por lo que ofrece una mayor versatilidad con respecto a los productos finales que se pueden obtener.

A.4. ALCANCE

El presente trabajo de investigación tiene como propósito la implementación de un reactor que permita obtener biochar mediante un proceso de pirólisis, para su uso como combustible en plantas de generación eléctrica. Con el fin de poder tener una alternativa al uso de los combustibles tradicionales que se utilizan en la actualidad y que sean más amigables con el medio ambiente.

Se iniciará definiendo los tipos de obtención de biochar, así como también el tipo de biomasa más adecuada en base a sus características físico-químicas.

Luego se hará el diseño del reactor en base a una fundamentación teórica óptima, para posteriormente realizar su implementación. Para la implementación del reactor se tomarán en cuenta algunos parámetros importantes como son:

- Tipo de material y dimensiones del reactor: Se especificarán mediante el diseño del reactor.
- Temperatura de reacción: 450°C a 600°C, dependiendo del tipo de biomasa a utilizar.
- Tiempo de residencia y velocidad de reacción: Dependerá del tipo de pirólisis a escoger.
- Sistema de calentamiento: Mediante una resistencia eléctrica tubular.
- Control de temperatura: Por medio de un control PID.

Cabe mencionar que algunos datos en específico como: el tipo de material del reactor, la capacidad de procesamiento, las dimensiones del reactor, entre otros. No se pueden estimar, ya que primero se debe realizar el diseño del reactor.

Finalmente se comprobará la funcionalidad del reactor, y se realizará un análisis de resultados para determinar los tiempos, costos y la calidad del producto obtenido (biochar).

A.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo aprovechar los diferentes residuos que existen, para poder realizar su transformación a combustibles amigables con el medio ambiente que puedan usarse en plantas de generación eléctrica?

A.5. OBJETIVO GENERAL

Implementar un reactor que permita obtener biochar mediante un proceso de pirólisis, para su uso como combustible en plantas de generación eléctrica.

A.6. Objetivos Específicos

1. Describir los tipos de obtención de biochar para uso como combustible en plantas de generación eléctrica.
2. Diseñar un reactor de obtención de biochar mediante un proceso de pirolisis seleccionado.
3. Implementar el reactor y realizar un análisis de resultados del producto obtenido.

1. CAPÍTULO 1

BIOCHAR Y PROCESOS DE OBTENCIÓN MEDIANTE PIROLISIS

1.1 Definición de biomasa

Según Fernando Nogués, (2010) define a la biomasa como: “Sustancias orgánicas que tienen su origen en los compuestos de carbono formados en la fotosíntesis”, a partir de este fenómeno se producen los diferentes tipos de biomasa de origen vegetal, animal y residuos sólidos provenientes de industrias agrícolas y forestales, como se puede observar en la Figura 1.

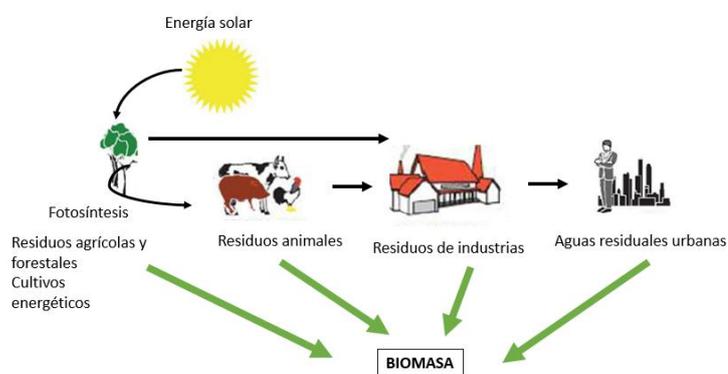


Fig. 1. Tipos de biomasa formados a partir de la fotosíntesis.

Fuente: (Bernal, 2019)

Dichas sustancias pueden ser sometidas a diferentes procesos previamente a su utilización, ya sean procesos naturales o artificiales de poca o alta complejidad. La biomasa puede transformarse en calor y electricidad a través de cuatro procesos básicos que son: combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirolisis.

1.1.1 Composición de la biomasa

La biomasa de origen vegetal, como lo es la biomasa residual de origen agrícola está compuesta por más de 300 componentes, sin embargo está conformada principalmente por: lignina, celulosas y hemi-celulosas (azúcares, etanol y ácido fórmico) (Bernal, 2019).

En la Figura 2 se puede observar la estructura de la biomasa residual de origen vegetal, compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina.

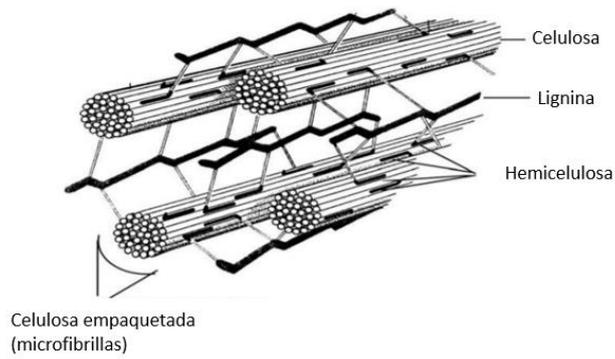


Fig. 2. Estructura de la biomasa compuesto por celulosa, lignina y hemicelulosa. (Ortiz, 2015)

Fuente: (Herguedas, 2012)

La biomasa residual contiene hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, en algunos tipos de biomasa también contiene azufre y partes de compuestos inorgánicos. En biomasa de residuos agrícolas el porcentaje de concentración de ceniza está entre el 15% aproximadamente. (Ortiz, 2015)

1.1.2 Tipos de biomasa

La biomasa se puede clasificar según su composición, según el origen y según su estado como se puede observar en la Figura 3.

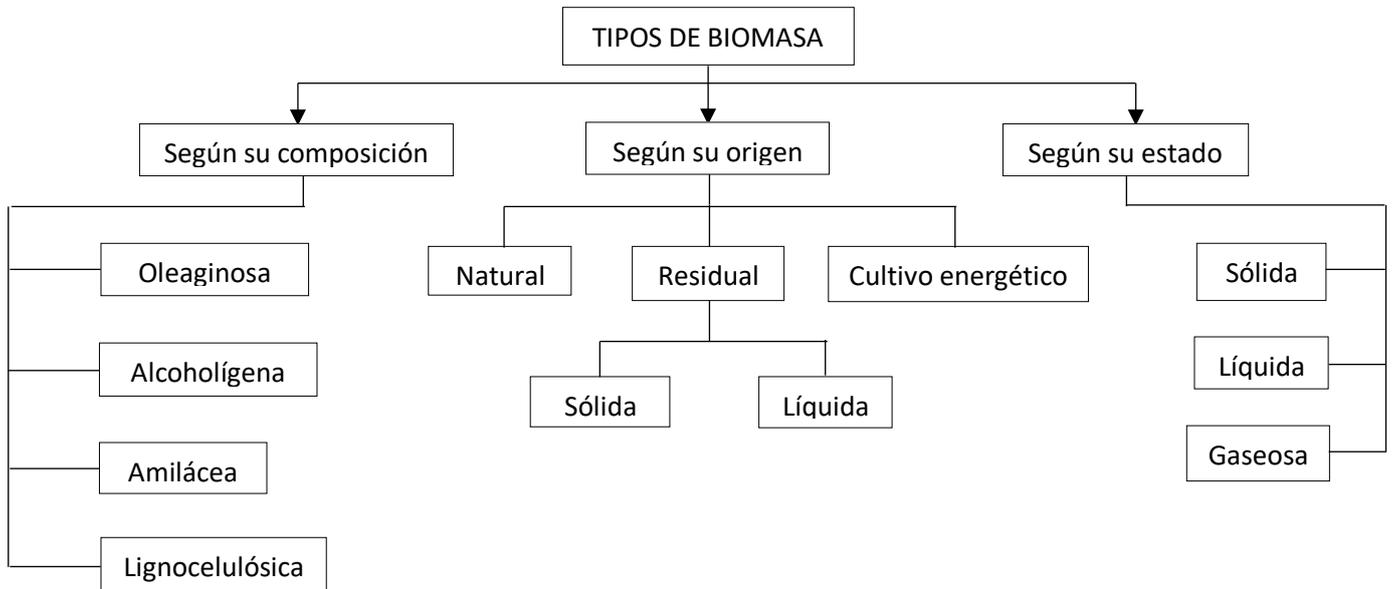


Fig. 3. Cuadro de clasificación de los tipos de biomasa.

Fuente: (Herguedas, 2012)

1.1.3 Clasificación de la biomasa según su composición

La biomasa según su composición se clasifica en:

- Biomasa Oleaginosa

Dentro de la biomasa oleaginosa se tiene los aceites vegetales que son considerados como una alternativa renovable y está enfocado para ser sustituto parcial de los combustibles fósiles. Estos aceites están compuestos principalmente de triglicéridos, y poseen una relación atómica oxígeno/carbono cercana a 0.1 (Domínguez, 2017). Proviene de las plantas oleaginosas que son muy beneficiosas para el ser humano, debido a sus frutos y semillas que poseen un alto porcentaje de ácidos grasos o aceites comestibles.

- Biomasa Alcohólica

Se utiliza especialmente en procesos de fermentación de azúcares para la producción de bioetanol.

- Biomasa Amilácea

Aquí se puede mencionar el almidón y la inulina que son hidratos de carbono, así como también las especies herbáceas que poseen azúcares complejos y que a través de un proceso de hidrólisis se puede convertir en azúcares más simples. Por ejemplo; los cereales como el trigo, cebada y maíz dulce.

- Biomasa Lignocelulósica

Según el autor Casillas, (2010) la biomasa lignocelulósica se forma de materiales como madera, residuos forestales, residuos de la industria papelera o papel reciclado, desechos agrícolas y residuos sólidos urbanos.

En la industria dedicada a la producción de etanol, también se le conoce con el nombre de biomasa celulósica, ya que la materia prima principal para la obtención de la glucosa es la celulosa, y a través de un proceso de fermentación de la glucosa se puede obtener el etanol.

En la Tabla 1 se muestra el porcentaje de lignocelulosa de los tipos de biomasa.

TABLA 1 CONTENIDO DE LIGNOCELULOSA EN DIFERENTES TIPOS DE BIOMASA.

Contenido de lignocelulosa (%)			
Tipo	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Madera suave	41	24	28
Madera dura	39	35	20
Corteza de pino	34	16	34
Paja de trigo	40	28	17
Cáscara de arroz	30	25	12
Turba	10	32	44

Fuente: (Fajardo, 2011)

El proceso de obtención de celulosa es muy complejo, ya que el material celulósico no es tan accesible debido a que se encuentra mezclado en las paredes celulares en una sólida matriz con otros compuestos como la lignina que es una sustancia cementante y protectora. (Casillas, 2010)

1.1.4 Clasificación de la biomasa según su Origen

La biomasa según su origen se clasifica en:

- Biomasa Natural

La biomasa natural no interviene el hombre en el proceso de su generación, en este grupo están lo que es residuos animales, forestales o acuicultura, que se pueden aprovechar como fuente energética. (Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no hayan sufrido intervención humana.)

- Biomasa Residual

Se encuentra en los residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades humanas y los vertidos que se denominan biodegradables. Estos a su vez se clasifican en sólidos y líquidos. (Herguedas, 2012)

Entre los más comunes tenemos:

- Residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería.
- Residuos de industrias agrícolas y forestales.

- Residuos sólidos urbanos (RSU) y aguas residuales urbanas (ARU).
- Residuos ganaderos.
- Residuos agroindustriales.

- Cultivos energéticos

Son aquellos cultivos que sirven para la producción de energía, más no sirven para fines alimentarios. A diferencia de los cultivos agrícolas alimenticios, los agro-energéticos son seleccionados en base a la producción de cantidad de biomasa, y no de calidad, y suelen ser especies caracterizadas por su robustez a fin de abaratar los costos de cultivo y, por tanto, el precio de la biomasa final. (Herguedas, 2012).

1.1.5 Clasificación de la biomasa según su estado

Dentro de la biomasa según su estado se clasifican en:

- Biomasa Sólida

En la biomasa sólida están lo que es: las hojas y ramas de los árboles, los troncos y cortezas o residuos agrícolas que se desprenden de la vegetación. La mayoría de los distintos tipos de biomasa sólida que existen son fáciles de conseguir y muy económicos.

- Biomasa Líquida

Este grupo engloba a los residuos ganaderos, los residuos industriales biodegradables y las aguas residuales urbanas (ARU), la ventaja de este tipo de biomasa es que posee mayor densidad energética.

- Biomasa Gaseosa

Se trata del metano o biogás obtenido a partir de residuos de animales, residuos agroalimenticios, vertederos, entre otros, que son sometidos a diferentes procesos (termoquímicos, microbiológicos) (Bernal, 2019).

1.2 Características energéticas de la biomasa

Entre las más características más importantes tenemos:

- Composición química

En general casi todos los tipos de biomasa están compuestos por una parte orgánica, otra parte inorgánica y agua, en el proceso de combustión se quema la parte orgánica, y la parte inorgánica contribuye en el proceso de combustión formando cenizas o residuos sólidos. (Herguedas, 2012)

Para determinar la composición química de la biomasa original se realiza un análisis de los elementos más importantes, como el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno(O), nitrógeno (N), azufre (S), entre otros.

- Contenido en humedad

También se denomina humedad relativa, que es la relación de la masa de agua contenida por kg de materia seca, la presencia de agua en la biomasa representa una desventaja como fuente de energía ya que se dificulta el proceso de su aplicación debido a que primero debe de ser secada. Entonces mientras menor sea el contenido de humedad, mejor será el proceso de combustión y el valor calorífico de la biomasa. (Ortiz, 2015)

En los procesos de conversión energética se requieren valores energéticos menores al treinta por ciento, si el valor es superior se debe implementar procesos de acondicionamiento y secado de la biomasa antes de realizar la conversión de energía.

- Porcentaje en cenizas

Indica la cantidad de materia sólida no combustible por cada kilogramo de materia prima, es preferible que este porcentaje sea el menor posible con respecto a la materia seca.

En base a (Guerrero, 2016), menciona que las cenizas provenientes de un proceso de pirolisis están formadas por cationes y aniones presentes en la biomasa, entre los elementos más comunes están: el calcio, potasio, sulfato, fosfato y silicato.

- Poder calorífico

Es la energía térmica que se separa del combustible cuando la biomasa se quema por completo, además se un parámetro que permite determinar la energía disponible en la biomasa y se puede expresar como la cantidad de energía por unidad física (Joule por kilogramo). (Herguedas, 2012). En la Tabla 2, muestra los valores del poder calorífico en (KJ/Kg) de algunos materiales combustibles.

TABLA 2. PODER CALORÍFICO DE ALGUNOS MATERIALES COMBUSTIBLES. (SÓLIDOS, LÍQUIDOS Y GASEOSOS)

COMBUSTIBLES	PODER CALORÍFICO (KJ/Kg)
Carbón	14600 – 26700
Plásticos, papel, basura	17600 – 20000
Madera	16000 – 20000
Lodos de depuradora secos	12000 – 20000
Lodos de depuradora húmedos	1000 – 3000
Gasoil	45500
Gas natural	38000
Gas de coque	19000 – 22000
Gas de carbón sintético	10800
Gas de alto carbono	4400 – 53000

Fuente: (Angel Beltran, 2014)

Los combustibles sólidos son los que se queman produciendo cenizas. Su combustión depende de factores como su contenido de humedad, velocidad de propagación, forma, naturaleza del foco de calor.

1.3 Bioenergía

La bioenergía consiste en aprovechar todas las propiedades energéticas que tienen los distintos tipos de biomasa (natural, residual, entre otros), con el fin de obtener fuentes de energías renovables. Dicha energía puede ser utilizada como biocombustible sólido o también puede ser transformado en biolíquido o gas.

Los biocombustibles con respecto a los combustibles fósiles representan muchas ventajas como por ejemplo:

- Son fuentes de energía renovable, ya que en su mayoría provienen de recursos naturales como las plantas y el sol.
- Reducen las emisiones de CO₂ en la atmósfera.
- Mejora las condiciones ambientales.
- Su competitividad ha aumentado en los últimos años. (Bernal, 2019)

1.3.1 Tecnologías para la transformación de la biomasa en bioenergía

Debido a la gran variedad de biomasa que existen, esto sumado al desarrollo de diferentes tecnologías permite la creación de diversas aplicaciones para la transformación de biomasa en bioenergía como la producción de energía térmica, electricidad, biocombustibles, gases combustibles, entre otras.

Existen tres clases de tecnologías que se clasifican dependiendo de las condiciones en las que operan cada una, como se puede observar en la Tabla 3.

TABLA 3 TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA

Grupos generales de tecnologías de transformación de biomasa		
Termoquímica	Físico-Química	Biológica
Combustión	Producción de pellets	Digestión Anaeróbica
Pirolisis	Producción de biodiesel	Fermentación Alcohólica
Gasificación		

Fuente: (Bernal, 2019)

Estos procesos de conversión de la biomasa dependen de factores como la composición, grado de humedad y producto final deseado.

- **Termoquímica**

La termoquímica es una rama de la Termodinámica experimental y estudia el intercambio de energía como calor y trabajo que experimenta cualquier proceso fisicoquímico, y estos procesos por lo general son reacciones químicas. Para la conversión de biomasa con bajo contenido en humedad es recomendable utilizar los procesos termoquímicos.

Existen tres procesos a partir de la Termoquímica que son: la combustión, pirolisis y gasificación.

- **Combustión**

Este proceso consiste en quemar directamente la biomasa en una caldera, y a partir del calor que se produce es aprovechado para generar vapor de agua y accionar una turbina y un generador de electricidad. (Bernal, 2019)

- **Gasificación**

Es un proceso termoquímico mediante el cual se produce la transformación de un material de estado sólido o líquido, en un gas combustible, este proceso puede ser realizado bajo condiciones de alta temperatura en presencia de un agente gasificante (Aire, oxígeno, vapor de agua, etc.) (Probiomasa.gob.ar, 2018).

- **Pirolisis**

Este proceso es el más indicado para la obtención de biochar o biocarbón.

- Físico-Química

Esta tecnología modifica la composición interna o molecular de las sustancias y también su forma, como, por ejemplo: disoluciones, catálisis, electrólisis, entre otros.

