

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA PRODUCIR PELLETS DE
CARBON A PARTIR DE MATERIAL ORGANICO, PARA EL LABORATORIO DE
COMBUSTION DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA UIS

ANGELA LIZETH REYES CARVAJAL
MARIA CAMILA MOYA VELEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA
2023

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA PRODUCIR PELLETS DE
CARBON A PARTIR DE MATERIAL ORGANICO, PARA EL LABORATORIO DE
COMBUSTION DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA UIS

ANGELA LIZETH REYES CARVAJAL
MARIA CAMILA MOYA VELEZ

Trabajo de grado para optar al título de ingeniera mecánica.

Director:
YESID JAVIER RUEDA ORDOÑEZ
Ph. D. en ingeniería Química, ingeniero mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA
2023

DEDICATORIA.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por todas las bendiciones recibidas, por darme las herramientas y la sabiduría necesarias para seguir y alcanzar mis sueños. A mis padres Teresa y Miguel, por su esfuerzo continuo, sus enseñanzas, amor y apoyo incondicional, ya que son ellos la razón de todos mis logros, a mis primos y tíos que creyeron en mí y me impulsaron a seguir creciendo. A mis amigos de la universidad que se convirtieron en familia y alegraron esta etapa tan importante de mi vida. A esas personas que han llegado a mi vida en el último año y que me han ayudado a crecer como profesional y sobre todo como persona. Gracias infinitas a todas las personas que han dejado huella en mí y que con sus enseñanzas han construido lo que soy hoy en día.

Angela Reyes

Agradezco a Dios, por darme la sabiduría y fortaleza para estudiar ingeniería mecánica, a mis padres, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, por darme las herramientas necesarias para salir adelante y siempre creer en mis capacidades. A mis familiares que me dieron la mano cuando más lo necesite. A mis profesores de carrera por compartir sus conocimientos contribuyen en mi formación y crecimiento profesional. A mis amigos y compañeros de carrera, por la compañía, la energía y las alegrías vividas, por brindar calor de hogar mientras estuve lejos de mi familia, por aportar a mi crecimiento profesional y personal, en general le doy gracias a todos los que han estado en mi vida y quiero que sepan que, todo lo aprendido en estos años está en mi cabeza y todas las personas que conocí, en mi corazón, mil gracias.

María Camila Moya Vélez

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de tesis, Yesid Javier Rueda Ordoñez que con su experiencia y sabiduría nos guio a realizar este proyecto.

A la universidad industrial de Santander, por la oportunidad de realizar nuestro pregrado en ingeniería mecánica, con todas las oportunidades, beneficios y herramientas obtenidos durante nuestra estancia.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3. JUSTIFICACIÓN.....	22
4. MARCO TEORICO.....	23
4.1 ESTADO DEL ARTE.....	23
4.1.1 Antecedentes.....	23
4.2 REFERENTES TEORICOS.....	27
4.2.1 Carbonización.....	27
4.2.2 Sistema de manufactura de pellets de biomasa.....	27
4.2.3 Caracterización de los residuos sólidos orgánicos generados en plazas de mercado ..	28
4.2.4 Contenido de Humedad.....	28
4.2.5 Biocarbón.....	29
4.3 MARCO CONCEPTUAL.....	29
4.3.1 Características de los equipos de carbonización, molienda y paletizado existentes en la actualidad.....	29
4.3.1.1 Equipo de carbonización.....	29

TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS ORGANICOS

6

4.3.1.2 Equipo de molienda.	30
4.3.1.3 Equipo de peletizado.	30
4.3.2 Características de los residuos orgánicos.	31
4.3.2.1 Composición de los residuos orgánicos.	31
4.3.3 Caracterización de los residuos orgánicos.	32
4.3.3.1 Humedad de los residuos orgánicos (% H).	33
4.3.3.2 Densidad de las partículas de los residuos (ρp).	33
4.3.3.3 Densidad aparente del lecho (ρb).	34
4.3.3.4 Diámetro de la partícula (DP).	34
4.3.3.5 Esfericidad de la partícula (ϕ).	35
4.3.3.6 Fracción de vacío (ϵ).	35
4.3.3.7 Fracción de vacío de mínima fluidización (ϵmf).	36
4.3.3.8 Velocidad mínima de fluidización (Umf).	36
4.3.3.9 velocidad de arrastre (Ut).	36
4.3.3.10 Altura del equipo.	37
5. DISEÑO CONCEPTUAL DE LOS EQUIPOS.	37
5.1 REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.	38
5.1.1 Restricciones del equipo.	38
5.1.2 Requerimientos del equipo.	38

5.2 PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.	39
5.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE ENTRE LOS EQUIPOS DE CARBONIZACION, MOLIENDA Y PELETIZADO.	40
5.3.1 Determinación de subsistemas del equipo de transporte de material carbonizado.	41
5.3.2 Cálculos de diseño del sistema de transporte.	42
6. DISEÑO EN DETALLE EQUIPO CARBONIZADOR.	46
6.1 DETERMINACIÓN DE SUBSISTEMAS Y COMPONENTES DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.	46
6.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.	47
6.3 CALCULOS DEL REACTOR.	47
6.3.1 Selección del ventilador y controlador de velocidad.	47
6.3.2 Definición de parámetros de cálculo.	48
6.3.3 Cálculos termodinámicos para la cámara de carbonizado.	49
6.3.3.1 Cálculo del flujo másico de aire para la cámara de carbonización (ma).	49
6.3.3.2 Calculo del área transversal de la cámara de carbonización (Ac).	49
6.3.3.3 Calculo de las velocidades del aire antes y después de las resistencias (V1, V2).	50
6.3.3.4 Calculo calor termodinámico (Qterm).	50
6.3.4 Cálculos transferencia de calor para la cámara de carbonizado.	51
6.3.4.1 Calculo convección interna forzada.	51

TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS ORGANICOS

8

6.3.4.2 Cálculo de convección natural externa.	52
6.3.4.3 Malla de resistencias.	55
6.3.4.4 Solución sistema de ecuaciones.	56
7. RESULTADOS TEORICOS.	57
7.1 PROPIEDADES DEL LECHO Y DE LOS RESIDUOS ORGANICOS.	57
7.2 RESULTADOS PARA EL ANÁLISIS DE TERMODINÁMICA	58
7.3 RESULTADOS ANALISIS TRANSFERENCIA DE CALOR.	59
7.4 RESULTADOS CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO CARBONIZADOR.	62
7.5 RESULTADOS DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE ENTRE EQUIPOS	63
8.RESULTADOS PRACTICOS.	64
8.1 MODELADO EN SOFTWARE CAD	64
8.2 CONSTRUCCION DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.	65
8.3 PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.	66
8.4 COSTOS ECONOMICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.	67
8.5 RESULTADOS FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.	68
8.5.1 Primera prueba de funcionamiento.	69
8.5.2 Segunda prueba de funcionamiento.	70
9. CONCLUSIONES.	74
10. RECOMENDACIONES.	76

TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS ORGANICOS

9

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS. 76

APÉNDICE..... 80

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1 Restricciones para el diseño del reactor.....	38
Tabla 2 Requerimientos para el diseño del reactor.....	39
Tabla 3 Subsistemas de los equipos de transporte.....	41
Tabla 4 Subsistemas del equipo de carbonización.....	46
Tabla 5 Resultados propiedades del lecho y de los residuos orgánicos.....	58
Tabla 6 Resultados análisis de termodinámica.....	59
Tabla 7 Resultados convección interna forzada.....	60
Tabla 8 Resultados convección natural.....	60
Tabla 9 Resultados malla de resistencias.....	61
Tabla 10 Propiedades del acero AISI 304.....	63
Tabla 11 Componentes equipo de carbonización.....	63
Tabla 12 Resultados diseño del sistema de transporte.....	63
Tabla 13 Procedimiento operación equipo de carbonización.....	66
Tabla 14 Materiales utilizados para la construcción del equipo carbonizador.....	67
Tabla 15 Resultados obtenidos en prueba 2 de funcionamiento del equipo.....	71

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1 Características de los residuos orgánicos.	31
Figura 2 Análisis funcional del reactor.	38
Figura 3 Reactor seleccionado en el diseño conceptual.....	40
Figura 4 Sistema de transporte seleccionado para el diseño.....	41
Figura 5 Coeficiente de relleno.....	43
Figura 6 Coeficiente de disminución de flujo.....	44
Figura 7 Valores para capacidad por hora	44
Figura 8 Volumen de control en cámara de carbonizado.	48
Figura 9 Correlaciones para el cálculo del número de Nusselt.....	54
Figura 10 Malla de resistencias térmicas.	55

LISTA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1 Residuos orgánicos.	28
Ilustración 2 Peso de la muestra húmeda y seca.	33
Ilustración 3 Determinación densidad aparente del lecho	34
Ilustración 4 Anemómetro portátil.....	50
Ilustración 5 Equipo de carbonización construido.....	68
Ilustración 6 Primera muestra de residuos orgánicos.	70
Ilustración 7 Muestra antes y después de la carbonización.	72
Ilustración 8 Fotografía termográfica del equipo en funcionamiento.....	72

LISTA DE APENDICES.