Los procesos a partir de la físico-química son: producción de pellets y producción de biodiesel. (Energiza.org, 2020), esta tecnología a su vez se clasifica en:

- Producción de pellets

La fabricación de pellets se realiza a partir de biomasa de origen orgánico que se somete a un proceso de **extrusión**, la madera es la mejor biomasa para fabricar pellets, ya que produce pellets de excelente calidad y de manera natural. Los pellets se usan como combustible para calderas y estufas. (EnergíasRenovalbes.info.com, 2014)

- Producción de biodiesel

El biodiesel se obtiene a partir de los aceites vegetales y grasas animales, las materias primas más utilizadas para este fin son: la soja, la colza y el girasol, se utiliza en los motores de combustión, ya que aumenta su rendimiento, eficiencia y además aumenta la vida útil del motor. (Lesly Tejeda Benítez, 2012) Debido a que el biodiesel tiene una mayor capacidad como lubricante, produce una correcta y completa combustión sin necesidad de realizar alguna modificación en los motores.

- Biológica

Existe dos tipos de tecnología biológica, las cuales son: digestión anaeróbica y fermentación alcohólica.

- Digestión Anaeróbica

Según (Bernal, 2019) la digestión anaeróbica es un proceso de fermentación microbiana que se lo realiza en ausencia de oxígeno y da como resultado una mezcla de gases como el metano y dióxido de carbono, mejor conocido como el “biogás” y también una especie de “lodo” que contiene los microorganismos causantes de degradar la materia orgánica. Dicha materia orgánica por lo general es un tipo de biomasa residual que contenga un alto contenido en humedad como residuos de comida, residuos ganaderos, lodos y también aguas residuales domésticas e industriales (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2016).

- Fermentación Alcohólica

De acuerdo con (Christian Serrato Monroy, 2016) la fermentación alcohólica es un proceso mediante el cual se obtienen líquidos como el alcohol etílico (etanol), a partir de la biomasa con alto contenido en azúcares, almidones o celulosa. El etanol es

empleado como biocombustible para reemplazar a los combustibles en los motores de combustión interna.

1.4 Biochar

La Iniciativa Internacional de Biochar (IBI, 2014) define al biochar como un material sólido obtenido a partir de un proceso de conversión termoquímica (pirólisis) de biomasa, dando paso a la transformación de residuos sólidos orgánicos en un carbón fijo. Si el biochar es obtenido a partir de un proceso de pirólisis a una temperatura de alrededor de 600°C, el biochar obtenido tendrá un alto contenido de carbono, y por lo contrario si es obtenido a bajas temperaturas (400°C) conservan aún compuestos volátiles. (South Sustainability, 2021)

En la Figura 4, se puede observar el biochar, su forma es muy semejante al carbón, sin embargo, su textura es mucho más fina y en partes más pequeñas.



Fig. 4 Residuos de biochar

Fuente: (Bermeo A, 2014)

Las materias primas más utilizadas para la obtención de biochar mediante el proceso de pirólisis son la biomasa residual y residuos orgánicos urbanos y de origen vegetal como por ejemplo: cáscaras de frutas, los restos de poda, residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, etc. (Gabriela Orozco Gutierrez, 2020).

1.4.1 Propiedades físicas - químicas del biochar

En relación a las propiedades físicas podemos mencionar que el biochar es un sólido carbonoso, de color negro con una superficie intrincada y desordenada, según estudios de microscopía tiene una estructura amorfa (Escalante, 2016).

El biochar presenta relaciones O/C más altas que el carbón mineral, está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa, y la lignina como se había

mencionado anteriormente. Durante el proceso de pirolisis, la degradación térmica entre 250 y 350°C, se forman muchos compuestos volátiles (vapores de agua y alquitrán, hidrocarburos, ácidos) quedando una matriz de carbono amorfa y rígida. (Escalante, 2016)

El mismo autor (Escalante, 2016) señala que, el producto final del proceso de pirolisis (biochar), consiste en dos fracciones estructurales principales: láminas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas, ambas asociadas con enlaces de carbono en forma de anillo de tipo benceno con oxígeno o hidrógeno.

La composición química del biochar depende del tipo de biomasa que se utilice, está compuesto básicamente por nitrógeno, fósforo, carbono, oxígeno también se destaca por tener la presencia de elementos asociados a la fracción mineral como: potasio, calcio, magnesio, azufre, entre otros.

1.4.2 Capacidad de adsorción del biochar

Según (Acero, 2018)La adsorción es la adhesión física y la unión de iones y moléculas sobre la superficie de otra fase líquida o sólida.

Está es sin lugar a duda, la mejor cualidad que posee el biochar, ya que tiene la capacidad de capturar metales pesados, y elementos contaminantes como el dióxido de carbono, esto lo convierte en un elemento de biorremediación.

Este método se ha empleado mucho en el tratamiento de aguas residuales industriales, el cual consiste en aprovechar las interacciones moleculares para recolectar y remover el elemento contaminante del medio acuoso (Acero, 2018).

1.4.3 Biochar como fuente de emisión negativa

Según el artículo de la revista (South Sustainability, 2021) señala que los términos “emisión negativa” se refiere como una cualidad excelente que posee el biochar, ya que captura el CO₂ de la atmósfera y lo almacenan en otro lugar. Entonces el biochar representa una alternativa de acción climática muy importante.

En la Figura 5, se muestra cómo funciona el biochar como una tecnología de emisión negativa (NET) de una manera eficiente.

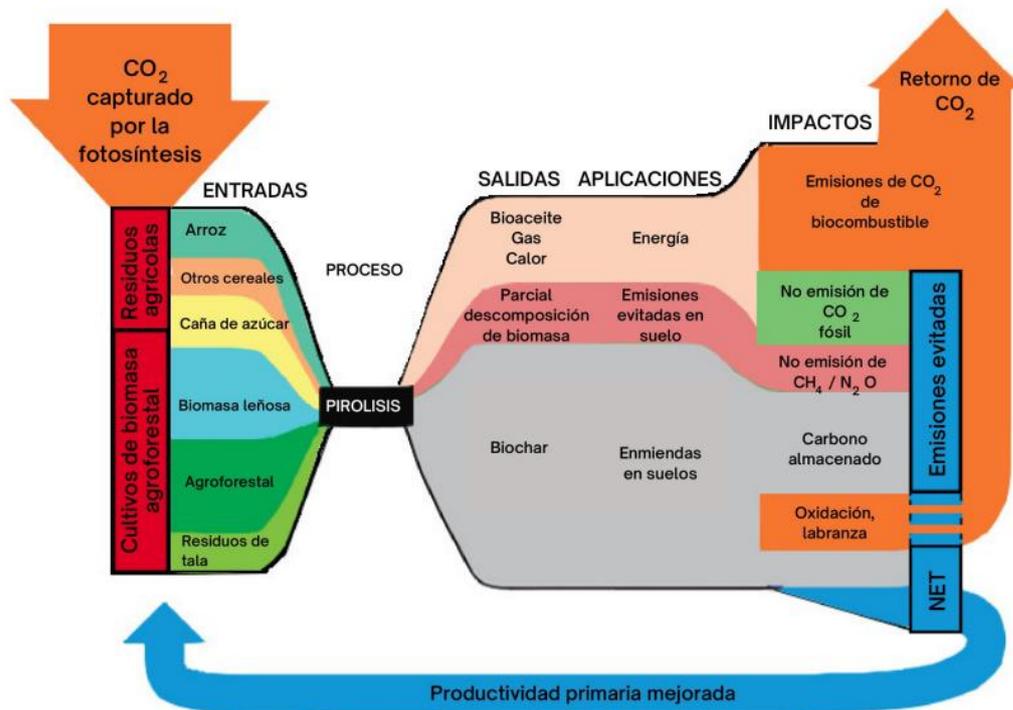


Fig. 5 Biochar como tecnología de emisión negativa (NET)

Fuente: (Jordy Pariona-Palomino, 2020)

El autor (Prieto, 2016) comenta en su trabajo de investigación sobre el biochar, que debido al proceso de la fotosíntesis son retiradas aproximadamente 60 giga toneladas de carbono atmosférico cada año. Esto considerando que la pirolisis transforma el 50% del carbono del material inicial en biochar y el 50% restante en bioaceites y syngas, los cuales pueden usarse como sustitutos de los combustibles fósiles para la obtención de energía con una eficiencia media del 62%.

1.5 Pirolisis de biomasa

Según (Sadegh Papari, 2015) la pirolisis es un proceso que se descubrió hace más de un siglo, y proviene de las palabras griegas “piro”, que significa fuego, y “lisis”, que quiere decir descomposición.

Por lo tanto la “Pirolisis” se define como un proceso de descomposición termoquímico de la biomasa, cuando es sometida a temperaturas superiores a los 400°C en un ambiente inerte, es decir sin presencia de oxígeno. Por lo que los materiales orgánicos se descomponen térmicamente, liberando una fase de vapor y produciendo una fase sólida residual, dichos elementos son transformados en materiales con un gran potencial de uso energético. (CEUPE, 2018). Mientras más alta es la temperatura del proceso se obtiene una proporción mayor de gases y menos cantidad de residuos sólidos.

En este proceso la biomasa basada en compuestos de carbono o de baja densidad energética se descompone para poder formar bio-aceites, hidrocarburos condensables, “biochar” o biocarbón que son compuestos de alta densidad energética y un gas relativamente de baja densidad energética (Escalante, 2016). Además se reduce la masa orgánica inicial del material entre el 25-75%, cambiando su composición y se genera una determinada cantidad de carbono orgánico. (Gordillo M. , 2018).

Durante el proceso de pirolisis, ocurren ciertas transformaciones físicas y químicas algo complejas que dependen principalmente del tipo de biomasa inicial y de las condiciones en que se realice la pirolisis, por ejemplo: la temperatura, presión, tiempo de residencia de la materia prima en el reactor, entre otros. (Olmo, 2016)

En base a (Dario Bastidas, 2019), la biomasa se descompone durante el proceso de pirolisis a partir de los 200 a 400 °C, en este rango de temperatura se llega hasta el 95 % de degradación total de los materiales lignocelulósicos, en esta etapa se produce la formación del biochar y gases condensables.

En la Tabla 4 se muestra una lista de los rangos de temperatura y las reacciones químicas que ocurren en el proceso de pirolisis.

TABLA 4. REACCIONES QUÍMICAS DEL PROCESO DE PIROLISIS.

Temperatura (Rango °C)	Reacción Química
100-120	Deshidratación
250	Desoxigenación y desulfurización. Disociación molecular de agua y dióxido de carbono, comienza la liberación de sulfuro de hidrógeno.
340	Rotura de enlaces en compuestos alifáticos. Comienza la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros.
380	Fase de carbonización. Concentración de carbón en los residuos.
400	Rotura de enlaces C-O y C-N
400-600	Descomposición de los materiales bituminosos. Generación de biochar, aceites y alquitranes.
600	Cracking de los materiales bituminosos. Generación de hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos (derivados de benceno)
> 600	Dimerización de las olefinas (etileno) a α - butileno, generación de compuestos aromáticos volátiles.

Fuente: (Fajardo, 2011)

Vale mencionar que los rangos de temperatura para producir biochar por pirólisis están entre los 400 a 600 °C, una vez sobrepasado estos rangos se obtiene mayor parte líquida y gaseosa.

1.6 Tipos de pirólisis para la obtención de biochar

Esta tecnología se clasifica dependiendo de algunos factores como: estructura y composición de la biomasa, velocidad de calentamiento que se mide en (°C/s o K/s), velocidad de enfriamiento, el tiempo de residencia, temperatura máxima y el producto que se va a obtener. Además (Otto Fernando Balseca, 2021) considera que el proceso de pirólisis se clasifica principalmente en lenta y rápida, sin embargo otros autores también consideran la pirólisis intermedia, flash, entre otras.

En todos los procesos de pirólisis se obtienen tres productos:

- Sólidos (biochar y cenizas)
- Líquidos (bio-aceite y alquitrán)
- Gases (Gas de síntesis o biogás)

1.6.1. Carbonización

Este es el método de pirólisis más antiguo, se emplean temperaturas por debajo de los 400°C produciendo así una mayor cantidad de parte sólida (Biochar), sin embargo este proceso tiene una gran desventaja ya que el tiempo de residencia es mucho mayor que los otros tipos de pirólisis (Horas-días).

1.6.2. Pirólisis Lenta (Convencional)

Con este método se obtienen tres productos: sólidos, líquidos y gases, se emplean temperaturas entre los 400°C, con tasas de calentamiento muy bajas, menores a 100°C/min, el tiempo de residencia de 2 a 4 horas aproximadamente.

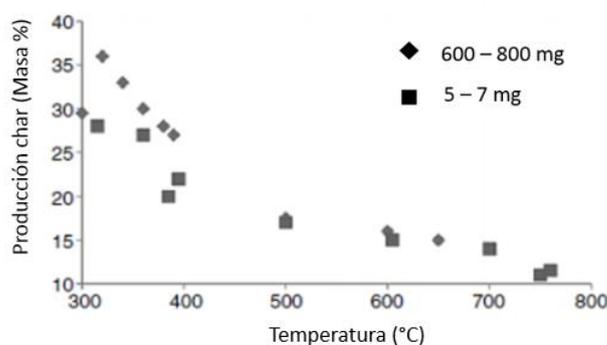


Fig. 6 Producción de biochar en función del aumento de temperatura.

Fuente: (Montaño, 2017)

En la Figura 6, se puede ver que la cantidad de biochar producido depende directamente de la temperatura del proceso de pirolisis, entonces a mayor temperatura, la cantidad de parte sólida disminuye.

1.6.3. Pirolisis Intermedia

Los rangos de temperatura están entre los 400-500°C, con una velocidad de calentamiento muy buena, en estas condiciones se reducen la fracción líquida orgánica pero a su vez aumenta el rendimiento del biochar con respecto a la pirolisis rápida, por lo que es más recomendable utilizar este proceso para la producción de biochar. (García, 2016)

1.6.4. Pirolisis Rápida

Se trabaja con temperaturas alrededor de 650° C, con tiempos de residencia muy bajos (segundos) del vapor en la zona de reacción, con este método se produce una mayor cantidad de la fracción líquida por lo que es usado mayormente para la producción de bio-aceites. La velocidad de calentamiento es de 1000° C/seg.

1.6.5. Pirolisis Flash

El proceso es muy similar a la pirolisis rápida, con la diferencia que se emplean temperaturas superiores a los 650 °C, la biomasa se descompone para generar principalmente vapores, aerosoles y una determinada cantidad de coque y biochar. La pirolisis flash es un proceso avanzado donde se utilizan parámetros cuidadosamente controlados para obtener una mayor proporción de líquido siendo este del 75% aproximadamente (Klug, 2012).

1.7 Características del biochar como combustible

Varios estudios demuestran el uso del biochar como combustible, en el artículo científico de (Engineering, 2022) que lleva como tema “Biochar, un sustituto de los combustibles fósiles” señala que el biochar obtenido a base de turba de coco posee un alto contenido en carbono fijo y también posee excelentes cualidades como la aromaticidad

En ese mismo estudio se realizó un análisis proximal de la turba de coco, en donde se pudo detectar un porcentaje muy bajo de humedad, es decir, un 3%. Mientras que la materia volátil era del 31 %, el contenido de cenizas después del análisis proximal resultó ser del 36 %. Por lo tanto, el carbono fijado fue del 30%, lo que mostró un

potencial positivo de la biomasa para ser utilizada con el fin de producir biocombustibles alternativos.

Además, el biocarbon tiene un amplio espectro de concentración que lleva numerosos derivados del benceno y otros hidrocarburos que los hacen ricos en carbono. El aumento de la aromaticidad conduce a una mejor estabilidad, que es un atributo importante en la producción de combustibles (Engineering, 2022). Los resultados del análisis mostraron que los biochars tienen el potencial de reemplazar los combustibles fósiles convencionales debido a su alto contenido de carbono fijo y propiedades fisicoquímicas. (Engineering, 2022)

1.7.1 Biochar y su uso como combustible en plantas de generación eléctrica.

Las aplicaciones de uso del biochar podría extenderse hasta el mercado de los combustibles que son usados en plantas de generación eléctrica y la transformación de metales (Medina, 2019). Una de las ventajas para su uso en el proceso de combustión, es que no se necesita hacer adaptaciones en las instalaciones, a diferencia de lo que ocurre con la biomasa sin procesar, por lo que es mucho más rentable para las empresas que producen energía; además, esta co-combustión no produce alquitranes que dañen los quemadores de la planta (Beltran & Rojas, 2014).

Como combustible, el biochar representa beneficios en aspectos socioeconómicos y ambientales en comparación con los combustibles fósiles tradicionales, además posee una gran capacidad energética y de adsorción. Además, la obtención de biochar mediante pirólisis, es un proceso atractivo y prometedor ya que los reactores de pirólisis representan una mejor alternativa que los reactores de combustión e incluso de gasificación, por lo que ofrece una mayor versatilidad con respecto a los productos finales que se pueden obtener.

Según (Steiner, 2012), el biochar o carbón vegetal puede ser un subproducto que se puede combinar para la producción de energía renovable, ya que se puede usar como biocombustible para la generación de energía. Este mismo autor señala que el proceso de pirólisis utiliza los productos de combustión incompleta como el H_2 , y CH_4 , entre otros hidrocarburos para producir energía y combustibles.

1.8 Reactores de pirólisis

Existen gran variedad de reactores para llevar a cabo el proceso de pirólisis, para escoger el tipo de reactor que se va a utilizar se debe tomar en cuenta algunos factores como el producto que se quiere obtener, tipo de materia orgánica o biomasa,

tiempo de residencia, el tipo de contacto entre la muestra a degradar y el catalizador, etc.

En la Figura 7, se puede apreciar el esquema de un reactor de pirolisis para la obtención de biochar y sus partes más importantes.