Apéndice 1. Cálculo de la densidad aparente del lecho.....	80
Apéndice 2. Cálculo del volumen de la partícula.	81
Apéndice 3. Cálculo experimental de la velocidad del aire antes de las resistencias.	82
Apéndice 4. Modelado y planos del equipo de carbonización.....	83
Apéndice 5. Modelado y planos sistema de transporte.....	96
Apéndice 6. Planos eléctricos del sistema de calentamiento	104
Apéndice 7. Planos eléctricos del sistema de ventilación.....	105

NOMENCLATURA

A_c Área transversal cámara carbonización.	k_{air} Conductividad térmica del aire.
A_s Área superficial.	K_{ais} Conductividad térmica del aislante.
C_D Coeficiente de fricción.	L Longitud del transportador.
C_{eq} Capacidad equivalente para el transporte.	Lc longitud del cilindro.
C_{F1} Factor de relación del paso del helicoidal.	\dot{m}_a Flujo masico de aire.
C_{F2} Factor al tipo de helicoidal.	m_b Masa de partículas que conforman el lecho.
C_{F3} Factor de uso de paletas mezcladoras.	\dot{m}_{mc} Flujo masico material transportado.
C_p Calor específico.	N Número de revoluciones equipo de transporte.
C_0 Coeficiente de resistencia del material transportado.	N_{uci} Numero de Nusselt convección interna.
D_c Diámetro del cilindro.	Nu_{cn} Numero de Nusselt convección natural.
D_H Diámetro de la hélice.	P Paso del tornillo.
D_K Diámetro del canalón.	P_H Potencia para el desplazamiento horizontal del sistema de transporte.
D_P Diámetro de la partícula.	P_N Potencia de accionamiento del tornillo en vacío.
D_1 Diámetro interno del reactor.	P_r Número de Prandtl.
f Factor de fricción.	P_T Potencia total sistema de transporte.
F Factor de corrección.	Q_{mc} Capacidad volumétrica del equipo de transporte.
g Aceleración gravitacional.	Q_{per} Calor de perdidas.
Gr_L Número de Grashof.	Q_{term} Calor termodinámico.
h_{ext} Coeficiente de transferencia de calor externo.	Q_{TOT} Calor total.
h_{int} Coeficiente de transferencia de calor interno.	Ra_L Número de Rayleigh.
%H Humedad de los residuos orgánicos.	R_{convi} Resistencia de convección interna.
K_{ac} Conductividad térmica del acero.	R_{condac} Resistencia de conducción del acero.

TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS ORGANICOS

15

$R_{condais}$ Resistencia de conducción del aislante.

R_{eFA} Número de Reynolds fuerza de arrastre.

R_{eD} Numero de Reynolds convección interna forzada.

R_T Resistencia total.

S Área de relleno del canalón.

s_p Área superficial de la partícula.

T_{amb} Temperatura ambiente.

T_b Temperatura de propiedades.

T_f Temperatura de película.

T_s Temperatura de superficie.

T_1 Temperatura en el estado 1.

T_2 Temperatura en el estado 2.

U_{mf} Velocidad mínima de fluidización.

U_t Velocidad de arrastre.

V Velocidad de transporte.

v_{ap} Volumen aparente del lecho.

V_p Volumen de partícula.

V_{prom} Velocidad promedio.

V_1 Velocidad de aire en el estado 1.

V_2 Velocidad de aire en el estado 2.

Letras griegas

β coeficiente de expansión volumétrica.

ε Fracción de vacío.

ε_{mf} Fracción de vacío de mínima fluidización.

i Coeficiente de disminución de flujo.

λ Coeficiente de relleno.

μ viscosidad dinámica.

μ_g Viscosidad dinámica del gas.

ν viscosidad cinemática.

ρ_b Densidad aparente del lecho.

ρ_g Densidad del gas aire.

ρ_{mc} Densidad de material transportado.

ρ_p Densidad de las partículas de los residuos orgánicos.

ρ_1 Densidad de aire en el estado 1.

ρ_2 Densidad de aire en el estado 2.

Φ Esfericidad de la partícula.

RESUMEN.

Título: Diseño y construcción de un equipo para producir pellets de carbón a partir de material orgánico, para el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica UIS. ¹

Autores: María Camila Moya Vélez, Angela Lizeth Reyes Carvajal²

Palabras Clave: Residuos orgánicos, carbonización, reactor.

Descripción: La carbonización se considera un proceso de transformación, en el cual el material sufre degradación de sus componentes y se incrementa el contenido de carbono; el objetivo de este proyecto es el diseño y construcción de un equipo que permita carbonizar los residuos orgánicos, para esto se estableció un reactor, que genere calor a partir de resistencias eléctricas y que tenga un flujo constante de aire, que aporte al proceso de secado y carbonización y que además expulse el material del reactor una vez este complete el proceso de carbonizado.

Para el diseño se evaluaron los tipos de reactores existentes en la actualidad y se realizó la caracterización de los residuos orgánicos, esta información se empleó para establecer parámetros y requerimientos de operación, a partir de esto se establecen los subsistemas básicos para el funcionamiento del equipo y posteriormente se realiza un análisis, termodinámico y de transferencia de calor, para obtener características dimensionales, determinar la energía necesaria para que el equipo cumpla su función principal, y además se evalúan las pérdidas que puedan ocurrir en el sistema durante su funcionamiento. Después de establecer todos los parámetros físicos y operacionales, se desarrolla el modelado 3D en el software SolidWorks, finalmente se construye el equipo y se evalúa el comportamiento, funcionalidad y confiabilidad en el proceso de transformación de residuos orgánicos.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Yesid Javier Rueda, Ingeniero mecánico Ph.D

ABSTRACT

Title: Design and construction of an equipment to produce carbon pellets from organic material, for the combustion laboratory of the school of mechanical engineering UIS.³

Authors: María Camila Moya Vélez, Angela Lizeth Reyes Carvajal⁴

Keywords: Organic wastes, carbonization, reactor.

Description: Carbonization is considered a transformation process, in which the material undergoes degradation of its components and the carbon content is increased; the objective of this project is the design and construction of an equipment that allows carbonization of organic waste, for this purpose a reactor was established, which generates heat from electrical resistances and has a constant flow of air, which generates a constant flow of air, which contributes to the drying and carbonization process and also expels the material from the reactor once it has been the material from the reactor once it completes the carbonization process.

For the design, the types of reactors currently existing were evaluated and the characterization of the organic waste was carried out, this information was used to establish parameters and operation requirements, from this the basic subsystems for the operation of the equipment were established and later a thermodynamic and heat transfer analysis was carried out to obtain dimensional characteristics, determine the energy necessary for the equipment to fulfill its main function, and also evaluate the losses that may occur in the system during its operation. After establishing all the physical and operational parameters, the 3D modeling is developed in the SolidWorks software, finally the equipment is built and its performance is evaluated. the equipment and evaluate the performance, functionality and reliability in the process of organic waste transformation. organic waste transformation process.

³ Degree Thesis.

⁴ Faculty of physicomechanical. Mechanical Engineering School. Director. Yesid Javier Rueda. Mechanical Engineer Ph.D.

INTRODUCCIÓN.

El desmesurado incremento en los patrones de consumo que vive la sociedad en la actualidad, sumado a la deficiente disposición y aprovechamiento de los residuos orgánicos, genera una preocupación constante en cuanto a las grandes afectaciones ambientales y sociales que se viven en la actualidad, como es el caso de Bucaramanga. Ahora bien, esta situación abre el camino a un campo con gran potencial para ser estudiado en cuanto a la transformación de los residuos. Por medio de este proyecto se desarrolló el diseño y construcción de un equipo para la carbonización de los residuos orgánicos a escala de laboratorio, que genera calor a partir de resistencias eléctricas y está sometido a un flujo de aire constante, en el desarrollo del diseño, se realizó la caracterización del material a utilizar, además de definir los requerimientos y parámetros que contemplan las condiciones y exigencias del proceso.

Por consiguiente, para asegurar la funcionalidad y confiabilidad de la transformación y aprovechamiento de los residuos orgánicos, se realizó el análisis, termodinámico y de transferencia de calor para conocer el consumo energético, características dimensionales del equipo y a su vez para entender el comportamiento en el secado y carbonización de los residuos que se encuentran sometidos a efectos de calor y una corriente continua de aire.

Todos los análisis se ven resumidos en un modelado geométrico en 3D, realizado en el programa SolidWorks, y en la construcción, que permite la evaluación del comportamiento, funcionalidad y alcance del equipo, para la transformación de los residuos orgánicos, en carbón que sea aprovechable para otros procesos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la gestión de residuos, a nivel global influye de manera significativa en el desarrollo económico, social y ambiental de una sociedad, en países de América Latina y el caribe, se estima que cada habitante produce alrededor de un kilo de basura al día, lo que representa un 10 % de los residuos generados a nivel global. Se estima que cerca de 145.000 toneladas de basura al día, finalmente terminan en basurales a cielo abierto, cifra que se ve afectada, tras el aumento desmesurado de patrones de consumo en dichos países, sumado a los modelos de gestión de residuos que se implementan actualmente. Es importante resaltar que los desechos orgánicos, representan, en promedio, un 50 % de los residuos municipales en los países mencionados y no solo esto, sino que también, son los residuos que menos se gestionan, pese a que son una clara fuente de contaminación, debido a la generación de gases de efecto invernadero y lixiviados. Organización de Naciones Unidas, O.N.U. (2018).

En países como Colombia existen normativas que establecen que: “para el manejo de los residuos sólidos se utilizarán los mejores métodos, de acuerdo con los avances de la ciencia y tecnología, para la recolección, tratamiento, procesamiento o disposición final de residuos sólidos y en general, de desechos de cualquier clase.”(Resolución 1045 de 2003), lo cual no se ha visto reflejado en ciudades como Bucaramanga, donde la gestión de residuos no ha sido manejada de forma eficiente, ya que sectores como el porvenir, barrio aledaño al relleno sanitario El Carrasco, ha sufrido grandes afectaciones, debido a la acumulación desmesurada de basura, afectando la vida digna, salud y ambiente sano de la población en general.

Ante las diversas problemáticas relacionadas a la disposición de desechos en los rellenos sanitarios, actualmente se vienen desarrollando distintos procesos para sacar provecho de estos, como es el caso de la transformación de desechos orgánicos por medio de procesos como el

compostaje, biometanización, entre otros; estos presentan algunas desventajas reflejadas en la duración de los procesos y el costo elevado de producción y transporte. Por otra parte, está el carbonizado, el cual es un proceso de combustión directa, producida a altas temperaturas y baja concentración de oxígeno, obteniendo como resultado biocarbón, el cual se puede obtener a partir de cualquier material de origen vegetal.

La carbonización como proceso de transformación de desechos orgánicos a biocarbón presenta algunos beneficios tales como: evitar las emisiones de humo, ya que este produce esencialmente CO y CO₂, lo cual contribuye directamente en la disminución de problemas de salud pública, también permite reducir costos de manejo y transporte de la materia, (Quesada,2012).

Con el desarrollo de este proyecto se plantea el diseño y construcción de un dispositivo, para la transformación de desechos orgánicos, por medio de la carbonización de los residuos y posterior transformación en pellets, manejando un proceso secuencial en el que ingrese la materia prima y pase en primer lugar por el equipo carbonizador, siguiendo al proceso de molienda y finalmente a la máquina peletizadora.

2. OBJETIVOS.

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un dispositivo para producir pellets de carbón, mediante un proceso de carbonización térmica de desechos orgánicos, destinado para el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica UIS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un reactor que realice la carbonización de residuos orgánicos, cumpliendo las siguientes especificaciones.
 - Capacidad de procesamiento 1 kg/hora de residuos orgánicos.
 - Temperatura máxima de trabajo de 300°C
 - Transformación de residuos orgánicos, realizando un proceso continuo de carbonización.
- Construir un reactor idóneo para la carbonización de desechos orgánicos y evaluar su funcionalidad por medio de la aplicación de diferentes condiciones de trabajo tales como:
 - Temperatura de carbonización
 - Humedad de los desechos orgánicos.
 - Tiempo de residencia de los residuos.
- Diseñar los elementos necesarios, para conformar un proceso de producción continua, entre reactor, molino y la máquina peletizadora, involucrados en la transformación de desechos orgánicos a carbón.

3. JUSTIFICACIÓN.

La deficiente disposición de los desechos orgánicos, resulta ser una problemática que afecta el ámbito económico, social, ambiental a nivel mundial, el enfoque de este proyecto se dirige a la situación que enfrenta la ciudad de Bucaramanga, Santander, donde su relleno sanitario “el Carrasco”, ha sido foco de crisis sanitarias. El desarrollo de un equipo para producir pellets de carbón a partir de material orgánico es una alternativa que contribuye en la reducción de los niveles de contaminación, mediante la transformación de dichos residuos en biocombustible, en este caso particular biocarbón.

Es importante resaltar que en regiones de América Latina y el Caribe, la inadecuada disposición de desechos, representa un gran reto para la sostenibilidad, ya que el costo que esto implica en términos de desarrollo, salud e impacto al ambiente, puede llegar a ser entre 5 y 10 veces mayor al costo que representa una buena gestión de los desechos. O.N.U (2018). El aprovechamiento de los residuos orgánicos es una estrategia ideal para contrarrestar esta problemática, es importante tener en cuenta que: “El aprovechamiento debe realizarse siempre y cuando sea económicamente viable, técnicamente factible y ambientalmente conveniente”. Jaramillo & Zapata (2008).

El diseño y construcción de un equipo para transformación de desechos orgánicos, a escala de laboratorio, es un buen comienzo para determinar características, condiciones óptimas de trabajo, información útil y relevante, para impulsar la creación modelos a mayor escala, que puedan generar gran impacto en la forma de realizar la disposición de residuos orgánicos.

4. MARCO TEORICO

Es necesario recopilar información relacionada a la problemática planteada anteriormente, con el fin de profundizar en diversos conceptos, para así plantear soluciones acordes a las necesidades del problema, teniendo en cuenta procedimientos, investigaciones y resultados obtenidos a partir de los siguientes antecedentes y referentes:

4.1 ESTADO DEL ARTE

4.1.1 Antecedentes

Urien (2013), realizo un trabajo de investigación titulado: “Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual”, en el cual describe las diferentes características y ventajas que presenta la biomasa para el aprovechamiento energético. Inicialmente se mencionan las características físico-químicas de la biomasa, donde se establece que su procesamiento depende de factores como: poder calorífico, carbono fijo, materia volátil, contenido en cenizas, contenidos en metales alcalinos y relación celulosa/hemicelulosa/lignina. Por otra parte, se menciona el proceso de pirolisis, que es el encargado de realizar la carbonización, por medio de un proceso termoquímico, en el cual se produce el calentamiento de la biomasa, generado por una serie de reacciones químicas que dependen directamente de la composición y estructura de a la materia, así como de la velocidad de calentamiento y enfriamiento, tiempo de residencia y temperatura del proceso. También se establece que es posible obtener carbones activos con características similares a los existentes comercialmente, además se menciona su utilización en alimentación animal, como un compuesto para la eliminación de toxinas. Esta investigación, muestra los parámetros fundamentales, para realizar el análisis y caracterización del material orgánico, así como las condiciones de trabajo que debe suplir la máquina a realizar para la carbonización.