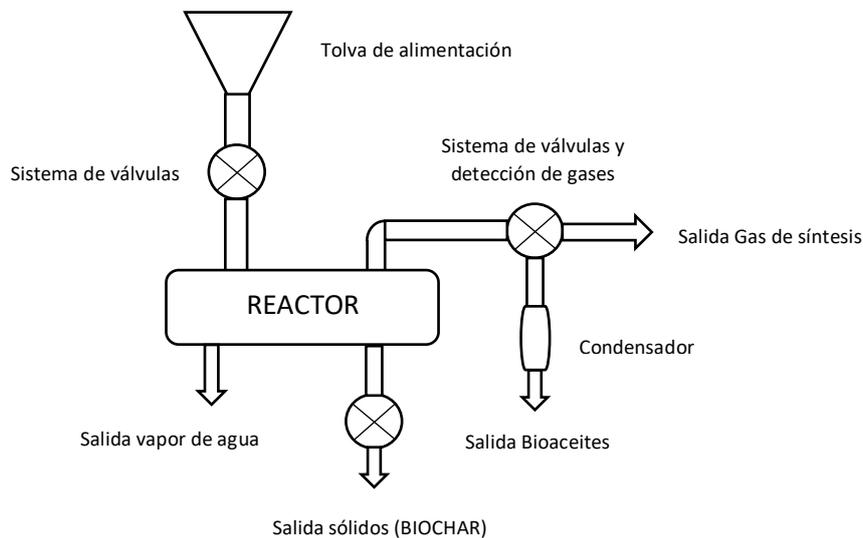


Fig. 7 Esquema básico de un reactor de pirolisis.

Fuente: Autor

1.8.1 Variables de operación

Son las condiciones o parámetros que se necesita para realizar el diseño y construcción de un reactor. Entre las más importantes tenemos: temperatura, tiempo de residencia, tamaño del equipo, tipo de materiales, etc.

1.8.2 Tiempo de residencia

Se define como el tiempo necesario para que produzca una reacción con cierto grado de conversión (Rodríguez A. , 2014), también se puede decir que es el tiempo que permanece una sustancia dentro del reactor.

1.8.3 Temperatura de calentamiento

La temperatura afecta directamente a la velocidad de la reacción de una sustancia determinada, por cada 10 °C de aumento de temperatura, la velocidad de reacción se duplica.

1.9 Tipos de reactores de pirolisis

Existen una gran variedad de reactores de pirolisis, a continuación se describe los tipos de reactores más conocidos:

1.9.1 Reactor de tanque agitado

Posee un sistema de agitación por dentro del reactor, para poder obtener un craqueo ¹uniforme del material introducido. Además este tipo de reactor se utiliza principalmente para poder degradar el polietileno de densidades altas y bajas. (Arturo Bermeo, 2014)

Entonces para la degradación del polietileno de baja densidad, se aplican temperaturas de calefacción en el rango de 360 y 420° C, como resultado se obtiene un producto blanco sólido o también conocido como “ceras”. En cambio para la degradación del polietileno de alta densidad se emplean temperaturas de calefacción más altas, superior a los 500°C para obtener dichas “ceras”. (Arturo Bermeo, 2014)

En la Figura 8, se puede observar las partes más importantes del reactor de tanque agitado.

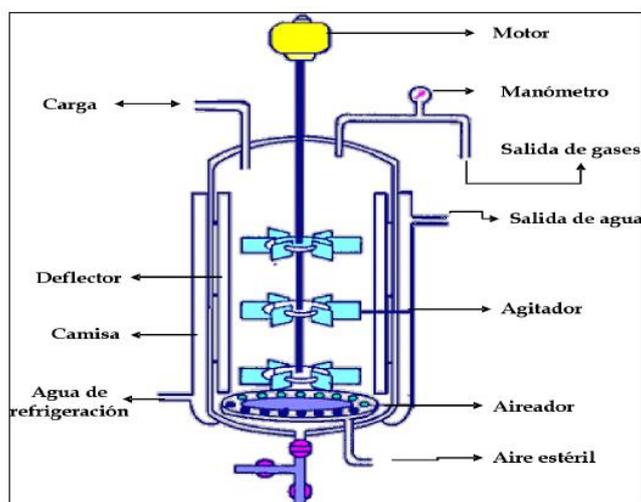


Fig. 8 Partes que componen un reactor de tanque agitado.

Fuente: (Arturo Bermeo, 2014)

Algunas de las desventajas de este tipo de reactor es su alto costo y necesitan un mantenimiento constante, además requiere un mayor aislamiento.

¹ El craqueo o cracking es un proceso químico mediante el cual se quiebran las moléculas de un compuesto produciendo así compuestos más simples.

1.9.2 Reactor de lecho fijo

Como se observa en la Figura 9, un reactor de lecho fijo trabaja con una baja velocidad de calentamiento, esto es debido a su bajo coeficiente de transferencia de calor. (Cueto, 2016)

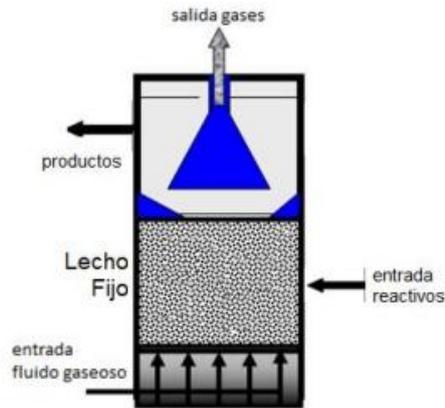


Fig. 9 Reactor de lecho fijo.

Fuente: (Arturo Bermeo, 2014)

Los reactores de lecho fijo son el tipo de reactor más utilizado en la industria de procesos, principalmente como reactores catalíticos.

1.9.3 Reactor de lecho fluidizado

Este tipo de reactor es muy utilizado en los procesos de degradación, ya que posee excelentes características de transferencia de calor y de materia, lo que permite una mayor aceleración de la reacción en dicho proceso. Además estos reactores se caracterizan por trabajar con una velocidad de calentamiento elevada y por una excelente mezcla de la biomasa.

En la Figura 10, se observa un sistema de pirólisis con reactor de lecho fluidizado.

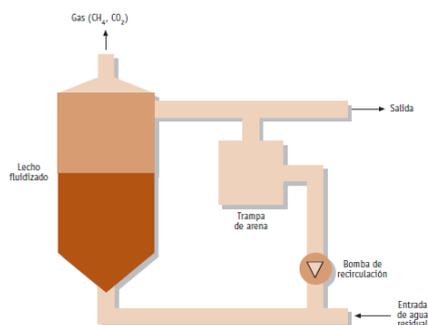


Fig. 10 Esquema de un reactor de lecho fluidizado.

Fuente: (Jácome, 2014)

Una de sus ventajas es el buen contacto entre el catalizador² y el reactivo, ocupando gran parte del volumen de reacción en llevar a cabo la pirolisis.

1.9.4 Reactor discontinuo (Tipo batch)

El autor (Rodríguez A. L., 2014), señala que los reactores tipo batch se emplean para experimentar con procesos a pequeña escala, se utiliza para la fabricación de productos de difícil elaboración. Además, su construcción tiene un grado de complejidad menor en comparación con los otros tipos de reactores, como se puede ver en la Figura 11.

Trabajan por cargas, es decir que se introduce una alimentación, y luego se espera un tiempo específico, que viene determinado por la cinética de la reacción tras el cual se saca el producto. Mientras se lleva a cabo la reacción, no se puede introducir ningún tipo de reactivos ni tampoco se permite la salida de productos.

Una de las ventajas este tipo de reactor es permitir una alta conversión, al poder dejar al reactivo dentro del reactor por tiempos prolongados, lo que permite una gran flexibilidad en este tipo de procesos.



Fig. 11. Reactor tipo Batch.

Fuente: (Cueto, 2016)

Por lo general se utilizan para estudiar el comportamiento de la pirolisis rápida y también para investigar el craqueo secundario de los alquitranes con tiempos de residencia mayor. (Cueto, 2016)

1.9.5 Horno - Reactor

Este tipo de reactor es el que presenta mejores características para el tratamiento de biomasa, obteniéndose así productos con un alto porcentaje de carbono y poca humedad, y además facilita el control del proceso ya que no se requiere una

² Un catalizador es una sustancia que sin ser modificada o consumida durante el proceso, cambia la velocidad de una reacción química.

supervisión permanente (Bermeo A, 2014). En la Figura 12, muestra las partes que consta un horno – reactor.

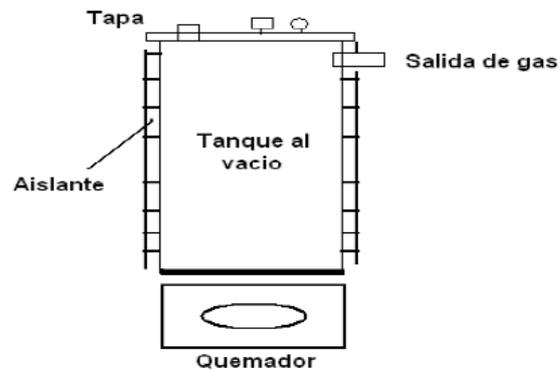


Fig. 12 Reactor tipo horno.

Fuente: (Bermeo A, 2014)

Uno de los usos más importantes de este tipo de reactores es en la transformación de biomasa en procesos termoquímicos.

1.10 Selección del tipo de reactor de pirolisis más adecuado

Para la selección del tipo de reactor, se ha tomado en cuenta diferentes aspectos y parámetros, como la capacidad, costo, temperatura, nivel de dificultad en la construcción y montaje, peso, etc. En la Tabla 5, se muestra los parámetros de calificación para la selección del reactor de pirolisis.

TABLA 5. ASPECTOS Y RELEVANCIA PONDERADA

Tipo de reactor	Capacidad	Diseño	Costo	Temperatura	Construcción y montaje	Peso	Mantenimiento	Calificación
Reactor de tanque agitado	Regular (1)	Difícil (1)	Mediano costo (2)	Regular (1)	Dificultad elevada (1)	Medio (2)	Medio (2)	10
Reactor de lecho fijo	Media (2)	Medio (2)	Alto (1)	Media (2)	Dificultad media (2)	Medio (2)	Medio (2)	13
Reactor de lecho fluidizado	Alto (3)	Difícil (1)	Alto (1)	Satisfactorio (3)	Dificultad elevada (1)	Medio (1)	Difícil (1)	11
Horno - Reactor	Media (2)	Fácil (3)	Mediano costo (2)	Satisfactorio (3)	Dificultad media (2)	Medio (2)	Medio (2)	16

Fuente: Autor

Se ha seleccionado el horno – reactor en base a la calificación de la Tabla 5, además este tipo de reactor es el que mejor se adapta para el proceso y producto que se requiere obtener.

2. CAPÍTULO II

Diseño y dimensionamiento del reactor de pirolisis para la obtención de biochar

Un reactor de pirolisis es un equipo diseñado exclusivamente para desarrollar reacciones químicas en ausencia total o con muy poca presencia de oxígeno, con el propósito de maximizar la conversión de reactivos de un producto.

Existen varios tipos de reactores, se clasifican dependiendo de las variables de operación a las que se debe sujetar dicho instrumento para que pueda funcionar correctamente y también en los parámetros y condiciones a las cuales deberá tratarse la biomasa. (Espinoza, 2019)

En este capítulo se da a conocer todo el procedimiento para realizar el diseño del reactor de pirolisis así como también su dimensionamiento en base a los parámetros de operación. Finalmente se presenta el diseño final del reactor realizado en SolidWorks.

2.2 Metodología

Mediante un diagrama de bloques se explica de forma sencilla la metodología realizada para el cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo de grado, como se observa en la Figura13.

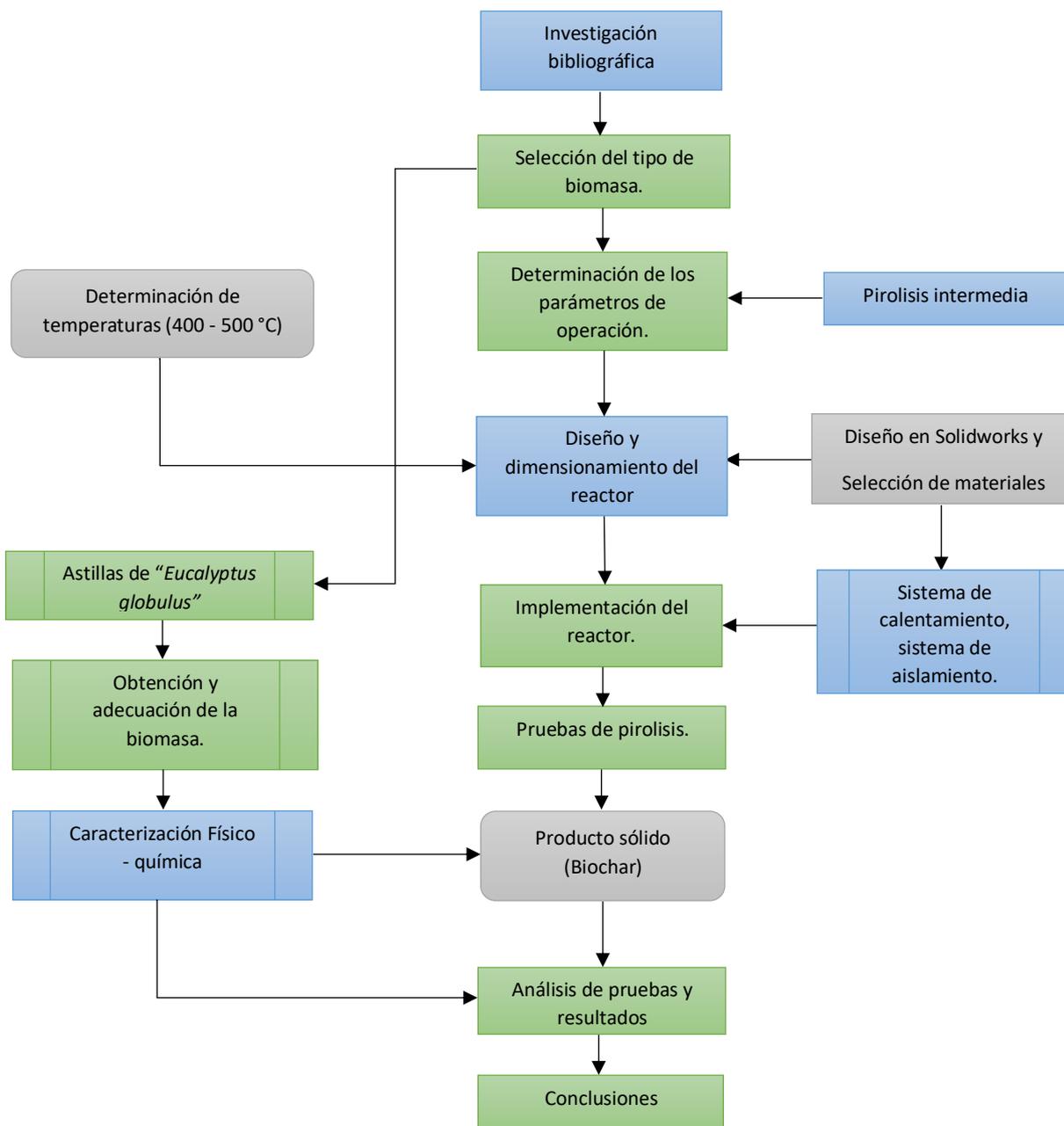


Fig. 13 Diagrama de bloques del procedimiento realizado para la construcción del reactor de pirolisis.

Fuente: Autor

El diagrama en bloques que se observa en la Figura 13 está basado en el método analítico ya que nos permite descomponer todo el proyecto en diferentes etapas, cada proceso está representado por un bloque. Esto con el objetivo de realizar una revisión por separado y más ordenada en cada proceso.

A partir de la Tabla 5 del capítulo anterior, se ha optado por diseñar y construir el tipo de horno -reactor, esto significa que al iniciar el proceso el material que ingresa

al reactor, solo es retirado cuando las reacciones dentro de él se dan por terminadas, por sus características este equipo permite llegar a las temperaturas deseadas, óptimas para el proceso a realizar.

2.3 Selección de Materiales

Para la selección de materiales para las diferentes partes del reactor se ha tomado en cuenta las recomendaciones y especificaciones de la normativa ASME, en base al cumplimiento con las especificaciones adecuadas para trabajar con altas temperaturas y una alta resistencia a los choques térmicos. Es importante realizar una descripción de cada material con el propósito de conocer las especificaciones técnicas y cómo están constituidos físicamente, de esta manera poder realizar el diseño del reactor y posteriormente facilitar la manipulación de los mismos al momento de su implementación.

2.3.1 Acero ASTM A36

El acero ASTM A36 es un material que posee muy buenas características y propiedades, es por esto que este tipo de acero es el más usado en la industria ecuatoriana. Está compuesto por elementos químicos como el hierro en mayor porcentaje y una baja presencia de carbón. El acero laminado ASTM A36 se adapta muy bien a la soldadura y también se utiliza en la fabricación de equipos mecánicos y piezas para usos generales del sector de la construcción y la ingeniería.

Se ha escogido este material debido a su bajo costo y también en base a las buenas propiedades mecánicas, físicas y térmicas que posee el acero ASTM A36; entre las más importantes tenemos:

- Fácil soldabilidad
- Resistencia a la rotura
- Tenacidad
- Dureza
- Resistencia a la oxidación y corrosión

2.3.2 Material aislante (Fibra de cerámica o Kaowool)

La fibra de cerámica o Kaowool como se puede ver en la Figura 14, es un tipo de material aislante diseñado para trabajar con altas temperaturas ya que posee una baja conductividad térmica. Es utilizado para revestimientos refractarios también se usa para el sellamiento de hornos de alta temperatura, calderos, hornos de pirolisis, etc.

Al momento de utilizarla, hay que tomar en cuenta que su límite de temperatura es de 1260°C.



Fig. 14 Fibra de cerámica

Fuente: (Morgan, 2022)

➤ **Características principales de la fibra de cerámica (Kaowool)**

- Baja conductividad térmica
- Alta resistencia a la humedad
- Gran resistencia mecánica
- Fácil manejo e instalación
- Color blanco
- Temperatura máxima de trabajo es de 1260°C
- Excelente comportamiento en atmósferas reductoras como oxidantes.

(Monteros, 2015)

2.3.3 Resistencia eléctrica tubular

Una resistencia eléctrica tubular es un dispositivo capaz de generar calor cuando pasa corriente eléctrica por la misma, se utiliza especialmente para aplicaciones industriales, comerciales y científicas, por ejemplo: Calefactores, inmersión de líquidos, moldes fundidos en metales, muflas entre otras.



Fig. 15. Resistencia eléctrica tubular

En la Tabla 6 se muestra las características más importantes de la resistencia eléctrica tubular

TABLA 6 CARACTERÍSTICAS DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA TUBULAR.

Temperatura máxima de trabajo	500 °C
Resistividad	$1.77 \cdot 10^{-6}$ ohmios m
Coefficiente de temperatura	0.00013
Densidad específica	8.412
Potencia	1200 W
Voltaje	120 V
Longitud	50 cm

Fuente: (Monteros, 2015)

Se seleccionó este tipo de resistencia eléctrica, debido a que están diseñadas proporcionar altas temperaturas, de hasta 1200 °C.

2.3.4 Termocupla Tipo K

Son las más idóneas para trabajar en atmósferas neutras o con poco oxígeno y es la más utilizada en aplicaciones industriales.

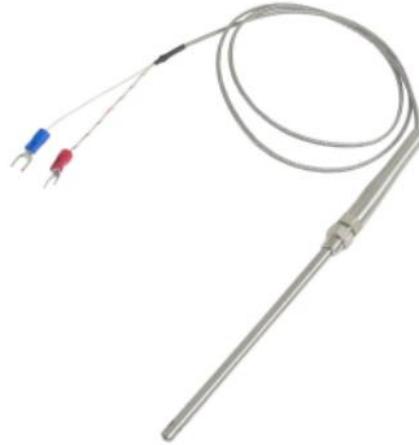


Fig. 16 Termocupla tipo K

Fuente: (TEI, 2014)

Como se puede observar en la Figura 16 constan de un conductor positivo a base de níquel - cromo y un conductor negativo de níquel - aluminio. Pueden censar temperaturas desde los -200 °C, hasta los 1250 °C. (TEI, 2014)

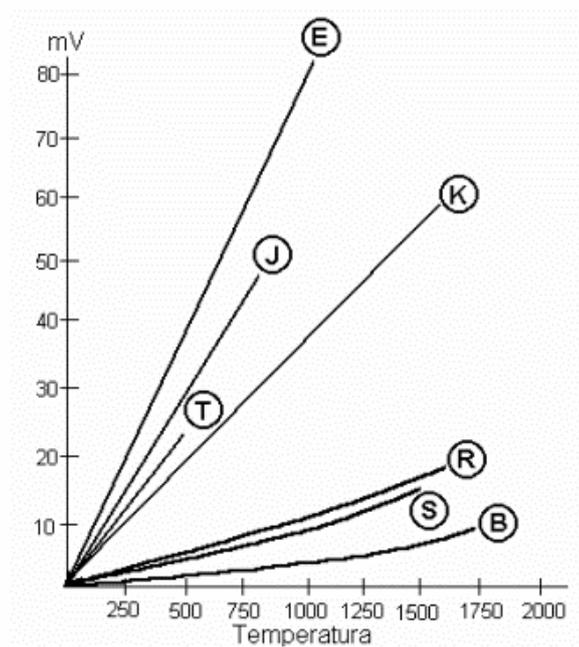


Fig. 17 Gráfica teórica de representación de termopar tipo K – Letra K

Fuente: (Plata, 2011)

En la Figura 17 tenemos la gráfica de representación de los diferentes tipos de termopar, donde se muestra el valor que se puede obtener en mili voltios por cada grado centígrado.

En la tabla 7, se muestra las características más importantes de los sensores de temperatura industriales más importantes.

TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE TERMOCUPLAS INDUSTRIALES.

TIPO ANSI-ISA	Sensibilidad	Rangos de temperatura
J	5.6 mv/100°C	-40 a 750
K	3.6 mv/ 100°C	-40 a 1200
T	4.5 mv/ 100°C	-50 a 400
E	7.9 mv/100°C	-40 a 900

Fuente: (Plata, 2011)

Cada tipo de sensor se utiliza en función a la aplicación de trabajo, por ejemplo la termocupla tipo K no es recomendable utilizar en ambientes con presencia de sulfuros, atmósferas conmutantes reductoras- oxidantes al menos que se utilicen tubos de protección.

2.3.5 Controlador de temperatura TC4S

El TC4S es un controlador de temperatura (Figura 18) con funciones esenciales y rendimiento mejorado, logra el control de temperatura ideal con el algoritmo de PID Y muestreo de alta velocidad de 100 ms.



Fig. 18Control de temperatura PID TC4S

Fuente: (Manual Autonics TC4S)

A continuación, en la Tabla 8 se presenta las especificaciones más importantes del controlador de temperatura TC4S.

TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DE TEMPERATURA TC4S.

Modelo	PID TC4S
Alimentación	100 – 240 VCA 50/60 Hz
Rango de voltaje disponible	90 a 110% Rango nominal
Consumo de energía	Máx. 5 VA
Método del display	7 segmentos (Rojo), otro display (LED Verde, Amarillo, Rojo)
Método de control	Control ON/OFF ,P,PI,PD, PID
Histéresis	1 a 100°C/°F (0.1 A 50.0°C/°F)
Banda proporcional (P)	0.1 a 999.9 °C/°F
Tiempo integral (I)	0 a 9999 seg
Tiempo derivativo (D)	0 a 9999 seg
Tiempo de control (T)	0.5 a 120.0 seg
Período de muestreo	100 ms

Fuente: (Manual Autonics TC4S)

Se debe tomar en cuenta todos estos parámetros para el correcto uso del dispositivo, así como también para alargar la vida útil del mismo.

2.3.6 Manómetro

Es un instrumento de medición e instrumentación, se utiliza en procesos industriales para medir la presión en fluidos o gases. Por lo general son analógicos, aunque en la actualidad existen también manómetros digitales.

Existen diferentes tipos de manómetros dependiendo de la aplicación y uso, entre los más conocidos tenemos los manómetros; comerciales, de uso industrial, tipo T, diferenciales, entre otros.

2.3.7 Relé de estado sólido SSR (Solid State Relay)

Un relé de estado sólido (Figura 19) es un dispositivo interruptor electrónico que conmuta el paso de la electricidad cuando se aplica un valor mínimo de corriente en sus terminales de control. Los SSR son capaces de conmutar corrientes hasta de 100 amperios por medio de semiconductores como tiristores o transistores, no constan de partes móviles siendo la principal diferencia con los relés electromecánicos.



Fig. 19 Relé térmico

Fuente: (Ficha Técnica del SR1-4225)

El funcionamiento de este tipo de relé consiste en un sensor que responde a una señal de control, el SSR que conmuta el circuito de carga, y un mecanismo de acoplamiento a partir de la señal de control que activa este interruptor sin partes mecánicas.

TABLA 9 CARACTERÍSTICAS DEL RELÉ TÉRMICO.

Modelo	SR1 - 4225
Control de fase:	Simple fase
Máxima corriente de entrada	7mA
Voltaje (carga)	24 – 240VAC – 60Hz
Led de entrada	Color verde
Corriente de conmutación máxima	25 A (Carga resistiva)
Montaje	En disipador o placa
Tamaño	58 * 28.3 * 44mm (Long. * Alt. * Ancho)

Fuente: (Ficha Técnica del Relé térmico SR1 - 4225)

Este relé de estado sólido está constituido por un circuito electrónico que contiene en su interior un circuito disparado por nivel, acoplado a un interruptor semiconductor, un transistor o un tiristor (Monteros, 2015).

2.4 Software

A continuación, se detalla los softwares que se requiere para la realización de este trabajo de grado.

2.4.1 Solidworks

Para el diseño del reactor de pirolisis se utilizará el software Solidworks Cad. Es una aplicación de automatización de diseño mecánico que permite a los diseñadores realizar rápidamente bosquejos de ideas que a su vez pueden experimentar con características y dimensiones, logrando modelos y dibujos detallados.

2.4.2 Matlab

Matlab es un software de programación y cálculo numérico además permite el desarrollo de algoritmos y facilita el análisis de datos. También cuenta con una herramienta muy útil que es Simulynk, esta herramienta permite realizar modelos, simulaciones gráficas y analizar sistemas dinámicos entre otros.

2.5 Diseño y dimensionamiento del reactor de pirolisis

Se ha realizado una amplia revisión bibliográfica para poder lograr el diseño del reactor de pirolisis ya que deben ser diseñados de acuerdo a parámetros establecidos como la temperatura, sistema de calentamiento, material aislante, cámara de reacción, el tipo de material a pirolisar así como también la cantidad del mismo. El reactor de pirolisis consta principalmente de un recipiente de reacción, recipiente externo o carcasa, aislamiento térmico, tapas (superior e inferior) y sistema de calentamiento que consta de una resistencia eléctrica tubular, un sensor de temperatura y un controlador de temperatura configurado en modo PID. De estos componentes el recipiente de reacción y el aislamiento térmico se debe diseñar en base a la capacidad total, densidad de la biomasa, temperatura y espesor.

De acuerdo a los materiales seleccionados y detallados anteriormente se obtuvo las siguientes especificaciones técnicas:

- Tipo de material del reactor: Acero ASTM A36
- Cámara aislada con fibra de cerámica
- Forma cilíndrica
- Compacto
- Controlador de temperatura PID, modelo TC4S
- Lectura de la temperatura en pantalla digital
- Rango de temperatura: 10°C – 500 °C
- Resistencia eléctrica tubular alrededor del cuerpo del reactor
- Termocupla: Sensor tipo K
- Voltaje: 120 V – 60Hz

- Potencia: 1200 W
- Amperaje: 10 Amperios

2.5.1 Parámetros de operación del reactor de pirolisis

Es importante mencionar los parámetros que condicionan el diseño del reactor de pirolisis, a continuación, se detallan cada uno de estos parámetros.

2.5.1.1 Selección del tipo de biomasa

El tipo de biomasa que se va a utilizar para la obtención de biochar será las astillas de *Eucalyptus Globulus*, debido a su alta disponibilidad, tratamiento y por sus excelentes propiedades físicas – químicas. Proviene de la madera de árboles de eucalipto, esta especie forestal es la más abundante en el mundo y en el Ecuador en particular se encuentra en la región sierra. Las astillas de *E. globulus*, posee un considerable porcentaje de humedad por lo que es recomendable someterla a un proceso de secado, esto previamente al proceso de pirolisis. Se recomienda una temperatura de secado no mayor a 70 °C.

2.5.1.2 Selección del tipo de pirolisis

En base a la Tabla 10, se ha seleccionado la pirolisis intermedia para la obtención de biochar, esta técnica es la más empelada para obtener una mayor parte sólida (biochar). Este tipo de pirolisis tiene un rango de temperatura que va desde los 400°C hasta los 500°C y en un lapso de tiempo de una hora.

TABLA 10 TIPOS DE PIROLISIS.

Tipo de pirolisis	Rango de temperatura (°C)	de Tiempo residencia	De Distribución de los productos (Sólido-Líquido-Gas)
Pirolisis rápida	> 650	5 minutos	12% - 75% - 13%
Pirolisis intermedia	400 - 500	1 hora	20% - 50% - 30%
Pirolisis lenta	200	Tiempo prolongado	35% - 30% - 35%
Gasificación	800	Varios segundos	10% - 5% - 85%

Fuente: Autor

Según la Tabla 10, el tiempo de residencia para el tipo de pirolisis intermedia será de una hora aproximadamente.

2.5.2 Diseño del recipiente de reacción

Las dimensiones y material del recipiente de reacción estarán condicionadas principalmente por variables como la cantidad de material a degradar, la cual será máximo de 60 gramos, con una densidad promedio de $0,5 \frac{g}{cm^3}$ (Labbé, Droppelmann, Balocchi, & Miguel, 2013).

- Calculando el volumen tenemos que:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} * h \quad (1)$$

d: diámetro interior del cilindro

h: altura del cilindro

$$V = 138.23 \text{ cm}^3$$

El valor obtenido equivale a un 95% en volumen de materia prima a pirolisar. Cabe resaltar que también se puede trabajar con capacidades menores a esta.

Debido a lo anterior se tomaron las medidas para el recipiente de reacción cilíndrico con 40 milímetros (mm) de diámetro y una altura de 110 mm como se puede observar en la Figura 20, estas medidas son las encontradas en los materiales comercialmente disponibles.

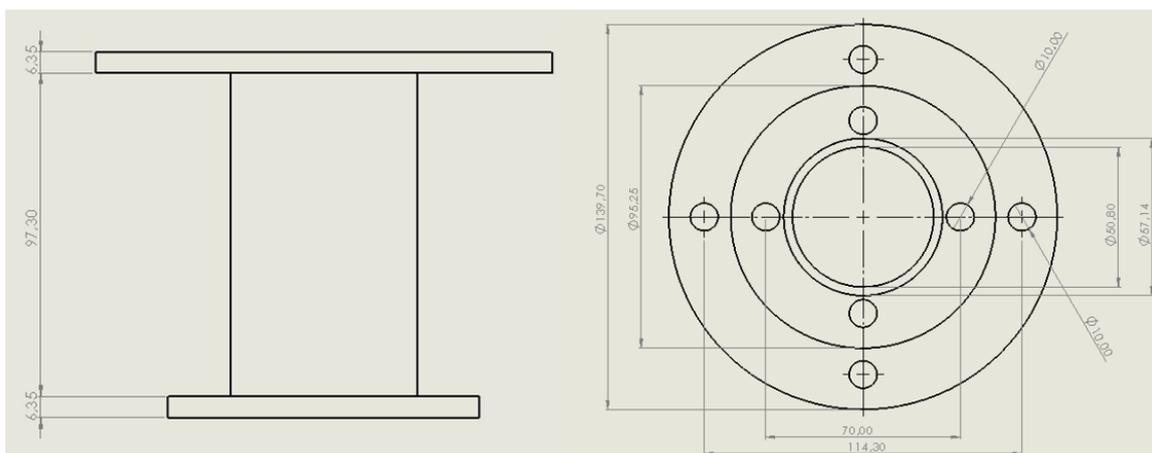


Fig. 20 Vista frontal y vista superior del recipiente de reacción

Fuente: Autor

Por otro lado, en el recipiente de reacción se integrará un recipiente de cenizas como se observa en la Figura 21, el cual coincide con el diámetro del recipiente de reacción y la altura de este es de 80 mm.

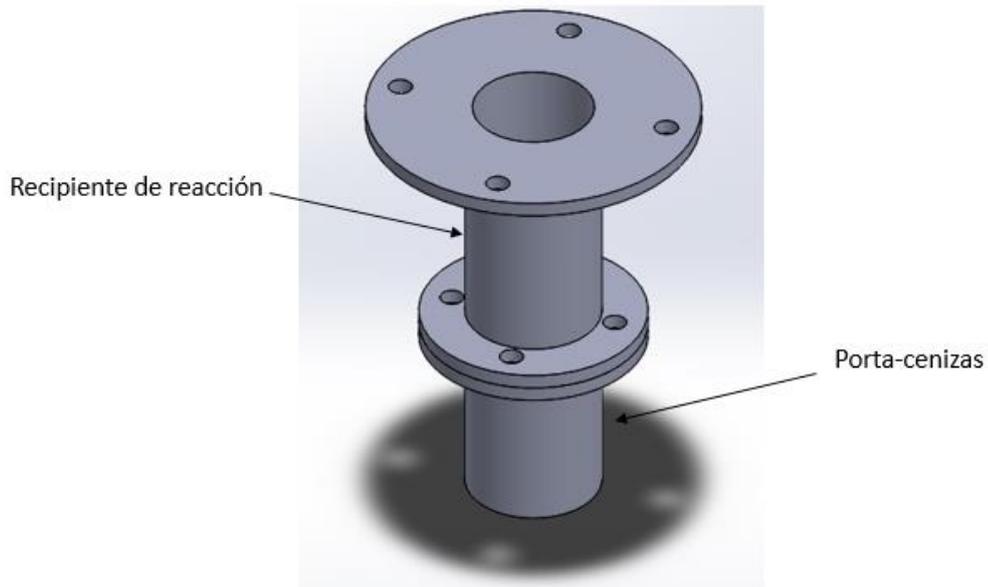


Fig. 21 Diseño final del recipiente de reacción y porta-cenizas

Fuente: Autor

Las bridas cuya función es conectar el recipiente de reacción y la porta cenizas tiene un diámetro interno de 50 mm, 95 mm de diámetro externo y un espesor de ¼ de pulgada; estas a su vez están unidas por 4 pernos de rosca métrica M8 previamente seleccionados.

- Para calcular el espesor mínimo y la presión interna según el código ASME sección VII de recipientes a presión, se tiene las siguientes ecuaciones:

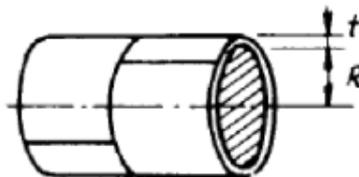


Fig. 22 Casco cilíndrico

Fuente: Autor

$$V = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (2)$$

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (3)$$

Donde:

t: espesor de pared, metros

R: radio interior, metros

S: valor de esfuerzo del material, Mpa

E: eficiencia de la junta

P: Presión máxima de trabajo permitido, Mpa

Conociendo todos los datos de los parámetros que estructuran las ecuaciones, y teniendo en cuenta que el esfuerzo último correspondiente al acero ASTM A36 a una temperatura de 500°C se obtuvo los siguientes resultados:

$$V = 3.09 \text{ mm} ; P = 31.3 \text{ Mpa}$$

Sin embargo, el tubo empleado cuenta con un espesor equivalente a 3,17 mm con lo que el factor de seguridad se establece en 3,1.

2.5.3 Aislamiento térmico

En los procesos en los cuales la temperatura o el flujo de calor juegan un papel importante es necesario tener en cuenta una herramienta o sistema que nos permita minimizar las pérdidas, debido a que de esta forma se ahorra más energía, por lo anterior se propone utilizar una capa aislante alrededor de la resistencia y el recipiente de reacción con el objetivo de mantener las temperaturas de reacción lo más constante posible. Para este tipo de operaciones tenemos la manta de fibra de vidrio cerámica, ya que este material no es conductor eléctrico y puede trabajar en condiciones de hasta de 1260 °C, con una conductividad térmica de 0,16 Watts por metros-Kelvin a partir de las características del material aislante se determinó el espesor de pared de este, utilizando los conceptos de transferencia de calor y conductividad térmica obteniendo como resultado 2 pulgadas. Los cálculos de temperatura realizados se hicieron con intervalo de temperatura interna y externa de 450°C y 32°C respectivamente. Resaltamos que la energía transferida por unidad de tiempo o la potencia coincide con la potencia suministrada por la resistencia eléctrica es decir 1200 W.