Quezada (1990), desarrollo el diseño y construcción de un equipo para obtener carbón de alta pureza a partir de destilación seca de la madera, para esto inicialmente evaluó las características más relevantes del equipo utilizado; tales como:

- Modo de Operación: Únicamente necesita de energía externa para el arranque y posteriormente es autosuficiente, debido a que los gases calientes se dirigen hacia un intercambiador de calor tipo serpentín contracorriente.
- Cámara de Calentamiento: Lugar donde se produce el calentamiento de la madera hasta carbonizarse, entre los gases generados en el proceso se encuentran CO, CO₂, N₂, H₂O.
- Temperatura de trabajo: 370° aproximadamente, con el fin de obtener la mayor cantidad de combustible sólido posible.
- Material: Ladrillo refractario.

El autor realizo una explicación detallada de los componentes de la máquina, evidenciada con planos, cálculos y características particulares del proceso, por otra parte, menciona los usos que puede llegar a tener el carbón obtenido, entre ellos: utilización para uso doméstico (cocción de alimentos), combustibles con fines industriales, pigmentos para tintas de imprenta y pinturas, entre otros. Según los resultados mostrados por el autor, se evidencia que logro generar una optimización entre valor calorífico y costo del carbón, obtenido como resultado un producto de alta pureza y altamente efectivo, con mejores características que los carbones encontrados comercialmente. Este proyecto, muestra las ventajas del proceso de carbonización y como el correcto diseño y definición de parámetros, contribuyen significativamente en la efectividad del producto final.

Quesada (2012) elaboro un artículo titulado “la carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes” allí el autor explica que se puede obtener biocarbón de casi cualquier tipo de biomasa y que, si se aprovecha de forma correcta, puede ser transformada mediante la combustión en bioenergía. El autor hace énfasis en que para obtener la energía que se quiere aprovechar de la biomasa, se debe realizar un proceso de secado y que si se desea mayor rentabilidad dicho secado debe realizarse con calores residuales de procesos existentes. Se explica el proceso pirolítico que consiste en someter al material a altas temperaturas en ausencia de aire, este proceso va desde la gasificación a temperaturas mayores a 600°C pasando por la pirolisis a temperaturas alrededor de 500°C, para llegar a la carbonización con temperaturas desde 250°C hasta 500°C, es conveniente aprovechar los gases que se producen en la gasificación para los procesos de combustión. Esta investigación centra su enfoque en el aprovechamiento de los gases residuales generados tras la gasificación, lo cual es importante tener en cuenta, si se desea obtener un proceso de carbonización más eficiente.

Se realizó una Investigación del efecto de los parámetros de elaboración de pellets de cusco de palma en el proceso de pirolisis, Zapata (2016), para la Universidad Nacional de Colombia, donde se determinan los factores que intervienen en el proceso de peletizado de material a nivel de laboratorio, los pellets generados tienen un diámetro de 6mm y entre las condiciones de trabajo se encuentran que se realizan una variaciones de la humedad, entre un 8 y 25%, se utiliza una temperatura entre 20 y 100 °C y un tamaño del grano de hasta 1mm. Otro aspecto fundamental que se menciona en la investigación es la aglomeración, que se basa en la formación de los pellets a partir de la adición de partículas por la acción de fuerzas de corto alcance entre ellas o a través de aglomerantes.

En la aglomeración a nivel industrial, es común el uso de métodos como granulación y aglomeración por presión, este último ocurre tras la deformación elástica y plástica de las partículas, produciendo que las fuerzas de adhesión se incrementen. Para el tratamiento de partículas procedentes de biomasa, es común el uso de máquinas como prensas briqueteadoras y tornillos extrusores. Los parámetros a tener en cuenta a la hora de producir pellets son:

- **Humedad del material:** El contenido de agua de la biomasa influye significativamente en la calidad de los pellets, cuando esta excede el 25%, el proceso de densificación se dificulta y afecta la compactación de las partículas. Por el contrario, si el porcentaje de humedad es muy bajo, el pellet comenzará a ganar humedad del medio y se volverá frágil al transcurrir los días.
- **Temperatura del material:** Ocurre un incremento en la temperatura de la biomasa debido a la fricción entre partículas, el autor establece que se aumenta la calidad de los pellets, si el proceso se realiza a temperaturas mayores a 60°C, además esto contribuye a la aglomeración de las partículas.
- **Tamaño del Grano:** Es importante resaltar que entre más fino sea el grano mayor es la durabilidad del pellet, los tamaños de grano superiores a 1mm, representan un punto de quiebre para los pellets, por lo que la investigación recomienda utilizar tamaños menores al mencionado.
- **Presión de Peletizado:** Es la encargada de compactar el material para lograr la aglomeración de partículas, a mayor presión mayor densidad de los pellets y, por tanto, mejores resultados.

Entre las normas destinadas para la comercialización de pellets a partir de biomasa se encuentran: Pellet Fuel Institute (PFI) [USA], European Common Standard for Solid Fuel (CEN) (CEN/TC 335) [Europa], ONORM 7135, compressed wood or com- pressed bark in natural state— pellets and " bri- quettes [Austria], Pellsam [Suecia] DIN 51731 (testing of solid fuels—

compressed untreated wood) [Alemania]. Finalmente, se enuncian los factores de evaluación de los pellets entre donde se tiene en cuenta la durabilidad, densidad a granel, comportamiento térmico. Todas las características del proceso de peletizado, son esenciales para obtener un producto eficiente y de calidad, esta investigación permite conocer de forma detallada aspectos relevantes y específicos en el proceso de elaboración de pellets.

4.2 REFERENTES TEORICOS

4.2.1 Carbonización.

La carbonización consiste en la transformación del material orgánico en carbón, bajo la sola influencia de la temperatura, controlando la entrada del aire, descomposición térmica llamada pirolisis; donde las sustancias orgánicas aumentan sus niveles de carbón. Como resultado de la carbonización se obtienen: un sólido, el carbón vegetal; mezcla de agua y componentes orgánicos, además una mezcla de gases no condensables que contiene dióxido y monóxido de carbono, hidrógeno, metano, etileno, entre otros compuestos orgánicos. El conocimiento de la técnica de carbonización permite elaborar un material de mayor poder calorífico, a través de un método de bajo costo y simple de aprender. (Raaeli, 2016).

4.2.2 Sistema de manufactura de pellets de biomasa

El proceso de producción de pellets consta de varias etapas para tratar la biomasa de tal forma que se compacte y se obtenga material densificado. La primera etapa es la molienda para obtener material de igual tamaño de partícula; una vez el material cumple esta etapa se humedece con algún aglomerante y se prensa en una máquina peletizadora; el diámetro del pellet es inferior a 10mm y la longitud no mayor a 30mm. Cuando los pellets son producidos a partir de biomasa diferente a la madera, son denominados pellets de biomasa mixtas, que poseen un poder calorífico cercano al de los pellets de madera. (Forero et al., 2012).

4.2.3 Caracterización de los residuos sólidos orgánicos generados en plazas de mercado

Mediante muestreos y análisis de laboratorio se puede obtener la composición física y química de los residuos sólidos como lo es el contenido de humedad, relación carbono y nitrógeno, contenido de cenizas, metales pesados y pesticidas, entre otros. Es de gran importancia saber la composición de los residuos para saber si cumplen los requerimientos de las distintas alternativas de transformación. (Velzea, 2008)

Ilustración 1

Residuos orgánicos.



Nota. Tomado de Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). *Caracterización y gestión de Residuos [Fotografía]*. Obtenido de <http://www3.cec.org/islandora/fr/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>

4.2.4 Contenido de Humedad.

Es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Si el contenido de humedad es bajo, mejor será el poder calorífico de esa biomasa y su proceso de combustión, ya que cuando se quema la biomasa, primero hay que evaporar el agua antes de que el calor esté disponible. La mayoría de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad relativa inferiores al 30%. Con valores superiores se hace necesaria la implementación de

operaciones de acondicionamiento y secado previas al proceso de conversión de energía. (Herguedas et al., 2012)

4.2.5 Biocarbón.

Es un producto que se obtiene tras la descomposición térmica a bajas temperaturas de materiales orgánicos, bajo un proceso con suministro limitado de oxígeno. Las partículas de biocarbón se componen principalmente de láminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas. (Escalante et al., 2016)

4.3 MARCO CONCEPTUAL.

4.3.1 Características de los equipos de carbonización, molienda y paletizado existentes en la actualidad

4.3.1.1 Equipo de carbonización.

El reactor es el equipo fundamental para el proceso de carbonización, suelen estar conformados por diversos componentes, entre los que se pueden encontrar, un recipiente generalmente metálico con tuberías y accesorios, controladores de presión y temperatura, una fuente de calor, ya sea por medio de combustibles o resistencias y tienen además algún tipo de aislante térmico. Es importante tener en cuenta que para el diseño de este tipo de equipos se deben considerar aspectos como las características del material a tratar, temperatura, presión de funcionamiento primordial a la hora de determinar el espesor del recipiente.