Tenemos que el espesor mínimo de la pared aislante es igual a la conductividad térmica de la pared, por el área transversal y la diferencia de temperatura entre la potencia transferida al sistema, tenemos la siguiente expresión (Cengel, 2007):

(4)

$$d = k * dA * \frac{\Delta T}{\Delta Q}$$

Dónde:

ΔQ : Es la potencia suministrada por la resistencia

k : es la conductividad termica del material

A : es el área transversal donde se de la tranferencia de calor

ΔT : es el diferencial de temperatura entre superficie interna y externa

d : Es el espesor de la pared del aislante

Al solucionar la ecuación para el espesor:

$$d = 13,26mm$$

Y así se tiene un espesor mínimo de 13,26 mm, por la geometría del reactor y simplificar procesos se escoge un espesor de 2 pulgadas y así tenemos una relación de diseño de 3,83.

2.5.4 Diseño final del reactor de pirolisis.

Una vez diseñado el recipiente de reacción y el espesor de la pared del material aislante se seleccionó un tubo de acero ASTM A36, con un diámetro aproximado de 20.3 cm y con un espesor de 6.35 mm para el cuerpo del reactor (carcasa) como se observa en la Figura 23. Se estimó una altura de 20 cm teniendo en cuenta las dimensiones del recipiente de reacción y la porta – cenizas ya que estas dos partes van adentro del recipiente exterior.

La presión generada al momento de realizar el proceso no se tiene en cuenta debido a que no son significativas para el proceso en cuestión, estas estarán alrededor de la presión atmosférica ya que los gases liberados generan poca fuerza sobre las paredes y estos saldrán del recipiente de reacción por una tubería cuya presión es atmosférica. En el diseño final como se observa en la Figura 22 está incluido el recipiente exterior o carcasa, la cámara de reacción y las tapas superior e inferior con sus respectivos pernos. Se seleccionaron espesores de trabajo correspondientes a 1/8 de pulgada para el módulo de reacción y de ¼ de pulgada para las tapas del reactor.

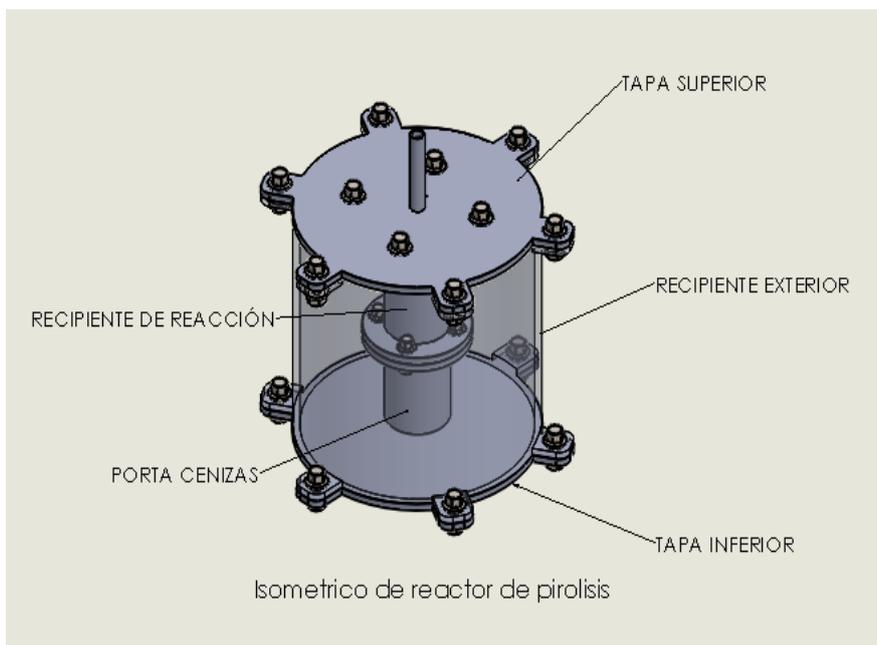


Fig. 23. Diseño isométrico del reactor de pirolisis realizado en Solidworks.

Fuente: Autor

El diseño del reactor realizado en Solidworks nos permite tener una idea muy clara acerca del prototipo que queremos construir, también nos ayuda a prevenir errores y evitar contratiempos al momento de la implementación del reactor.

2.5.5 Resultados obtenidos del diseño del reactor de pirolisis

Después de haber realizado el diseño del horno-reactor, se obtuvo los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 11.

TABLA 11. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL REACTOR

Capacidad máxima	60 gramos
Aislamiento térmico	
Temperatura de pirolisis	400 – 450 °C
Espesor del aislamiento	5.08 cm
Tipo de material	Fibra de cerámica
Dimensiones de las partes del reactor	

Parte	Diámetro	Espesor	Altura
Tapa superior e inferior	23 cm	0.6 cm	-----
Recipiente de reacción	4.2 cm	0.31 cm	11 cm
Porta - cenizas	4.2 cm	0.31 cm	8 cm
Recipiente exterior	20.3 cm	6 cm	20 cm

Fuente: Autor

2.6 Sistema de calentamiento.

Para la cantidad de material a degradar y el espacio a calentar se propone una resistencia eléctrica tipo tubular la cual tiene como condiciones de trabajo una diferencia de potencial de 120 Voltios (V) y a su vez esta suministra una potencia de 1200 Watts (W), suficiente para suplir las pérdidas de calor por la resistencia del material aislante. La ventaja de esta resistencia tubular es que se adapta a las dimensiones del equipo.

2.6.1 Potencia requerida por la resistencia eléctrica

Para determinar la potencia que se requiere de la resistencia eléctrica, primero de debe determinar la resistencia térmica del material aislante, con la siguiente ecuación:

$$R_T = \frac{e_{\text{Fibra de cerámica}}}{\lambda_{\text{Fibra de cerámica}}} \quad (5)$$

Dónde:

$R_T = \text{Resistencia térmica (W/K)}$

$e_{\text{Fibra de cerámica}} = \text{Espesor del material (0.0508 m)}$

$\lambda_{\text{Fibra de cerámica}} = \text{Conductividad térmica (0.09 W/mK)}$

Reemplazando se tiene que:

$$R_T = \frac{0.0508 \text{ m}}{0.09 \text{ W/mK}}$$

$$R_T = 0.64 \text{ W/K}$$

Luego de esto, se procede a calcular la potencia con la siguiente ecuación:

$$Q_R = \frac{T_C - T_Q}{R_T} \quad (6)$$

Dónde:

$Q_R = \text{Potencia}$

$T_C = \text{Temperatura de la cámara (450 °C)}$

$T_Q = \text{Temperatura ambiente (23 °C)}$

Reemplazando tenemos que:

$$Q_R = \frac{450 - 23}{0.846}$$

$$Q_R = 667.18 \text{ W}$$

Esto quiere decir que la pérdida de calor por la resistencia del material aislante es de 667.18 W, debido a esto se ha optado por colocar una resistencia eléctrica tubular de 1200 W, con lo que se podrá lograr la temperatura deseada de 450 °C.

2.7 Controlador PID

Un controlador PID es un dispositivo capaz de controlar un sistema en lazo cerrado con el propósito de obtener un estado de salida deseado, son ampliamente usados en el control industrial. Calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado, por lo tanto, se tiene un control más preciso. Está conformado básicamente por tres partes:

- Un sensor, el cual se encarga de determinar el estado del sistema.
- Un controlador, compara la señal de una variable con el valor que se desea obtener con el propósito de producir dicha señal.
- Un actuador, es capaz de modificar el sistema de una manera controlada.

En la Tabla 12, se muestra los dispositivos, para realizar el control PID del reactor de pirolisis.

TABLA 12 ESPECIFICACIONES DE LOS DISPOSITIVOS PARA EL CONTROLADOR PID.

Dispositivo	Especificación
Sensor	Termocupla Tipo K.
Controlador	PID.
Actuador	Resistencia eléctrica tipo tubular.

Fuente: Autor

El algoritmo del control PID consiste de tres parámetros diferentes: el proporcional, integral y derivativo, por lo tanto, el control PID está constituido por la suma de los tres parámetros para poder ajustar un proceso en específico por medio de un elemento de control.

En la prueba de funcionamiento del reactor se tendrá en cuenta, las curvas de calentamiento teórica referente al sensor de temperatura de la prueba y en forma práctica obteniendo los valores de calentamiento a una temperatura ambiente de 27°C referente a la ciudad de Ibarra, obteniendo los siguientes datos que se muestra en la Tabla 13.

TABLA 13. DATOS EXPERIMENTALES DEL REACTOR.

Segundos (s)	Temperatura (°C)						
1	29	500	90	908	215	1479	340
42	30	516	95	925	220	1510	345
100	31	533	100	943	225	1538	350
124	32	550	105	962	230	1571	355
168	34	567	110	980	235	1610	360
208	36	584	115	999	240	1639	365
220	38	600	120	1018	245	1686	370
245	40	616	125	1038	250	1718	375
268	43	632	130	1059	255	1759	380
278	44	649	135	1079	260	1806	385
291	46	663	140	1098	265	1847	390
303	48	679	145	1119	270	1889	395
318	50	695	150	1140	275	1937	400
331	52	710	155	1162	280	1983	405
342	54	727	160	1185	285	2035	410
360	57	743	165	1209	290	2083	415
372	60	759	170	1231	295	2140	420
387	63	774	175	1247	300	2199	425
404	66	791	180	1281	305	2259	430
420	70	807	185	1307	310	2318	435
430	73	823	190	1333	315	2389	440
445	76	838	195	1361	320	2464	445

460	80	855	200	1388	325	2543	450
480	85	864	205	1419	330	2553	451
		891	210	1447	335	2578	452

Fuente: Autor

Una vez ingresado los datos al sistema, se puede obtener la curva de temperatura vs tiempo de calentamiento como se muestra en la Figura 24, también se puede observar que el tiempo que se demora la planta en llegar a la temperatura deseada es de aproximadamente 2500 segundos o 41.6 minutos.

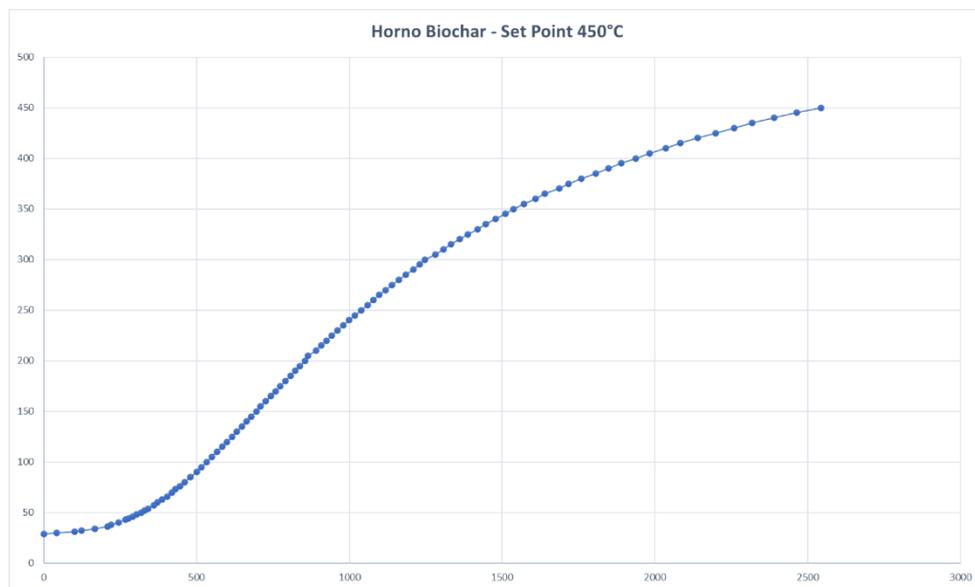


Fig. 24 Gráfica experimental de temperatura vs tiempo horno biochar

Fuente: Autor

Aplicando normalización a los datos experimentales, y mediante el uso de del software Matlab, se obtiene la función de transferencia práctica de la planta.

Posteriormente, se carga los valores normalizados y los valores de tiempo en Matlab para que poder crear la función de transferencia adecuada con las herramientas de Matlab.

$$\frac{T(s)}{q(s)} = G(s)_{TP} = \frac{2,0517}{(490s + 1)(145,5s + 1)} \quad (7)$$

Una vez ingresados los datos, el software Matlab, permite autoestimar los datos para la función de transferencia, identificando automáticamente los polos y una

adecuada estructura de planta, con su respectiva función de transferencia como se muestra en la Figura 25. El auto identificación de parámetros de Matlab permite realizar finitas iteraciones con los recursos del computador, que permiten adecuar los datos ingresados para hallar una ecuación de transferencia estable y acorde a los parámetros establecidos.

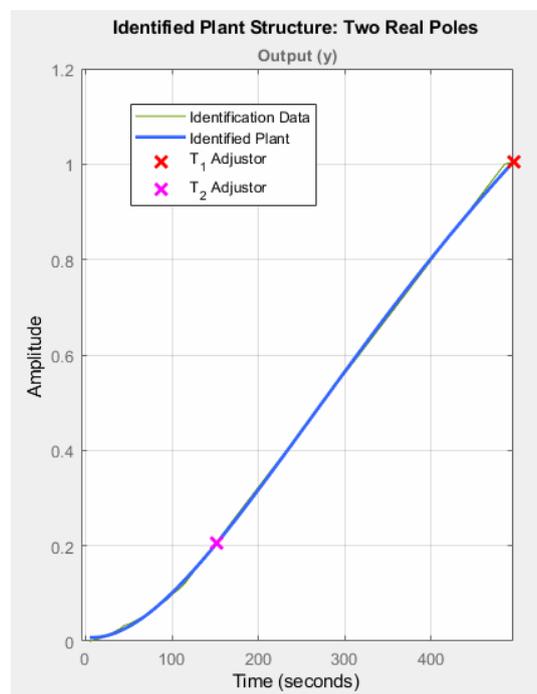


Fig. 25 Gráfica de función de transferencia con sus respectivos polos

Fuente: Autor

Una vez identificada la planta, aplicamos los datos para que el software muestre los valores obtenidos en las iteraciones y establecer la función de transferencia para poder aplicar diferentes controladores requeridos y necesarios.

En la Figura 26, se muestra el ciclo cerrado con respuesta al impulso de la planta sin el uso de un controlador, obteniendo la estabilización del sistema en los 450 °C de “set point”, a los 2500 segundos.

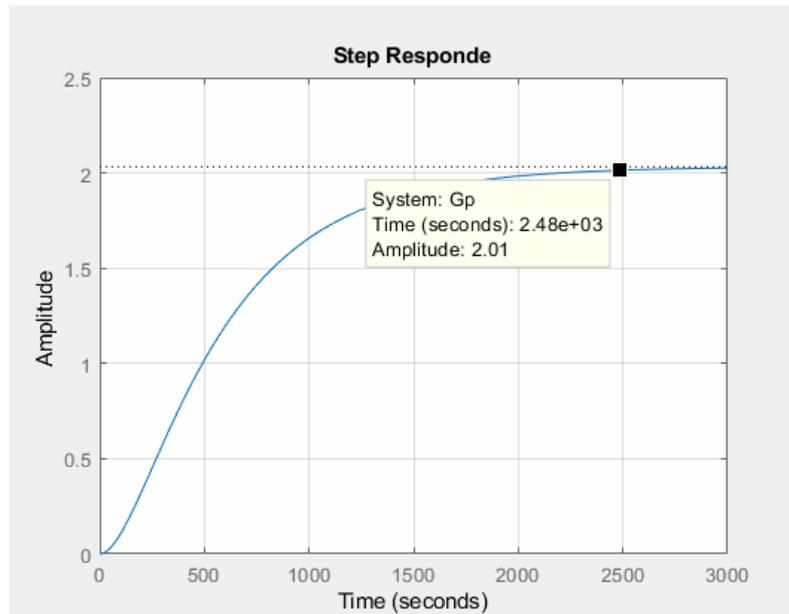


Fig. 26 Grafica de respuesta de la planta a un escalón unitario sin controlador

Fuente: Autor

Ahora, Matlab permite auto sintonizar el PID, para una mejor respuesta de la función de transferencia.

Obteniendo los siguientes valores del PID que se muestran en la Tabla 14.

TABLA 14. VALORES EXPERIMENTALES PID PARA LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Valores automáticos de PID - Matlab

Kp	Ki	Kd
0,938	0,00228	93,5

Fuente: Autor

Una vez obtenido los valores del controlador de sintonización PID, el siguiente paso es realizar la retroalimentación del sistema cerrado, aplicando las nuevas variables al controlador.

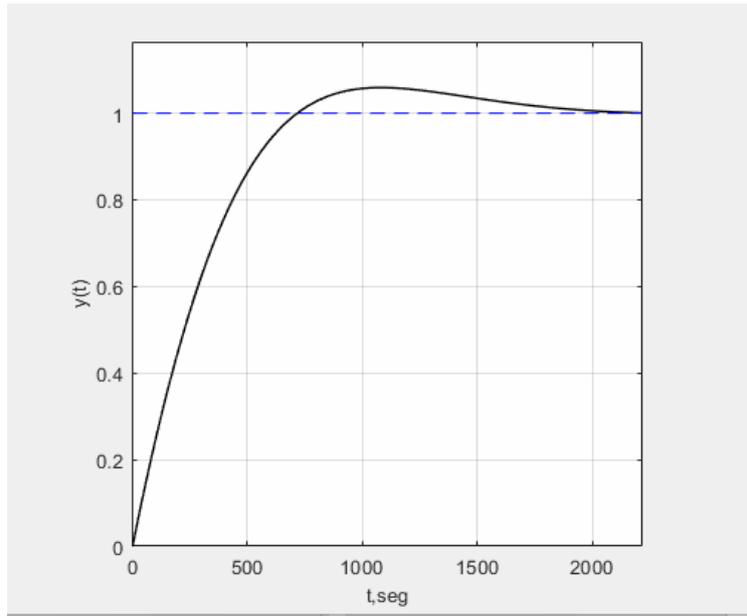


Fig. 27 Grafica de respuesta de la planta a un escalón unitario con controlador PID

Fuente: Autor

En la Figura 27, Matlab muestra una gráfica con una mejor respuesta de la planta, es decir, alcanza la estabilización del sistema alrededor de los 2000 segundos.

3. CAPÍTULO 3

Construcción e implementación del reactor de pirolisis para obtención de biochar

En este Capítulo se muestra todo el proceso para la construcción y funcionamiento del reactor de pirolisis para la obtención de biochar, todo esto en base al diseño realizado en el Capítulo 2. La planta está conformada por 3 partes principales: zona de reacción, sistema de aislamiento, y un sistema de calentamiento y control de temperatura. En los siguientes subtemas se detalla la construcción y en que consiste cada uno de ellos.

Para finalizar se presenta el proceso para la caracterización del biochar realizando las pruebas de pH, conductividad y prueba de humedad.

3.1 Zona de reacción

En esta zona es en donde se lleva a cabo la reacción de pirolisis, consta principalmente de un tubo de acero ASTM A36 el cual se adquirió de manera comercial en base a las dimensiones previamente calculadas en el capítulo anterior. Tiene un espesor de 0.31 cm, un diámetro de 4.2 cm y una altura de 11 cm.

También se construyó una porta – cenizas del mismo material, con el objetivo de separar los residuos sólidos y líquidos y también sirve para recolectar las partículas que se degradan en el proceso de pirolisis, para poder unir las dos partes se soldaron unas bridas con las mismas dimensiones con el objetivo de conectarlas mediante pernos tipo M8.

3.2 Sistema de aislamiento

De acuerdo a las dimensiones del cilindro exterior se realizaron cortes en la manta de fibra de cerámica de modo se pueda conformar la pared de aislamiento térmico, como se observa en la Figura 28. El espesor de la capa de este material es de 50.8 mm, esta capa se colocó uniformemente alrededor del tubo de acero, procurando que quede bien compacto.

3.3 Sistema de calentamiento y control de temperatura

, para lo cual se implementó un sistema de calentamiento que consta de una resistencia eléctrica tipo tubular de 1200 W de potencia, la cual está diseñada para proporcionar una temperatura de hasta 500 °C y que debido a su forma circular se colocó alrededor de la pared del material aislante de fibra de cerámica como se observa en la Figura 28.

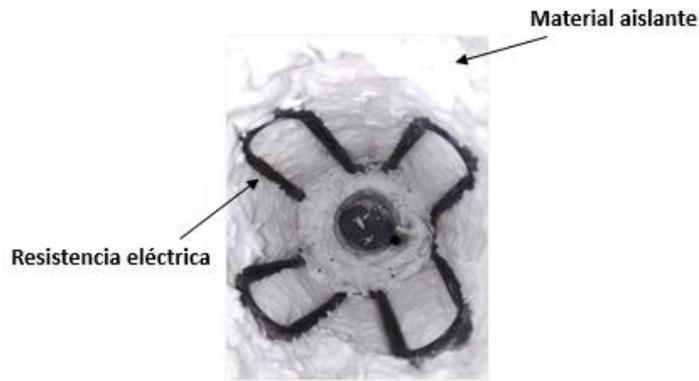


Fig. 28 Instalación del material aislante alrededor del tubo de acero ASTM A36

Fuente: Autor

Para lograr tener un control ideal del proceso y mantener inspeccionada la variable principal como lo es la temperatura, se diseñó un sistema de control eléctrico que está conformado por un controlador de temperatura electrónico modelo TC4S que está conectado a los diferentes dispositivos como son: la resistencia eléctrica tubular, el sensor de temperatura y un relé de estado sólido. En base a los parámetros obtenidos en el diseño del controlador PID, se procede a configurar el controlador de temperatura en dicho sistema ya que nos brinda un control eficaz del proceso y también permite reducir considerablemente las pérdidas de temperatura con respecto al set point de 450°C.

En la Figura 29 se muestra el diagrama eléctrico de la conexión de todos los componentes anteriormente mencionados.

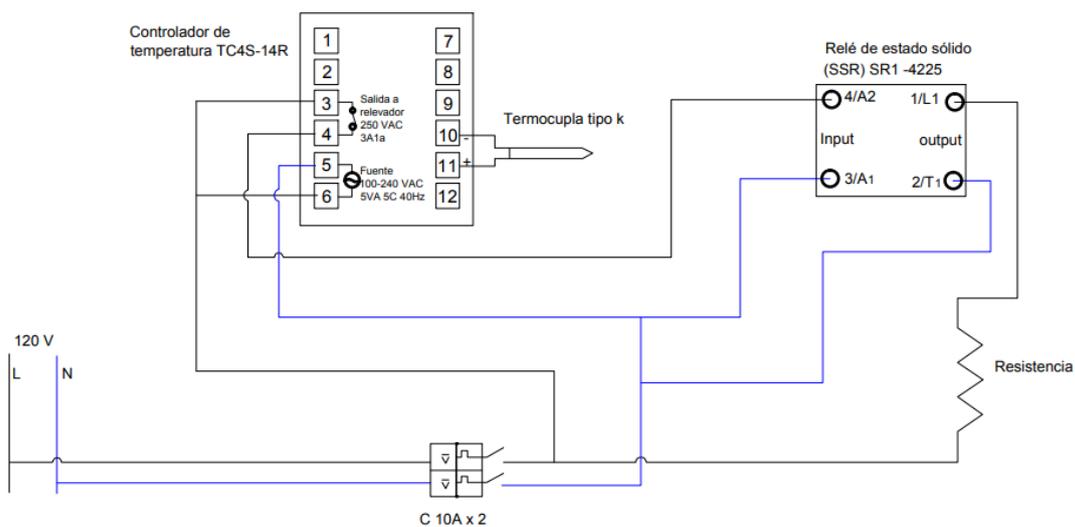


Fig. 29 Diagrama de conexión eléctrica y control de temperatura.

Fuente: Autor

Para la configuración del controlador de temperatura se elaboró un manual en el cual se detalla paso a paso el procedimiento para dicha configuración y otras funciones (Anexos).

A continuación, en la Figura 30 se muestra la instalación eléctrica del controlador de temperatura con el relé de estado sólido (SSR) en el interior de la caja de mando.

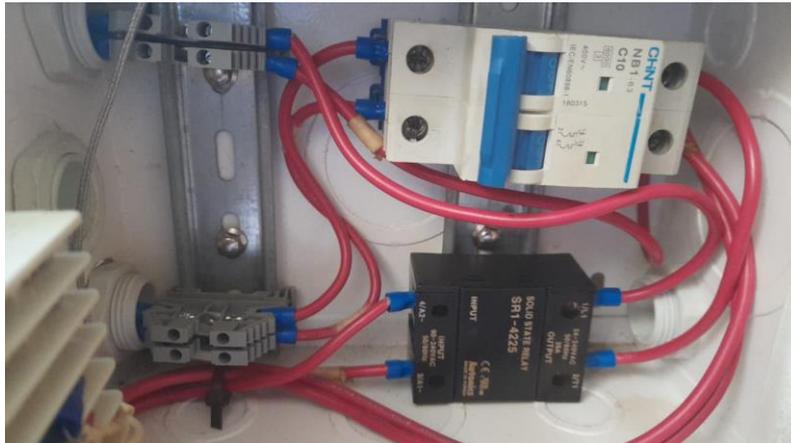


Fig. 30 Conexión eléctrica del sistema de control de temperatura.

Fuente: Autor

En la caja de mando se conectó un interruptor de corriente como dispositivo de protección y a su vez también cumple la función de encendido y apagado del sistema eléctrico.

3.4 Implementación del reactor de pirolisis

Luego de construir cada parte del reactor por separado, se procede a armar y conectar cada parte en su lugar, el reactor está situado sobre una mesa metálica diseñada especialmente para situar todos los componentes de una manera ordenada y segura.



Fig. 31 Partes de la planta.

Fuente: Autor

En la Figura 31 se muestra la planta terminada por completo, también se señala con números cada parte que conforman la misma. A continuación, se indica el nombre de cada parte:

1. Reactor de pirolisis
2. Manómetro
3. Termocupla tipo K
4. Salida de gases
5. Recipiente con agua para la condensación de gases
6. Caja de mando
7. Controlador de temperatura
8. Mesa metálica

3.5 Pasos a seguir para el proceso de pirolisis

En los siguientes ítems se presenta los pasos a seguir para realizar el proceso de obtención de biochar mediante pirolisis y de esta manera se realiza las pruebas de funcionamiento del reactor construido.

3.5.1 Preparación de la biomasa

La muestra de biomasa está representada por las astillas de eucalipto, con una masa aproximada de 20 gramos, estas muestras se someten a un proceso de secado natural, expuesto al sol por varios días para eliminar cualquier presencia de humedad, como se puede ver en la Figura 32.



Fig. 32 Astillas de eucalipto

Fuente: Autor

Para apresurar el proceso se recomienda hacerlo por medio de un calentador eléctrico a una temperatura no mayor a 50 °C.

3.5.2 Carga del reactor

Una vez que se ha llevado a cabo el proceso de secado de la biomasa, se procede a colocar aproximadamente 20 g de astillas de eucalipto adentro del recipiente de reacción como se logra apreciar en la Figura 34, para luego realizar el cierre hermético del reactor.



Fig. 33 Carga de la biomasa en el recipiente de reacción.

Fuente: Autor

Después de colocar la biomasa adentro del recipiente de reacción, se procede a situar los pernos con las respectivas tuercas en el recipiente con la tapa superior del reactor, haciendo coincidir los orificios de las dos partes del reactor, Una vez unido la tapa superior con el recipiente de reacción, se coloca la tapa en su lugar y se procede a realizar el ajuste de tuercas y pernos en la parte exterior, como se puede ver en la Figura 35.



Fig. 34 Ajuste de la tapa superior del reactor.

Fuente: Autor

Para poder ajustar las tuercas del recipiente de reacción con la tapa superior se recomienda utilizar una llave mecánica N°13, mientras que para la parte del cilindro exterior con la tapa se debe utilizar una llave mecánica N°15.

3.5.3 Calentamiento y reacción de pirolisis

En base a los cálculos realizados en el capítulo anterior, se procede a la configurar el controlador de temperatura en modo PID y se establece un set-point de 450 °C. (Este proceso se explica de una forma muy detallada en el manual de funcionamiento del reactor que consta en anexos).



Fig. 35 Temperatura máxima de la planta

Fuente: Autor

Luego se espera a que la planta llegue a la temperatura configurada como se muestra en la Figura 36 y a partir de ese momento se toma el tiempo de una hora exactamente para proceder a apagar el sistema por medio del interruptor.

3.5.4 Proceso de descarga

Para este proceso se recomienda esperar un tiempo considerable para realizar este proceso hasta que se enfríen todos los componentes del reactor. Luego de que haya finalizado el proceso de pirolisis y cuando la temperatura del reactor haya disminuido significativamente se procede a desajustar todos los pernos y tuercas de la tapa superior para poder abrirla y sacar el recipiente de reacción.

3.5.5 Recolección de las muestras

Aquí se puede verificar que la biomasa de astillas de eucalipto se ha transformado en biochar en su totalidad durante el proceso de pirolisis, como se observa en la Figura 37.



Fig. 36 Muestras de biochar obtenido.

Fuente: Autor

Luego de esto se guarda las muestras en un recipiente de vidrio o funda plástica con sellador, para garantizar que las muestras se conserven en buen estado para luego realizar las pruebas correspondientes.

3.7 Caracterización del biochar

Para la caracterización del biochar se realizaron tres tipos de pruebas con las muestras de biochar obtenido, que corresponden a: prueba de humedad, prueba de pH y conductividad.

3.7.1 Preparación de la muestra

Solo se necesita 10 g de muestra de biochar, por lo que se procede a pesar esa cantidad en una balanza electrónica, como se indica en la Figura 38, sección A.

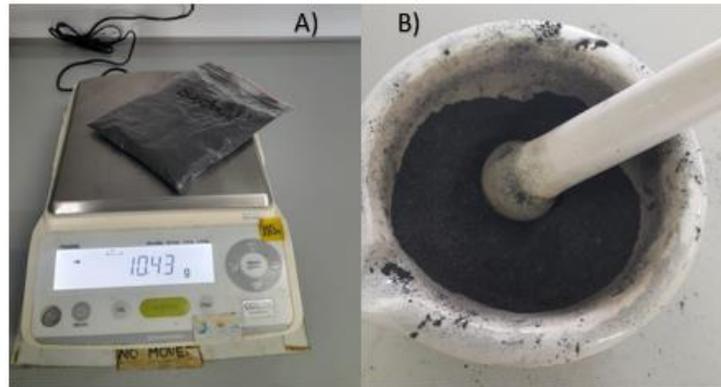


Fig. 37 A) Peso de la muestra, B) biochar triturado

Fuente: Autor

Luego con la ayuda de un mortero se procede a triturar la muestra de biochar hasta que tengan un tamaño de partícula similar al del carbón activado en polvo como se observa en la sección B.

3.7.2 Prueba de pH y conductividad eléctrica

Para las pruebas de pH y conductividad eléctrica se realizó un solo procedimiento, a continuación, se mencionan los pasos realizados para estas pruebas.

1. Primeramente, se utilizan un vaso de vidrio de laboratorio para la prueba de PH y otro diferente para la prueba de conductividad eléctrica, en los cuales se deposita un gramo de muestra de biochar en cada vaso respectivamente como se muestra en las Figuras 39.

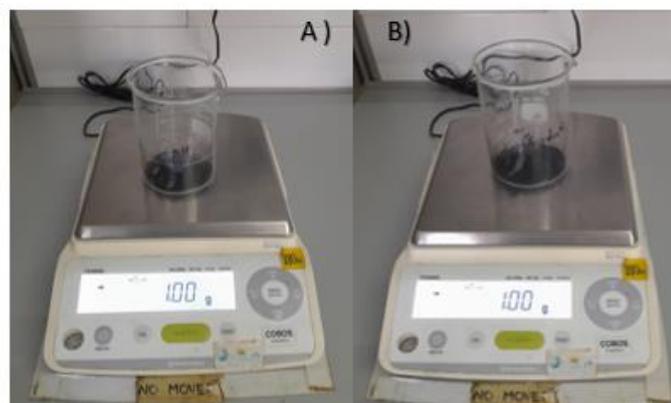


Fig. 38 A) Peso de la muestra para pH, B) Peso de la muestra para conductividad

Fuente: Autor

2. Luego se mide una cantidad de 100mL de agua destilada y se agrega en el vaso para la prueba de pH. Para la prueba de conductividad se agrega 100mL de agua tipo 1.
3. Se coloca el recipiente de pH y se agita la mezcla por cinco minutos y se deja en reposo por 15 minutos como se muestra en la Figura 40. Se repite el mismo proceso con el recipiente de conductividad.



Fig. 39 Mezcla de la muestra mediante un agitador.

Fuente: Autor

4. Utilizando un conductímetro se coloca el electrodo de pH dentro del recipiente de muestra y se espera un momento hasta que el valor en el conductímetro se estabilice, mostrando un valor de 8.60 unidades de pH, como se puede ver en la Figura 41 sección A.

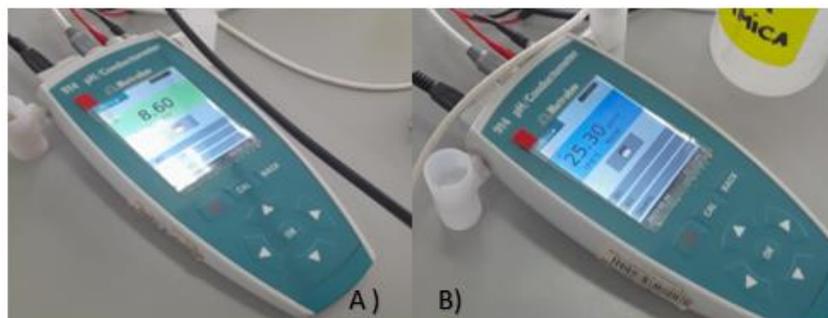


Fig. 40 A) Medición de Ph, B) Medición de la conductividad.

Fuente: Autor

5. Se coloca el electrodo para conductividad dentro del recipiente de muestra, obteniendo el valor de $25.30 \mu\text{S}/\text{cm}$, como se observa en la Figura 41 sección B. Para las pruebas realizadas tanto de pH como conductividad fue necesario calibrar el equipo de medición con la finalidad de obtener resultados más exactos.

3.7.3 Prueba de humedad

Para esta prueba se utilizó el método gravimétrico que se trata en determinar el porcentaje de humedad de una muestra por la diferencia de peso.

Para realizar esta prueba se siguieron los siguientes pasos:

1. Se utilizó un desecador de vidrio para eliminar secar el crisol en el que se deposita la muestra de biochar, como se observa en la Figura 42.



Fig. 41 Desecador

Fuente: Autor

2. Luego se procede a pesar el crisol en vacío, con lo cual se obtiene un valor de 24.3588 gramos, como se puede ver en la Figura 43.



Fig. 42 Peso del crisol vacío

Fuente: Autor

3. Luego se deposita aproximadamente 1 gramo de muestra en el crisol (Figura 44).



Fig. 43 Peso de la muestra de biochar

Fuente: Autor

4. Se procede a secar la muestra en un secador eléctrico a una temperatura de 100° C y por el tiempo de una hora aproximadamente, transcurrido ese tiempo se procede a retirar la muestra del secador (Figura 45).



Fig. 44 Retiro de la muestra

Fuente: Autor

Se pesa nuevamente la muestra seca y nos da un valor de 25.0508 gramos. Entonces una vez obtenidos todos los datos ya se puede calcular el porcentaje de humedad con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{(\text{Peso}_{\text{cápsula}} + \text{muestra}) - (\text{Peso}_{\text{cápsula}} + \text{Muestra seca})}{\text{Peso}_{\text{muestra}}} * 100 \quad (9)$$

Reemplazando los datos se tiene que:

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{(24.3589 + 0.7155) - (25.0508)}{0.7155} * 100$$

$$\% \text{ de Humedad} = 3.298$$

Esto quiere decir que el biochar obtenido a partir de las astillas de eucalipto apenas alcanza un 3.298 por ciento de humedad.

3.7.4 Cálculo del rendimiento de pirolisis

Para realizar el cálculo del rendimiento del biochar obtenido en función de la pirolisis, se emplea la ecuación (10) y los datos recopilados y presentados en la Tabla 15.

$$R = \frac{\text{Biomasa Inicial}}{\text{Biochar obtenido}} * 100 \quad (10)$$

TABLA 15. RENDIMIENTO DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS

Muestra	Rendimiento (%)
1	55.45
2	52.73
3	45.76

Fuente: Autor

En base a la Tabla 2, podemos decir que en las tres muestras realizadas se obtiene un alto porcentaje de producto sólido, sin embargo, en la muestra 2 se obtiene mayor rendimiento en comparación con las muestra 1 y 3.