En cuanto al funcionamiento de los reactores, empleados para la degradación de materiales orgánicos, está dado por varias etapas, inicialmente se carga el reactor con los desechos orgánicos, en segundo lugar, se da la transferencia de calor a la superficie por medio de conducción y convección, posterior a esto se genera una acumulación de calor y calentamiento de los residuos sólidos dando así, inicio a su degradación, en consecuencia, se genera el desprendimiento de gases

y vapores de combustión, luego se presenta la difusión y flujo a través del residuo carbonoso caliente con degradación y reacciones adicionales, finalmente se obtienen los productos finales del proceso (Balseca, 2021).

4.3.1.2 Equipo de molienda.

El molino es el encargado de triturar el material, con el fin de obtener el tamaño de partícula adecuada en el proceso de peletizado, es crucial que el producto obtenido una vez finalizada la molienda no sea expuesto a humedad, dado que esto puede influir negativamente en las propiedades de los pellets (Portero, 2014).

4.3.1.3 Equipo de peletizado.

La peletizadora tiene como función producir un material altamente densificado mediante procesos de compresión, la máquina se conforma principalmente por los siguientes componentes: rodillo de compresión, una matriz que cuenta con una serie de orificios, encargados de dar forma a la materia prima y un elemento de corte. Cuando la peletizadora es cargada con el material de trabajo, el rodillo se dispone a ejercer la presión suficiente para empujarlo a través de los orificios de la matriz, de esta manera se compacta el material y se obtiene la forma característica de los pellets, una vez el material pasa por la matriz el elemento de corte entra en acción y los deja al tamaño requerido (Portero, 2014).

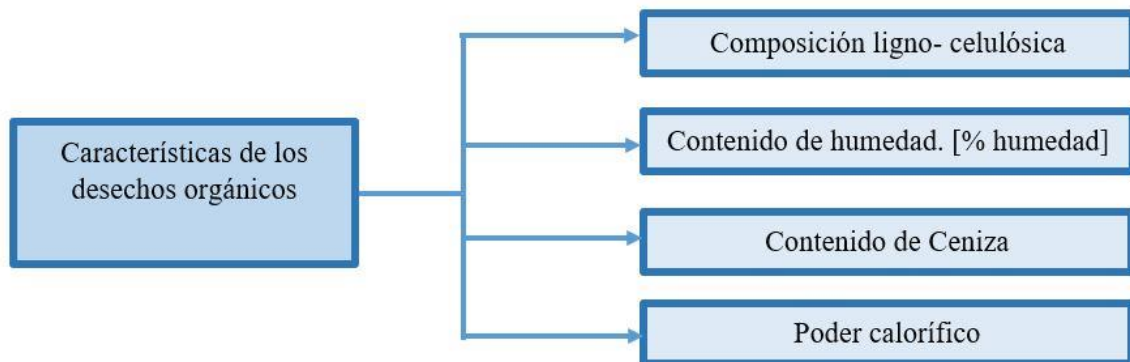
4.3.2 Características de los residuos orgánicos.

4.3.2.1 Composición de los residuos orgánicos.

Las principales características que afectan el rendimiento de los productos de la combustión, para la carbonización de desechos orgánicos son:

Figura 1

Características de los residuos orgánicos.



Nota. Tomado de los autores.

- Composición ligno – celulósica:

Para el proceso de carbonización hay que tener en cuenta la estructura química de los desechos orgánicos, estos se componen principalmente por hemicelulosa (15-30%), celulosa (40-60%) y lignina (10-30%). Una vez los desechos orgánicos se someten a un proceso de combustión, comienza la degradación de dichos componentes, cuando se alcanza una temperatura en un rango de 180-290°C, empieza a ocurrir la degradación de la hemicelulosa y parcialmente de la celulosa y lignina, pero es a los 290°C se logra la máxima tasa de degradación de hemicelulosa, por otra parte, en un rango de temperaturas de 290 – 370°C ocurre la degradación total de la celulosa,

alcanzando la tasa máxima en 370°C, en este rango de temperatura se generan productos entre ellos: líquido orgánico, gases no condensables (CO, CO₂, H₂, CH₄), agua y sólidos carbonosos. Finalmente, la degradación completa de lignina se consigue con temperaturas superiores a 370°C, siendo esta la responsable de la formación de cerca del 50% del carbono fijo de material sólido (Diaz, 2011).

- Contenido de humedad.

El contenido de humedad de los desechos orgánicos se refiere a la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de masa seca, es importante que el porcentaje de humedad no exceda el 30%, en los procesos de conversión energética como lo es la carbonización. Si la humedad de los residuos es demasiado alta, la temperatura de combustión no será suficiente para completar las reacciones químicas. La humedad es esencial para determinar la energía que se obtiene luego de la combustión. (Focer, 2002).

- Contenido de ceniza.

Hace referencia a la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material, cabe resaltar que la combustión de desechos orgánicos produce menos ceniza a comparación de la de carbón mineral (Focer, 2002).

- Poder calorífico

Es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa y se expresa como la cantidad de energía por unidad física (ej. Joule por kilogramo). Es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente. (Herguedas et al., 2012)

4.3.3 Caracterización de los residuos orgánicos.

4.3.3.1 Humedad de los residuos orgánicos (%H).

La humedad de los residuos orgánicos se determinó de forma experimental, para esto se pesó una muestra de material húmedo, posteriormente esta muestra se sometió a un proceso de carbonizado en una mufla, y luego de su carbonización, se pesó la muestra de material seco y empleando la ecuación [4.1], se halló el porcentaje de humedad.

$$\%H = \frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa Seca}}{\text{Masa Húmeda}} * 100 \quad [4.1]$$

Ilustración 2

Peso de la muestra húmeda y seca.



Nota. Tomado de los autores

4.3.3.2 Densidad de las partículas de los residuos (ρ_p).

La densidad correspondiente a los desechos orgánicos (ρ_p) fue tomada de “tabla de propiedades de alimentos comunes” (Cengel, 2011). para esto se tomó un promedio de los valores de densidad expuestos en el libro.

4.3.3.3 Densidad aparente del lecho (ρ_b).

La densidad aparente del lecho (ρ_b) es el cociente entre la masa de las partículas que conforman el lecho (m_b) y el volumen que ocupan las partículas incluyendo espacios vacíos (v_{ap}). Esta fue determinada de forma experimental (ilustración 3), como se muestra en el Apéndice 1.

$$\rho_b = \frac{m_b}{v_{ap}} \quad [4.2]$$

Ilustración 3

Determinación densidad aparente del lecho



Nota. Tomado de los autores.

4.3.3.4 Diámetro de la partícula (D_p).

Debido a que los residuos orgánicos utilizados en la carbonización no son esféricos, se calcula el diámetro de una esfera que sea equivalente al material que se va a caracterizar. El valor del volumen de la partícula (V_p) se calcula de forma experimental como se muestra en el Apéndice 2

$$D_p = \left(\frac{6 * V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [4.3]$$

4.3.3.5 Esfericidad de la partícula (ϕ).

La esfericidad de la partícula está dada por la relación área- volumen de la esfera y la relación de área -volumen de la partícula. Esta relación ayuda a determinar qué tan esférica es una partícula y se calcula con la ecuación [4.4]

$$\phi = \frac{\frac{6}{D_p}}{\frac{S_p}{v_p}} \quad [4.4]$$

$$S_p = \pi * D_p^2 \quad [4.5]$$

$$v_p = \frac{1}{6} * \pi * D_p^3 \quad [4.6]$$

Donde:

s_p : Área superficial de partícula

v_p : Volumen de la Partícula

D_p : Diámetro de partícula

4.3.3.6 Fracción de vacío (ε).

La fracción de vacío se conoce como la relación que existe entre el volumen total y los espacios vacíos existentes entre el material.