3.8 Análisis de resultados experimentales y discusión

Para la validación del horno-reactor se realizaron tres pruebas de funcionamiento en las cuales se pudo obtener las respectivas muestras de biochar. En la Tabla 17 se muestra los parámetros de las pruebas experimentales:

TABLA 17.
PARÁMETROS DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS

Muestra (50 g)	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (min)	Duración del proceso (min)	Velocidad de calentamiento (°C)
1	400	60	105	5.72 °C/min
2	450	45	90	5.72 °C/min
3	500	30	75	5.72 °C/min

Fuente: Autor

En cada prueba se empleó una cantidad de 50 gramos de astillas de eucalipto, en las cuales se obtuvo un rendimiento aproximadamente del 50 % de producto sólido en comparación a la biomasa inicial. También se puede decir que a mayor temperatura se obtiene menor cantidad de biochar, en el ensayo para la muestra 3 también se observó la presencia de una pequeña proporción de producto líquido.

El tiempo que se demora la planta en llegar a la temperatura deseada es de 40 minutos aproximadamente. La pirolisis realizada a 450°C presenta mejores características para la obtención de biochar, ya que se obtiene mayor cantidad de producto sólido y así mismo la muestra 2 presenta un menor porcentaje de humedad como se indica en la Tabla N 18

TABLA 18.
DATOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Muestra	Prueba de pH	Prueba de conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Prueba de humedad (%)
1	8.25	22.54	3.61
2	8.60	25.30	3.29
3	8.62	23.30	4.21

Fuente: Autor

Cabe resaltar que el porcentaje de humedad es muy bajo en las tres muestras, en cuanto a los valores de pH, se puede decir que se aproxima más a un pH neutro o ligeramente alcalino.

El biochar obtenido a partir de astillas de eucalipto puede ser usado como combustible en plantas de generación eléctrica ya que presenta un bajo porcentaje de humedad y tiene un alto porcentaje de carbono fijo lo cual lo convierte en materia prima para la creación de un combustible líquido alternativo o a su vez como combustible sólido en reemplazo del carbón mineral.

Las aplicaciones de uso del biochar podría extenderse hasta el mercado de los combustibles que son usados en plantas de generación eléctrica y la transformación de metales (Medina, 2019). Una de las ventajas para su uso en el proceso de combustión, es que no se necesita hacer adaptaciones en las instalaciones, a diferencia de lo que ocurre con la biomasa sin procesar, por lo que es mucho más rentable para las empresas que producen energía; además, esta co-combustión no produce alquitranes que dañen los quemadores de la planta (Beltran & Rojas, 2014).

El biochar si se utiliza en plantas termoeléctricas pueden ayudar a reducir las emisiones de CO_2 , mientras que si se utiliza la biomasa común para la generación eléctrica sucede lo contrario, es muy perjudicial para el medio ambiente (Steiner, 2012)..

3.9 Costos

En el proceso de la pirolisis intermedia, se puede tener una alta eficiencia energética, además de que los costos de inversión como son el capital y los costos de electricidad son relativamente bajos, sobre todo en diseños a pequeña escala. (Gaungasig, 2022)

En la tabla se muestra el costo de cada de materiales y de construcción del horno-reactor.

Materiales	Precio unitario	Cantidad	Precio
Tubo de acero ASTM A36 (Carcasa)	\$ 40	1	\$40
Tubo de acero ASTM A36 (Recipiente de reacción y porta - cenizas)	\$20	1	\$20
Manómetro	\$ 6	1	\$6
Pernos y tuercas (M8 CLASE 8.8)	\$ 0.50	20	\$10
Relé estado sólido	\$ 25	1	\$ 25
Termocupla Tipo K	\$ 30	1	\$ 30
Controlador de temperatura TC-4S	\$ 60	1	\$ 80
Resistencia eléctrica tubular 1200 W	\$35	1	\$35
Interruptor termo magnético	\$ 6	1	\$ 6
Caja térmica	\$ 15	1	\$ 15
1 metro de fibra de cerámica	\$ 10	1	\$ 10
Mesa	\$ 70	1	\$ 70

Pintura	\$ 10	1	\$ 10
Unión de cobre	\$ 5	1	\$ 5
Manguera de cobre	\$ 5	1	\$ 5
(1 metro)			
Soldadura	\$ 50	1	\$ 50
<hr/>			
Total			\$417
<hr/>			

CONCLUSIONES

En base al trabajo desarrollado y los objetivos planteados se llega a las siguientes conclusiones:

- Existen distintos procesos o tipos de pirolisis, sin embargo, en base a la revisión bibliográfica realizada podemos decir que la pirolisis intermedia es la que mejor condiciones presenta para la obtención de biochar, ya que se puede obtener una mayor cantidad de producto sólido y en un tiempo de residencia corto en comparación con los otros procesos.
- Tomando en cuenta las condiciones de diseño se construyó un reactor tipo horno para el proceso de pirolisis para la obtención de muestras de biochar a partir de astillas de eucalipto como biomasa, con una capacidad máxima de 60 gramos y con un rango de temperatura de 400 a 500 °C. Mediante las pruebas de funcionamiento realizadas se puede decir que el reactor construido funciona correctamente cumpliendo satisfactoriamente con el objetivo principal para el cual fue diseñado. Este reactor puede ser utilizado también para futuros ensayos y pruebas experimentales con otros tipos de biomasa residual vegetal. En los ensayos realizados se llegó a la conclusión de que a mayor temperatura se obtiene menor cantidad de biochar, y a su vez disminuye el tiempo que dura el proceso de pirolisis para que se llegue a carbonizar la biomasa.
- El biochar obtenido a partir de astillas de eucalipto puede ser usado como combustible en plantas de generación eléctrica ya que presenta un bajo porcentaje de humedad y tiene un alto porcentaje de carbono fijo lo cual lo convierte en un muy buen biocombustible en su fase sólida.

RECOMENDACIONES

- Gracias a la experiencia obtenida en la realización de este trabajo de grado, se recomienda hacer el diseño y dimensionamiento para la construcción de cualquier tipo de máquina en general con el fin de evitar contratiempos y obtener mejores resultados.
- Es muy importante realizar el proceso de secado de las muestras de biomasa antes de realizar el proceso de pirolisis, de lo contrario se puede producir una mayor cantidad de gases adentro del reactor.
- Es importante tener en cuenta todas las condiciones de seguridad al momento de poner en funcionamiento el reactor, esto para evitar cualquier tipo de accidente. Por lo cual se debe utilizar los debidos equipos de protección como son: gafas, guantes de nitrilo, mandil, tapabocas, entre otros.
- Si se requiere cambiar cualquier parámetro de configuración en el controlador de temperatura, se debe leer el manual de instrucciones del prototipo en el cual se detalla paso a paso como se debe realizar cada proceso.
- El vacío en el recipiente de reacción se logró con el llenado de la misma biomasa, sin embargo, no es una atmósfera totalmente inerte, para poder lograr esto se recomienda implementar un sistema de entrada de flujo constante de nitrógeno hacia el interior del reactor y así se puede eliminar la presencia de oxígeno en su totalidad.

REFERENCIAS

- Acero, J. (2018). *VALORACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y DE ADSORCIÓN DEL*. Obtenido de https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3047/1/TGT_1666.pdf
- Ambiente, M. d. (2020). *Ecuador impulsa la gestión adecuada de residuos orgánicos en las ciudades*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-impulsa-la-gestion-adecuada-de-residuos-organicos-en-las-ciudades/#:~:text=Ecuador%20impulsa%20la%20gesti%C3%B3n%20adecuada%20de%20residuos%20org%C3%A1nicos%20en%20las%20ciudades,-Ecuador%20impulsa%20la&text=Diariamente>
- Angel Beltran, I. R. (2014). *Diseño y montaje de un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para el tratamiento de biomasa vegetal residual procedente de plazas de mercado de Bucaramanga*. Bucaramanga.
- Arturo Bermeo, B. C. (2014). Obtenido de <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/11957>
- Autonics. (s.f.). Controlador de temperatura Serie TC4S. <https://www.controlinteligente.com.mx/files/TC4.pdf>, 2.
- Barahona, G. (2005). *VARIACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA EN ALBURA, DURAMEN Y ALTURA DE MADERA PULPABLE DE Eucalyptus*. Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/105057/barahona_g.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Bernal, C. Y. (2019). *Plan de aprovechamiento de residuos orgánicos para la obtención de bioenergía en plazas de mercado públicas en Bogotá*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24295/VarelaBernalCarlosYesid2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Casillas, M. B. (2010). *Pretratamiento de Biomasa Celulósica para la Obtención de Etanol en el Marco de una Biorrefinería*. Obtenido de http://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL_BARROSO_CASILLAS.pdf
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- CEUPE, M. (2018).
- Christian Serrato Monroy, V. L. (2016). *Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de Cundinamarca*. Bogotá.
- Cueto, M. (2016). Obtenido de https://oa.upm.es/39453/1/MARIA_JESUS_CUETO_GARCIA.pdf
- Dario Bastidas, N. M. (2019). *Caracterización comparativa del proceso de pirólisis de dos biomásas*. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/19356/1/T-UCE-0017-IQU-052.pdf>
- Domínguez, M. L. (2017). *Hidroprocesado Catalítico de Biomasa Oleaginosa para la Obtención de Hidrocarburos*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10115/14717>
- EnergíasRenovalbes.info.com. (2014). *Fabricación de Pellets*.
- Energiza.org. (2020). *Proceso físico-químico*.

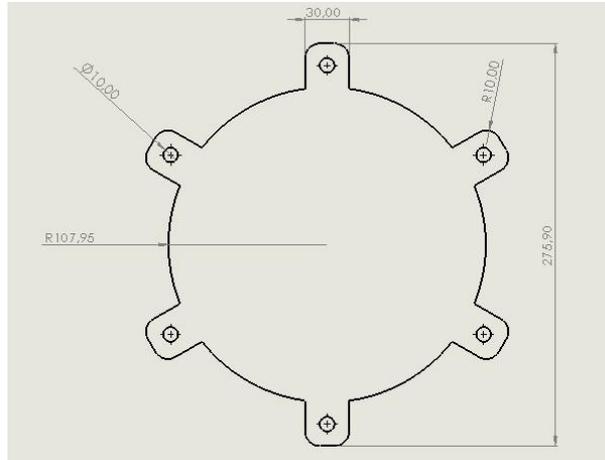
- Escalante, A. (2016). *Biocarbón: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-57792016000300367&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Espinoza, J. (2019). *Diseño de un reactor para pirólisis de biomasa residual: raquis de banano y tallos*. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/19672/1/T-UCF-0017-IQU-053.pdf>
- Fajardo, A. J. (2011). *Diseño y construcción de una unidad de investigación en pirólisis continua de biomasa*.
- Fernando Nogués, D. G.-G. (2010). Energías Renovables - Energía de la biomasa (Volumen1). En F. Nogués, *Energías Renovables - Energía de la biomasa (Volumen1)* (pág. 654). Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Gabriela Orozco Gutierrez, R. C. (2020). Elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos proveniente de las podas de bambú. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 9.
- García, M. C. (2016). *Potencial de producción de biochar en España a partir de residuos de la industria papelera, de lodos de E.D.A.R, de residuos sólidos urbanos y de residuos ganaderos: Estudio de la fijación de carbono*. Madrid.
- Gordillo, J. (2018). Quito, Ecuador.
- Gordillo, M. (2018). *Diseño y simulación de un equipo de biocarbón utilizando materia orgánica residual*. Quito.
- Guerrero, M. d. (2016). *Pirólisis a baja temperatura de la pomasa de manzana para la producción de biocombustibles*.
- Herguedas, A. (2012). *Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad*. Obtenido de <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Jácome, A. (2014). *Reactor de lecho fluidizado*. Obtenido de <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Reactores+de+lecho+fluidizado.pdf/6ca7e2f6-d323-926d-9055-6e05bbed7fde>
- Jordy Pariona-Palomino, W. M.-O. (2020). *Biochar como tecnología de emisión negativa (NET)*.
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química PUCP*, 40.
- Labbé, R., Droppelmann, F., Balocchi, C., & Miguel, P. (2013). Variation in wood density and pulp yield in Eucalyptus globulus clones evaluated with near infrared spectroscopy. *Valdivia*.
- Lesly Tejeda Benítez, A. V. (2012). *Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n36/n36a02.pdf>
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2016). *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
- Martinez, H. (2017). *Robótica educativa con MBOT y Arduino*.

- MEDIAActive. (2010). *Manual de Excel 2010*. Barcelona: MARCOMBO, S.A. Obtenido de Manual de Excel 2010.
- Medina, J. (2019). *ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD APLICADO A UNA PLANTA DE BIOREFINACIÓN POR CONVERSIÓN HIDROTÉRMICA HTC DE LA BIOMASA*. Obtenido de Jhon Medina: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3574/1/Analisis_de_factibilidad.pdf
- Montaño, I. L. (2017). *Diseño de una planta piloto de pirólisis rápida de la fracción orgánica de rechazo de RSU*. Sevilla.
- Monteros, L. (2015). *Diseño y construcción de un horno mufla para la realización de tratamientos térmicos en aceros*. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/4592/1/04%20MEC%20077%20Tesis.pdf>
- Morgan. (2022). *Fibra cerámica kaowool*. Obtenido de <http://msvsc03-g735nw.uv.netbenefit.com/msds-preview.asp?id=3289&lang=Spanish>
- Olmo, M. (2016). *Efectos del biochar sobre el suelo*. Obtenido de <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13381/2016000001398.pdf?sequence=1>
- Ortiz, A. S. (2015). *Síntesis de nanopartículas de biopolímeros extraídos de biomasa por métodos térmicos*.
- Otto Fernando Balseca, S. M. (2021). *Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos a partir de: PP, PE, y PS*.
- Plata), U. (. (2011). *Termocuplas*. Obtenido de <https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/cys/DI/termocuplas.pdf>
- Polo del conocimiento. (2021). *Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE, Y PS*. Obtenido de file:///C:/Users/PcHome/Downloads/2668-14213-2-PB%20(1).pdf
- Prieto, M. O. (2016). *Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal*. Córdoba.
- Probiomasa.gob.ar. (2018). Gasificación de biomasa.
- Rodríguez, A. (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*. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/1006/1/%E2%80%9CDise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20reactor%20tipo%20batch%2C%20Universidad%20Internacional%20SEK%E2%80%9D.pdf>
- Rodríguez, A. L. (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*.
- Sadegh Papari, K. H. (2015). *Una revisión sobre la pirólisis de biomasa leñosa a bioaceite: enfoque en modelos cinéticos*.

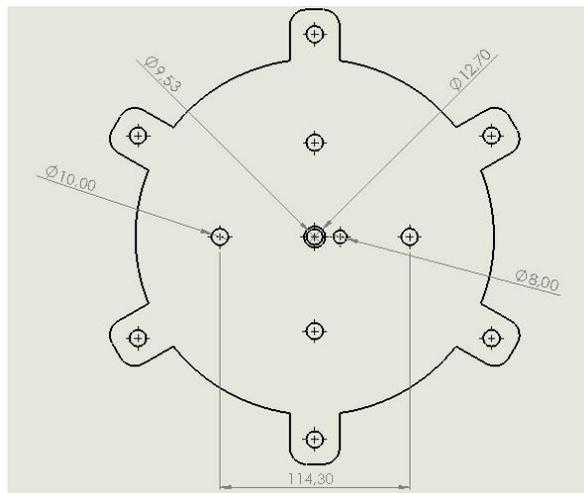
- SOLIDBI. (05 de Abril de 2022). *SOLIDWORKS*. Obtenido de Qué es y para qué sirve:
<https://solid-bi.es/solidworks/#:~:text=Definici%C3%B3n,proceso%20de%20desarrollo%20del%20p>
roducto.
- South Sustainability. (2021). Biochar como tecnología de emisión negativa frente al cambio climático. *South Sustainability*, 8.
- Steiner, C. (2012). *Las perspectivas del biocarbon - Secuestro de carbono, ciclo de nutrientes y generación de energía*.
- TEI, R. (2014). *Tipo K*. Obtenido de <http://teii.com.mx/Cable-termopar-K.pdf>
- The International Biochar Initiative (IBI). (2014).
- Twenergy. (21 de Agosto de 2019). Obtenido de <https://twenergy.com/energia/energias-renovables/que-son-las-energias-renovables-516/>
- Viloria, J. R. (2013). *Energías renovables. "Lo que hay que saber"*. España: Ediciones Paraninfo.