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_p \quad [4.7]$$

4.3.3.7 Fracción de vacío de mínima fluidización (ε_{mf}).

La fracción de vacío de mínima fluidización aumenta ligeramente entre el 1 al 4 % por el aumento de la presión de operación, también aumenta alrededor de un 8% para partículas pequeñas con respecto a la temperatura, pero no afecta a las partículas grandes.

$$\varepsilon_{mf} = 0.586 * \phi^{-0.722} * \left(\frac{\mu^2}{\rho_g * g(\rho_p - \rho_g)D_p^3} \right)^{0.029} * \left(\frac{\rho_g}{\rho_p} \right)^{0.021} \quad [4.8]$$

4.3.3.8 Velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).

La velocidad mínima de fluidización es aquella donde el fluido comienza a suspender las partículas y las correlaciones utilizadas para la determinación de la velocidad mínima de fluidización se tomaron de (Kunii,1991).

$$(1 - \varepsilon_{mf}) * (\rho_p - \rho_g) * g = 150 * \frac{\mu_g U_{mf} (1 - \varepsilon_{mf})^2}{Dp^2 \varepsilon_{mf}^3} + 1.75 * \frac{\rho_g U_{mf}^2 (1 - \varepsilon_{mf})}{Dp \varepsilon_{mf}^3} \quad [4.9]$$

4.3.3.9 velocidad de arrastre (U_t).

Si luego de alcanzar la velocidad de mínima fluidización, se sigue aumentando el caudal del fluido, el sistema se fluidiza hasta llegar el momento en que las partículas sean arrastradas por el fluido pasando por la cámara de salida hasta el final del equipo.

$$U_t = \left(\frac{4 * g * Dp * (\rho_p - \rho_g)}{3 * \rho_g * C_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [4.10]$$

La velocidad de arrastre depende del coeficiente de fricción que está en función del número de Reynolds.

$$C_D = \frac{24}{Re_{FA}} + 3.3643 * Re_{FA}^{0.3471} + \frac{0.4607 Re_{FA}}{Re_{FA} + 2682.5} \quad [4.11]$$

El número de Reynolds para el cálculo de la fuerza de arrastre se determina con la siguiente ecuación

$$Re_{FA} = \frac{Dp * U_{mf} * \rho_g}{\mu_g} \quad [4.12]$$

4.3.3.10 Altura del equipo.

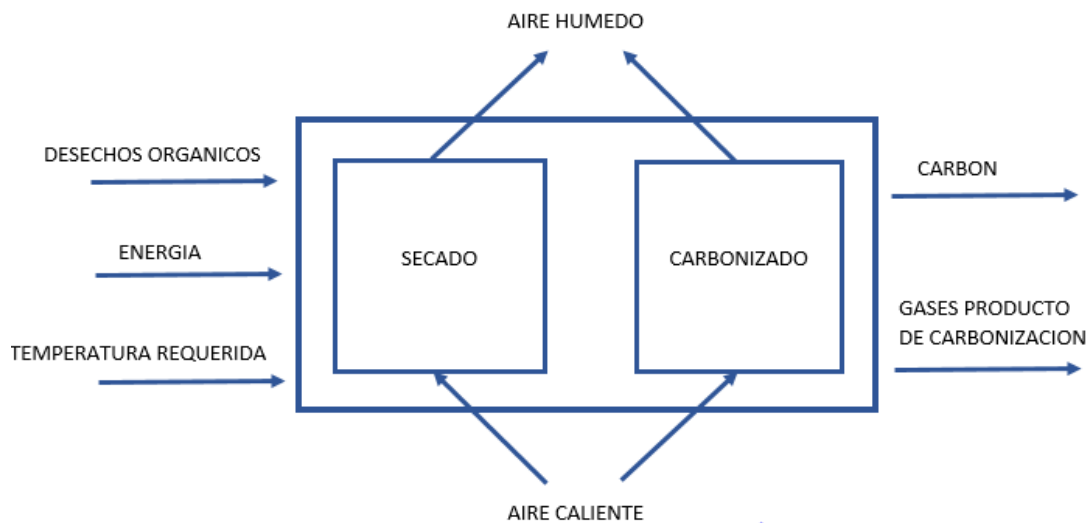
El cálculo de la altura del lecho fluidizado se determinó de forma experimental, realizando un prototipo del equipo y usando la velocidad de arrastre del material carbonizado, se evidenció la altura a la cual se elevan las partículas tomando como referencia la rejilla que las soporta, la altura registrada es de 20cm que es la necesaria para que el material carbonizado salga por completo del equipo carbonizado.

5. DISEÑO CONCEPTUAL DE LOS EQUIPOS.

5.1 REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.

Figura 2

Análisis funcional del reactor.



Nota. Tomado de: Los autores.

5.1.1 Restricciones del equipo.

Tabla 1

Restricciones para el diseño del reactor.

RESTRICCIONES	CARACTERISTICAS
Dimensionales	El reactor no debe exceder 1,5 [m] de altura, ni 0.4 [m] de diámetro.
Diseño	Utilizar materiales y componentes que se encuentren fácilmente en el mercado

Nota. Tomado de: Los autores.

5.1.2 Requerimientos del equipo.

Tabla 2

Requerimientos para el diseño del reactor.

REQUERIMIENTOS	CARACTERISTICAS
Condiciones ambientales	Temperatura de trabajo 300°C
Tipo de proceso	Por lotes
Rata típica de producción	1 [Kg/h]
Características cuantitativas de la materia prima	Los desechos ingresan con una humedad del 83% y tamaño de partícula de 1 [cm ²].
Fuente de energía disponible	Eléctrica y térmica.
Servicio público disponible para el funcionamiento	Electricidad
Localización del proceso	Zona urbana, bajo techo
Características operativas y funcionales	Los desechos deben ingresar al reactor e inicialmente eliminar el contenido de humedad (proceso de secado) y posteriormente realizar el proceso de carbonizado
Interfaz con el operador	Control de temperatura de las resistencias y control de velocidad del ventilador.

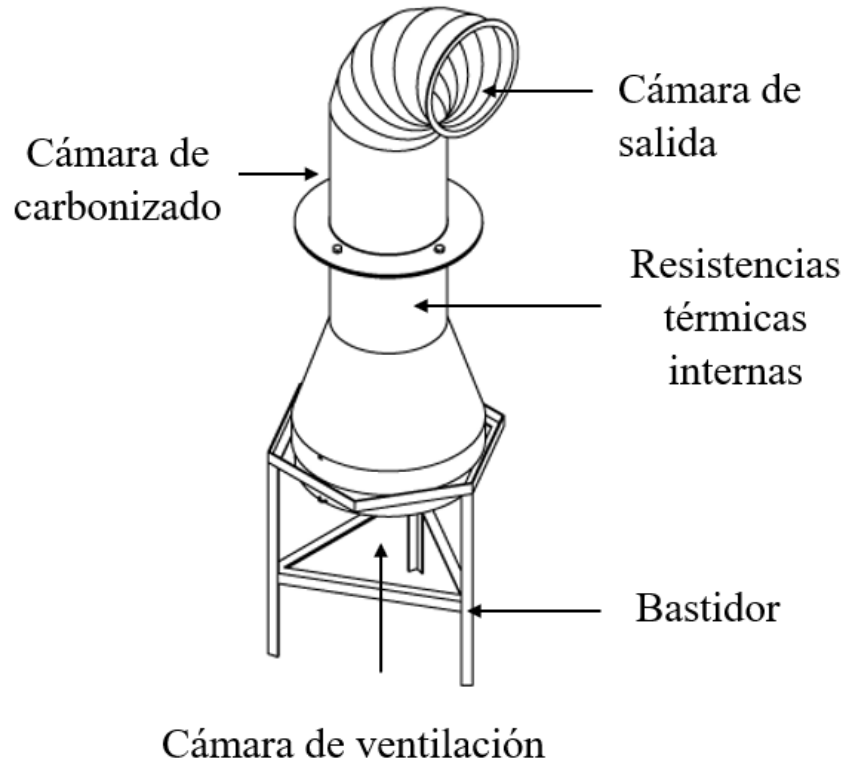
Nota. Tomado de los autores.

5.2 PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.

Continuando con el proceso de diseño se evaluaron las restricciones y requerimientos que fueron mencionadas anteriormente en el documento, con lo cual se plantearon diferentes alternativas de modelos de reactores. Finalmente, el modelo de reactor seleccionado es el ilustrado en la figura 3.

Figura 3

Reactor seleccionado en el diseño conceptual.



Nota. Tomado de los autores

5.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE ENTRE LOS EQUIPOS DE CARBONIZACION, MOLIENDA Y PELETIZADO.

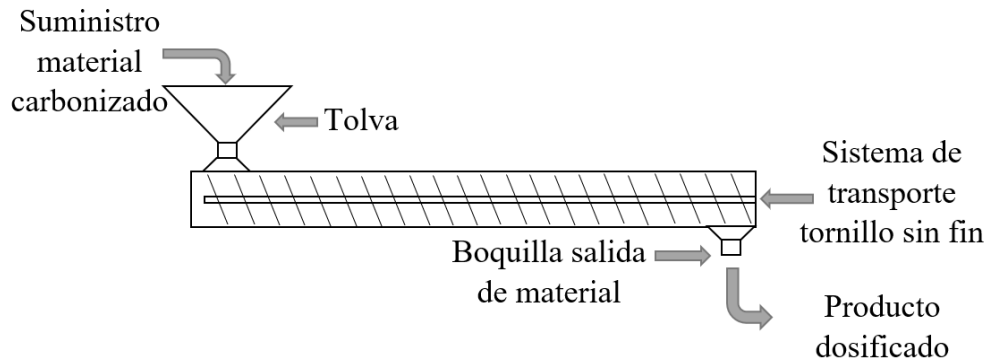
Para el transporte del material carbonizado desde el equipo de carbonización hasta el molino (equipo de transporte 1) y del molino hasta la máquina peletizadora (equipo de transporte 2), se decidió implementar dos tornillos sin fin con las mismas características dimensionales y estructurales. Para el diseño de estos equipos, se tiene en cuenta que la capacidad de transporte es de 1kg/h y que el tipo de material utilizado en el proceso es granuloso y polvo de carbón.

5.3.1 Determinación de subsistemas del equipo de transporte de material carbonizado.

A continuación, se muestra la estructura general del equipo de transporte seleccionado para el diseño (Figura 4), y se muestran sus subsistemas.

Figura 4

Sistema de transporte seleccionado para el diseño.



Nota. Tomado de los autores

Tabla 3

Subsistemas de los equipos de transporte.

SUBSISTEMA	COMPONENTES	CARACTERISTICAS
CÁMARA DE INGRESO DE MATERIAL	Tolva de entrada	Lugar de ingreso de material. Equipo de transporte 1: Ingreso de material proveniente del equipo de carbonización. Equipo de transporte 2: Ingreso de material proveniente del equipo de molienda.
CÁMARA DE SALIDA DE MATERIAL	Boquilla de salida	Lugar de salida de material. Equipo de transporte 1: Salida de material hacia del equipo de molienda Equipo de transporte 2: Salida de material hacia del equipo de peletizado.
CAMARA DE TRANSPORTE	Tornillo sin-fin Canalón	Es el encargado de transportar el material desde la tolva de entrada hacia la boquilla de salida. Esta estructura contiene el tornillo sin fin.

Nota. Tomado de los autores.

5.3.2 Cálculos de diseño del sistema de transporte.

Se determina la capacidad volumétrica del equipo, teniendo en cuenta el flujo másico y la densidad del material a transportar. El valor de la densidad del material para los cálculos del sistema de transporte fue tomado del catálogo 4000 sección H. (Sprocket et al., 2013).

$$Q_{mc} = \frac{\dot{m}_{mc}}{\rho_{mc}} \quad [5.1]$$

Donde:

Q_{mc} : Capacidad volumétrica del equipo [m^3/h]

\dot{m}_{mc} : Flujo másico de material transportado [Kg/h]

ρ_{mc} : Densidad de material transportado [Kg/m^3]

Para el cálculo de la velocidad de desplazamiento del transportador se requiere conocer el área de relleno de canalón.

$$S = \lambda * \frac{\pi * D_K}{4} \quad [5.2]$$

Donde:

S : Área de relleno del canalón [m^2]

λ : Coeficiente de relleno.

D_K : Diámetro del canalón. [m]

El coeficiente de relleno (λ), se tomo basados en el tipo de carga como se muestra en la figura 5.

Figura 5

Coefficiente de relleno.

Tipo de carga	Coefficiente de relleno, λ
Pesada y abrasiva	0,125
Pesada y poco abrasiva	0,25
Ligera y poco abrasiva	0,32
Ligera y no abrasiva	0,4

Nota: Se considera el coeficiente como carga ligera y no abrasiva. Recuperado de: Rodríguez Galbarro, H. (2018). *ingemecanica*. Tomado de Cálculo de Transportadores: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>.

El cálculo de la velocidad de transporte viene determinado por la siguiente ecuación.

$$Q_{mc} = 3600 * S * V * i \quad [5.3]$$

Donde:

Q_{mc} : Capacidad volumétrica del equipo [m^3/h].

S : Área de relleno del canalón [m^2]

V : Velocidad de transporte. [m/s]

i : Coeficiente de disminución de flujo.

El coeficiente de disminución de flujo (i), se toma de la siguiente figura.

Figura 6

Coefficiente de disminución de flujo.

Inclinación del canalón	0°	5°	10°	15°	20°
<i>i</i>	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Nota: Se considera el coeficiente como 1. Tomado de: Rodríguez Galbarro, H. (2018). *ingemecanica*. Obtenido de Cálculo de Transportadores: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>.

El número de revoluciones (*N*) se determina de acuerdo con la tabla de capacidades mostrada en la figura 7.

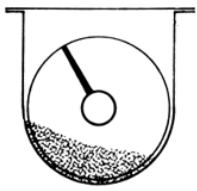
$$N = \frac{Q_{mc}}{\text{Capacidad pies cubicos por hora a 1RPM}} \quad [5.4]$$

Donde:

Q_{mc} : Capacidad volumétrica del equipo (ft³/h)

Figura 7

Valores para capacidad por hora

Carga de Artesa	Diámetro del Helicoidal (Pulgadas)	Capacidad Pies Cúbicos por Hora (Paso Completo)		Máx. RPM
		A 1 RPM	A Máx. RPM	
15% 	4	0.21	15	72
	6	0.75	45	60
	9	2.72	150	55
	10	3.80	210	55
	12	6.40	325	50
	14	10.40	520	50
	16	15.60	700	45
	18	22.50	1010	45
	20	31.20	1250	40
	24	54.60	2180	40
	30	108.00	3780	35

Nota: Se seleccionan los valores con carga de artesa 15%, para un diámetro de 4 pulgadas.

Recuperado de: Sprocket, M. (2013). *ISSUU*. Tomado de <https://issuu.com/msg-mexico/stacks/e99bf2ef00374dec9ec88a9f950e23ee>

Una vez determinada la velocidad (V) y las revoluciones (N), se realiza el cálculo del paso del tornillo (P), que viene determinado por la siguiente ecuación.

$$V = \frac{P * N}{4} \quad [5.5]$$

Se determina la capacidad equivalente para el transporte (C_{eq}), con la ecuación [5.6]. Los valores de los factores para los cálculos de la capacidad fueron tomados del catálogo 4000 sección H. (Sprocket et al., 2013).

$$C_{eq} = Q_{mc} * C_{F1} * C_{F2} * C_{F3} \quad [5.6]$$

Donde:

C_{F1} : Factor de relación del paso del helicoidal.

C_{F2} : Factor al tipo de helicoidal

C_{F3} : Factor de uso de paletas mezcladoras.

Cálculo de la potencia para el desplazamiento horizontal del sistema de transporte (P_H). El coeficiente de resistencia del material transportado se toma de acuerdo con el tipo de material, encontrado en el documento de cálculo de transportadores. (Rodríguez, 2018)

$$P_H = C_0 * \frac{\dot{m}_{mc} * L}{367} \quad [5.7]$$

Donde:

\dot{m}_{mc} : Flujo másico de material [t/h].

C_0 : Coeficiente de resistencia del material transportado

L : Longitud del transportador [m].