ANEXOS

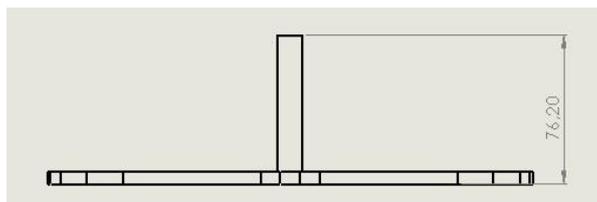
ANEXO A: PLANOS DE LAS PARTES DEL HORNO - REACTOR



Vista superior

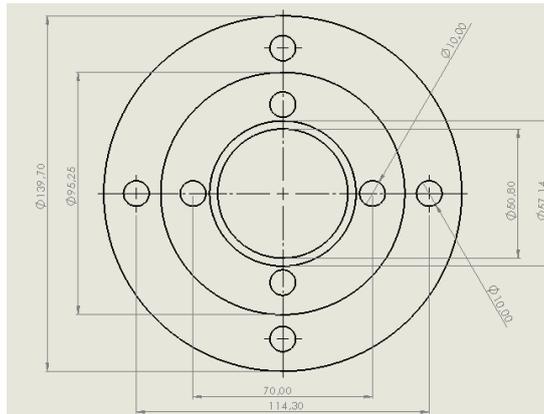


Vista superior

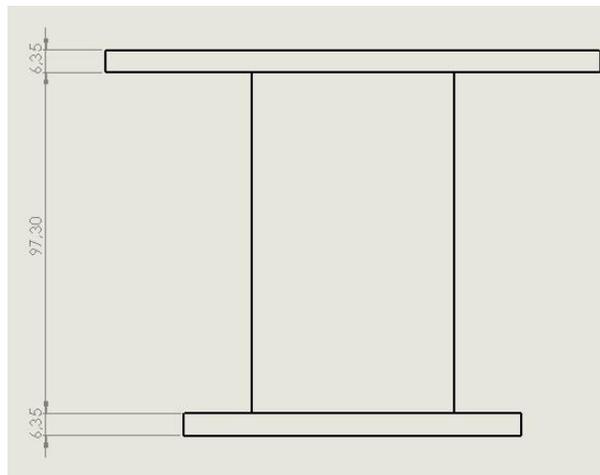


Vista frontal

Recipiente de reacción

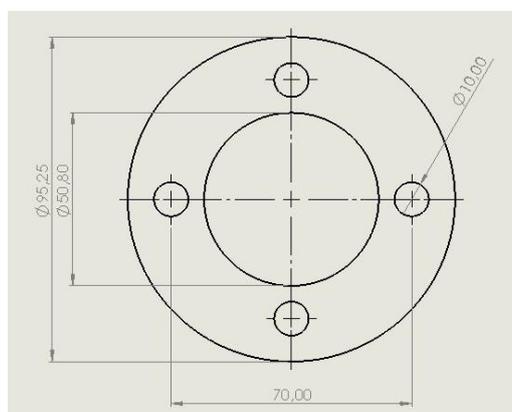


Vista superior

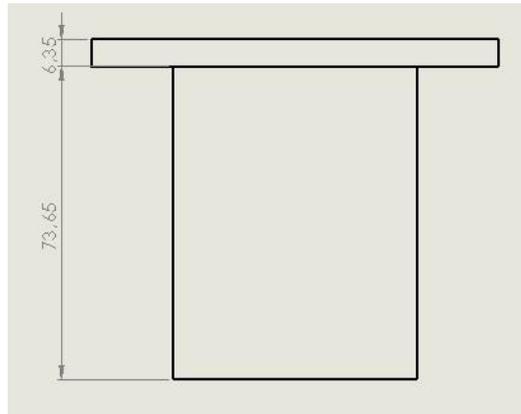


Vista frontal

Porta cenizas

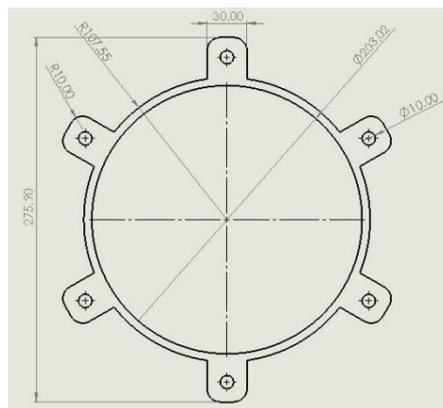


Vista superior

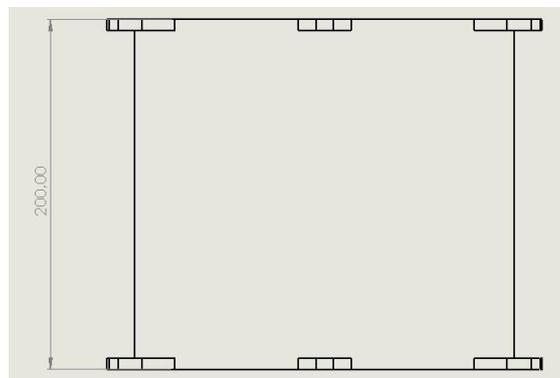


Vista frontal

Recipiente exterior



Vista superior



Vista frontal

ANEXO B: MANUAL DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA

Precauciones de Seguridad:

Advertencia

- Instalar la unidad en un panel. Puede causar un choque eléctrico
- Conectar correctamente después de revisar el número de terminal. Puede causar un incendio.
- No desarmar el dispositivo. Puede causar un choque eléctrico o un incendio.

Precaución

- Usar un cable de mayor calibre a 20 AWG (0.50mm²). Puede provocar mal funcionamiento
- Por favor tome en cuenta los rangos especificados. Puede acortar el ciclo de vida del producto y causar un incendio.
- No use la carga más allá de la capacidad de conmutación nominal del contacto a Relevador.
- Puede causar fallas de aislamiento, fundición de contacto, falla de contacto, rotura de relé, incendio, etc.
- Al limpiar la unidad, no use agua o solventes orgánicos. Use toallas secas. Puede causar un choque eléctrico o un incendio.

Características principales:

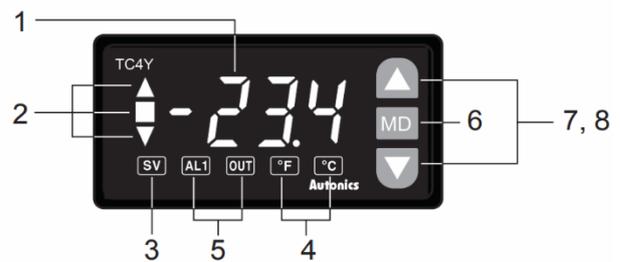
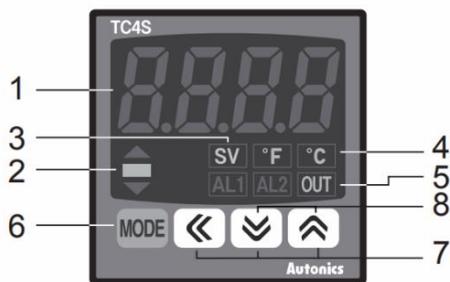
- Control de temperatura ideal gracias a su nuevo algoritmo de control PID y su muestreo de alta velocidad de 100ms.
- Salida a relevador y Salida SSRP en el mismo equipo: La salida SSRP hace posibles el control de fase y el control de ciclo.
- Muestra la desviación SV/PV existente.

Características generales técnicas:

TABLA DE CARACTERÍSTICAS GENERALES		
Alimentación	CA	100-240VCA 50/60Hz
	CA/CC	24 VAC 50/60Hz, 24-48VCC
Consumo de energía	CA	Máx. 5VA (100-240 VCA 50/60Hz, 24VCA 50/60Hz)
	CA/CC	Máx. 3W (24-48 VCC)
Tipo de entrada	RTD	DPt100Ω, Cu50Ω (máx.5 de resistencia de línea permitida por cable).

	TC	K(CA), J(IC), L(IC)
Salida de Control	Relay	250VCA 3 A 1a
	SSR	12VCC ± 2V 20mA Máx.
Método de control		Control ON/OFF, P, PI, PD, PID
Histéresis		1 a 100°C/°F (0.1 a 50.0°C/°F) variable
Período de muestreo		100ms
Ambiente	Temperatura Ambiente	-10 a 50°C, almacenamiento: -20 a 60°C
	Humedad Ambiente	35 a 85% RH, almacenamiento: 35 a 85% RH

Descripción de parámetros de display general



1. Display de temperatura:

- Modo RUN: Display de temperatura actual (PV).
- Modo de ajuste de parámetros: Display de parámetros.

2. Indicador de desviación, Indicador Auto-tuning:

Muestra la temperatura actual (PV) basado en la temperatura de ajuste (SV) por LED.

No	Tiempo de desv. PV	Display de desviación
1	Sobre 2°C	▲ indicator on
2	Sobre ±2°C	■ indicator on
3	Bajo -2°C	▼ indicator on

El indicador de desviación (▲ ■ ▼) parpadea cada segundo al operar con auto tuning.

3. Indicador de temperatura de ajuste (SV):

Presione una vez cualquier tecla frontal para revisar o cambiar la temperatura de ajuste actual (SV), el indicador de temperatura de ajuste se encenderá y el valor de ajuste preestablecido parpadeará.

5. Indicador de salida de Control/Alarma

- OUT: Iluminará cuando la Salida de Control se encuentra encendida (Salida de Control Principal).
- ※ Cuando se usa la salida de control SSR como CYCLE/PHASE, esta lámpara prende cuando MV es mayor a 3.0%
- AL1/AL2: Iluminará cuando las salidas de alarma AL1/AL2 se encuentren encendidas.

6. Tecla MODE : Se usa para ingresar en el grupo de ajuste de parámetros, regresar al modo RUN, moverse o cambiar de parámetros y almacenar valores de ajuste.

7. Ajuste: Se usa al ingresar en el modo de cambio del valor de ajuste. Cambio y modificación de dígitos.

8. Tecla de entrada digital: Pulse las teclas ↙ + ↕ por 3 segundos para operar la función ajustada (RUN / STOP, reinicio de salida de alarma, auto sintonía) en la tecla de entrada digital.

Control de Temperatura: Configurar “SET POIN” o ajustes de SV.

1. Pulse el botón MODE o ← , ↙ , ↕ para ingresar modificar el valor de “set point” la pantalla de display oscilará.
2. Modifique el valor de ajuste con los siguientes botones ↙ , ↕.
3. Después de revisar o cambiar el valor de ajuste en cada parámetro, presione la tecla MODE para guardar y salir a la pantalla principal

Control de Temperatura: Modificación de Tipo de Sensor de Temperatura

1. Presione **MODE** por 3 segundos para ingresar al grupo de Parámetros 2

PAR-2

2. Inmediatamente se muestra como primer parámetro en el display

IN-T

correspondiente al “Sensor de entrada” y presionamos cualquiera de estas 3 teclas , , .

3. De la Tabla 1 que muestra el fabricante seleccionar el “Sensor de entrada” utilizado en el control de temperatura.

Sensor de entrada		Display	Rango de Temp.(°C)	Rango de Temp.(°F)
Termo pares	K(CA)	KCA	-50 a 1200	-58 a 2192
	J(IC)	JIC	-30 a 500	-22 a 932
	L(IC)	LIC	-40 a 800	-40 a 1472
RTD	DPT100Ω	dPETH	-100 a 400	-148 a 752
		dPETL	-100.0 a 400.0	-148.0 a 752.0
	CU50Ω	CU50H	-50 a 200	-58 a 392
		CU50L	-50.0 a 200.0	-58.0 a 392.0

Tabla 16. “Sensor de entrada y rango de temperatura”

4. Con los botones ,  seleccionamos el “Sensor de entrada” respectivo de la Tabla 1.
5. Después de revisar o cambiar el valor de ajuste en cada parámetro, presione la tecla **MODE** para guardar y avanzar al siguiente parámetro a modificar caso contrario presiones por 3 segundos la tecla **MODE** para salir a la pantalla principal.

Control de Temperatura: Control de la ventana de histéresis para el CONTROL ON/OFF

1. Presione **MODE** por 3 segundos para ingresar al grupo de Parámetros 2

PAR-2

2. Presione **MODE** hasta encontrar el siguiente parámetro **AHYS** correspondiente a “Histéresis de Alarma” y presionamos cualquiera de

estas 3 teclas , , .

3. Con los botones ,  seleccionamos el configuramos el rango de ajuste de 1 a 999 °C.
4. Después de revisar o cambiar el valor de ajuste en cada parámetro, presione la tecla **MODE** para guardar y avanzar al siguiente parámetro a

modificar caso contrario presione por 3 segundos la tecla **MODE** para salir a la pantalla principal.

Control de Temperatura: Modificación de salida de control: Tipo Relé Mecánico o RSS (Relé de Estado Sólido)

5. Presione **MODE** por 3 segundos para ingresar al grupo de Parámetros 2

PAR2

6. Presione **MODE** hasta encontrar el siguiente parámetro **out** correspondiente a “Tipo de salida de Control” y presionamos cualquiera de estas 3 teclas **←**, **↓**, **↑**.

7. De la Tabla 2 que muestra el fabricante seleccionar el “Tipo de salida de Control” utilizado en el control de temperatura.

Tipo de salida de Control	Display
Salida tipo relé mecánico	rLY
Salida tipo SSR (Relé de Estado Sólido)	SSr

Tabla 17. “Tipo de salida de control”

8. Con los botones **↓**, **↑** seleccionamos el “Tipo de salida de Control” respectivo de la Tabla 1.
9. Después de revisar o cambiar el valor de ajuste en cada parámetro, presione la tecla **MODE** para guardar y avanzar al siguiente parámetro a modificar caso contrario presiones por 3 segundos la tecla **MODE** para salir a la pantalla principal.

Control de Temperatura: Configuración de PID

Advertencia: La configuración PID para este caso únicamente debe ser realizado si se encuentra instalado una unidad SSR o Relé de Estado Sólido. Caso contrario si es un relé mecánico reduce la vida útil drásticamente.

▪ **Configuración PID**

1. Presione **MODE** por 3 segundos para ingresar al grupo de Parámetros 2

PAR2

2. Presione **MODE** hasta encontrar el siguiente parámetro **C-ñd** correspondiente a “Método de Control” y presionamos cualquiera de estas

3 teclas **←**, **↓**, **↑**.

3. De la Tabla 3 que muestra el fabricante seleccionar el tipo “Método de Control” utilizado en el control de temperatura.

Método de Salida drive SSRP	Display
Control PID	PI d
Control ON/OFF	onof

Tabla 18. “Método de Control”

4. Con los botones **↓**, **↑** seleccionamos el “Método de Control” – “Control PID” respectivo de la Tabla 3.
5. Después de revisar o cambiar el valor de ajuste en cada parámetro, presione la tecla **MODE** para guardar y avanzar al siguiente parámetro a modificar caso contrario presiones por 3 segundos la tecla **MODE** para salir a la pantalla principal.

▪ **Tipo de Control PID**

1. Presione **MODE** por 3 segundos para ingresar al grupo de Parámetros 2

PAR2

2. Presione **MODE** hasta encontrar el siguiente parámetro **SSr.ñ** correspondiente a “Método de salida SSRP” y presionamos cualquiera de estas

estas 3 teclas **←**, **↓**, **↑**.

3. De la Tabla 4 que muestra el fabricante seleccionar el tipo “Método de salida SSRP” utilizado en el control de temperatura.

	Método de Salida drive SSRP	Display
1	Estándar de Control ON/OFF	Stnd
2	Control de Ciclo	CYCL
3	Control de Fase	PHAS

Tabla 19. "Método de salida SSRP"

*Escoger Modo 2 o 3 de la Tabla 4 según la necesidad para configuración de modo PID.

4. Con los botones  ,  seleccionamos el "Método de salida SSRP" bien respectivo de la Tabla 4.
5. Después de revisar o cambiar el valor de ajuste en cada parámetro, presione la tecla **MODE** para guardar y avanzar al siguiente parámetro a modificar caso contrario presiones por 3 segundos la tecla **MODE** para salir a la pantalla principal.

▪ **Auto-tunnig**

1. Presione **MODE** por 2 segundos para ingresar al grupo de Parámetros 1

2. Presione **MODE** hasta encontrar el siguiente parámetro  correspondiente a "Auto-tunnig" y presionamos cualquiera de estas 3 teclas  ,  ,  .
3. Con los botones  ,  seleccionamos el "Auto-tunnig ON"

*Si se ajusta como "Auto-tunnig OFF" automáticamente al finalizar la operación.

*Si se posee un modelo matemático PID, se puede realizar el ajuste de parámetros manualmente, Ver Manual de fabricante.

Control de Temperatura: Configuración de Alarma 1 o 2

1. Presione **MODE** por 2 segundos para ingresar al grupo de Parámetros 1

PAR 1*

2. Presione **MODE** hasta encontrar el siguiente parámetro **AL 1** correspondiente a "Ajuste de valor de Alarma 1" y presionamos cualquiera

de estas 3 teclas  ,  , .

3. Con los botones  ,  seleccionamos el valor requerido para configurar la Alarma 1.

4. Después de revisar o cambiar el valor de ajuste en cada parámetro, presione la tecla **MODE** para guardar y avanzar al siguiente parámetro a modificar caso contrario presiones por 3 segundos la tecla **MODE** para salir a la pantalla principal.

*Para configurar alarma 2 selecciones el siguiente parámetro **AL 2** y realice las mismas instrucciones.

Control de Temperatura: Configuración de Bloqueo

1. Presione **MODE** por 3 segundos para ingresar al grupo de Parámetros 2

PAR 2

2. Presione **MODE** hasta encontrar el siguiente parámetro **LoC** correspondiente a "Bloqueo de Parámetros" y presionamos cualquiera de

estas 3 teclas  ,  , .

3. De la Tabla 5 que muestra el fabricante seleccionar el tipo "Bloqueo de Parámetros" deseado.

Método de Salida drive SSRP	Display
Bloqueo desactivado	oFF
Bloqueo del 2do grupo de parámetros de configuración	LoC 1

Bloqueo del 1er y 2do grupo de parámetros de configuración	LoC2
Bloqueo del 1er, 2do grupo de parámetros de configuración y SV.	LoC3

Tabla 20. “Bloqueo de Parámetros”

4. Con los botones  ,  seleccionamos el “Bloqueo de Parámetros” respectivo de la Tabla 5.
5. Después de revisar o cambiar el valor de ajuste en cada parámetro, presione la tecla **MODE** para guardar y avanzar al siguiente parámetro a modificar caso contrario presiones por 3 segundos la tecla **MODE** para salir a la pantalla principal.

Ajustes de fábrica

- **Primer grupo de ajustes**

Parámetro		Ajustes de fábrica
AL1	Valor de ajuste de 1 Alarma	1250
AL2	Valor de ajuste de 2 Alarma	
At	Ejecución de Auto-tuning	oFF
P	Banda Proporcional	100
I	Tiempo Integral	0
d	Tiempo derivativo	
r-ESt	Reset manual	500
HYS	Histéresis	2

Tabla 21. “Ajustes de fábrica: Primer Grupo”

▪ Segundo grupo de ajustes

Parámetro		Ajustes de fábrica	Parámetro		Ajustes de fábrica
In-t	Tipo de entrada	PCR	AL-1	Modo de 1 Alarma	AN1A
Unit	Unidad de Temperatura	°C	AL-2	Modo de 2 Alarmas	AN2A
In-b	Corrección de entrada	0	ALYS	Histéresis de Alarma	1
RAF	Filtro digital de entrada	0.1	LbAt	Tiempo de monitoreo LBA	0
L-Sv	Límite bajo SV	-50	LbAs	Valor de ajuste de detección LBA	8
H-Sv	Límite alto SV	1200			
o-Fl	Operación de control	HEAt	LbAb	Banda de detección LBA	3
C-nd	Método de control	PI d	di-t	Operación de la tecla función	StoP
oUt	(*1)Tipo salida de control	rLY	ErAu	Error de entrada MV	00
t	Control de tiempo	200	LoC	Bloqueo	oFF
		20	-	-	-

Tabla 22. "Ajustes de fábrica: Segundo Grupo"

(*1) Acorde al modelo

Predeterminado para [t] Salida de contacto a Relevador [rLY] : 20.0 seg / Salida SSR [55r] : 2.0 seg. (En caso de salida de corriente [CUr], no se muestra ningún ajuste de fábrica.)