El cálculo de la potencia de accionamiento del tornillo en vacío (P_N), se realiza con la siguiente expresión.

$$P_N = \frac{D * L}{20} \quad [5.8]$$

La potencia total para el sistema de transporte se realiza con la sumatoria de la potencia de desplazamiento horizontal (P_H) y potencia de accionamiento del tornillo en vacío (P_N).

$$P_T = P_H + P_N \quad [5.9]$$

El diámetro de la hélice (D_H), debe ser ½” más pequeña que el diámetro del canalón. (D_K)
(Para efectos de cálculo se utilizaron los diámetros en metros)

$$D_H = D_K - 0.0127 \quad [5.10]$$

6. DISEÑO EN DETALLE EQUIPO CARBONIZADOR.

6.1 DETERMINACIÓN DE SUBSISTEMAS Y COMPONENTES DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.

Tabla 4

Subsistemas del equipo de carbonización.

SUBSISTEMA	COMPONENTES	CARACTERISTICAS
Cámara de ventilación	Motor - Ventilador	Administrar flujo de aire constante, para el proceso de carbonización.
	Estructura de la cámara	Estructura en acero inoxidable AISI 304, en forma de cono truncado, donde se aloja el ventilador.
Cámara de carbonizado	Estructura cilíndrica	Lugar donde se carbonizan los residuos orgánicos, se divide en dos secciones las cuales se unen con el fin de alojar la rejilla de ventilación, fabricado en acero inoxidable AISI 304.
	Rejilla de ventilación	Es la encargada de sostener los residuos orgánicos durante el proceso de carbonización. Posee forma circular y se asegura en medio de las uniones bridadas.
	Resistencias térmicas	Encargadas de suministrar el calor necesario, para el proceso. Se encuentran en el interior de la cámara de carbonizado, ubicadas debajo de la rejilla.
Cámara de salida	Estructura codo	Esta estructura ayuda a orientar el material que sale, de la cámara de carbonizado.

6.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

Se tiene un lecho de partículas dentro de un ducto cilíndrico vertical, por donde pasa aire de forma ascendente, el cual incrementa su temperatura a medida que pasa por unas resistencias térmicas ubicadas dentro de la cámara de carbonización. El equipo encargado de proporcionar el flujo másico de aire es un ventilador de 5 aspas, ubicado en la parte inferior del equipo, la velocidad de aire que se maneja en el proceso es la encargada de fluidizar y contribuir al secado de las partículas de residuos orgánicos, además de expulsar el material ya carbonizado fuera del equipo carbonizador. Existe una rejilla que es la encargada de sostener el material durante el proceso de carbonizado y las resistencias térmicas son las encargadas de suministrar el calor necesario para lograr el secado y posterior carbonizado de los residuos, manteniendo una temperatura de trabajo de 300°C.

6.3 CALCULOS DEL REACTOR.

6.3.1 Selección del ventilador y controlador de velocidad.

Uno de los principales elementos para el diseño y construcción del equipo de carbonización es el ventilador, cuya función es contribuir a la pérdida de humedad de los residuos y, por otra parte, expulsar el material del reactor una vez se complete la carbonización.

Se seleccionó un ventilador de 5 aspas y 33[cm] de diámetro, que cuenta con un motor de escobillas de corriente continua a 12 voltios. Dichos motores permiten la variación de velocidad con el cambio de voltaje, con lo cual se puede garantizar la conexión de un dispositivo de regulación (Dimmer), que es capaz de regular y controlar el suministro de aire ideal, para el proceso de carbonización de los residuos orgánicos.

Se utilizó un controlador eléctrico Dimmer, encargado de regular el voltaje del motor eléctrico, con esto se logra la variación de la velocidad del ventilador y por consiguiente de la

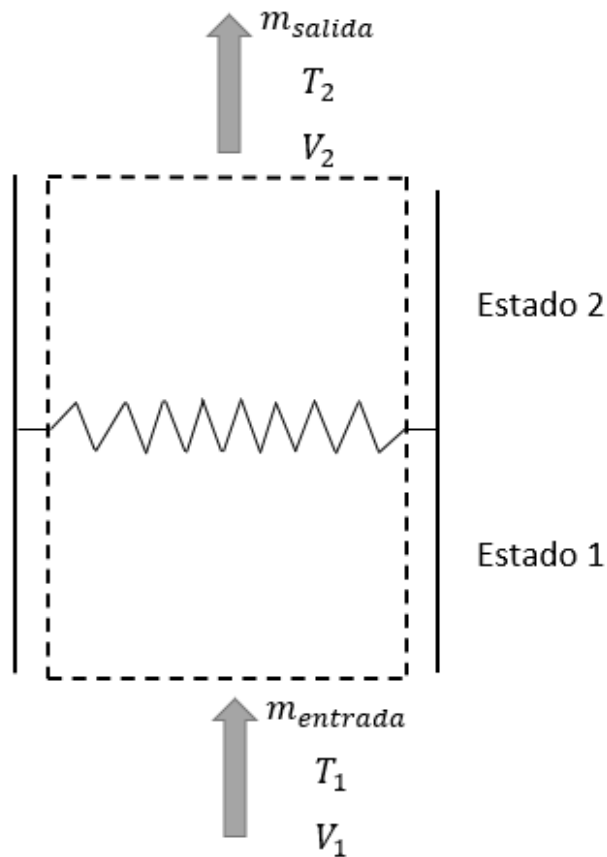
velocidad y flujo másico de aire que ingresa al equipo. Para fines de conexión a la red eléctrica de 120 voltios, el motor se conecta a una fuente rectificadora de 12 voltios.

6.3.2 Definición de parámetros de cálculo.

Inicialmente, se analiza el comportamiento del aire dentro del reactor antes y después de pasar por las resistencias, se determina un volumen de control y de esta forma se establecen dos estados como se muestra en la figura 8.

Figura 8

Volumen de control en cámara de carbonizado.



Nota. Tomado de los autores

6.3.3 Cálculos termodinámicos para la cámara de carbonizado.**6.3.3.1 Cálculo del flujo másico de aire para la cámara de carbonización (\dot{m}_a).**

Luego de analizar los dos estados, se realiza un balance de masa y se encuentra que el flujo másico se mantiene constante (\dot{m}), dadas las condiciones geométricas de la cámara; mientras que la densidad y la temperatura varían.

$$\dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} = \Delta \dot{m} \quad [6.1]$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad [6.2]$$

El cálculo del flujo másico para el estado 1, está dado por la siguiente ecuación, donde la densidad depende de la temperatura del aire antes de las resistencias (T_1).

$$\dot{m}_1 = \rho_1 * V_1 * Ac \quad [6.3]$$

El cálculo del flujo másico para el estado 2, está dado por la siguiente ecuación, donde la densidad depende de la temperatura del aire después de las resistencias (T_2).

$$\dot{m}_2 = \rho_2 * V_2 * Ac \quad [6.4]$$

6.3.3.2 Cálculo del área transversal de la cámara de carbonización (Ac).

El cálculo del área transversal nominal en la dirección de flujo de la cámara de carbonizado, está dado por la siguiente ecuación, puesto que la geometría es cilíndrica. (se tiene en cuenta el diámetro de la cámara de carbonización).

$$Ac = \frac{\pi * D_1^2}{4} \quad [6.5]$$

6.3.3.3 Calculo de las velocidades del aire antes y después de las resistencias (V_1, V_2)

La velocidad (V_1) hace referencia a la suministrada por el ventilador antes de pasar por las resistencias, esta velocidad es la requerida para que los residuos orgánicos sean expulsados del reactor una vez completen el proceso de carbonización. Su cálculo se determinó de forma experimental, utilizando un anemómetro portátil e interactuando con residuos orgánicos húmedos y carbonizados, como se muestra en el Apéndice 3. Una vez se determina esta velocidad, quedan definidas todas las variables para la solución de las ecuaciones del apartado 6.2.3, quedando así definida la velocidad después de las resistencias (V_2).

Ilustración 4

Anemómetro portátil.



Nota. Tomado de los autores

6.3.3.4 Calculo calor termodinámico (Q_{term}).

El calor termodinámico se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) todo esto debido a una diferencia de temperaturas (Cengel, 2015).

$$Q_{term} = \dot{m}_a * C_p * (T_2 - T_1) \quad [6.6]$$

6.3.4 Cálculos transferencia de calor para la cámara de carbonizado.

Con el análisis de transferencia de calor de la cámara de carbonizado, se busca determinar el calor de pérdidas, los coeficientes de transferencia de calor (interna y externa), espesor del aislante, temperaturas y dimensionamiento completo del reactor.

6.3.4.1 Calculo convección interna forzada.

En este caso se considera la convección interna forzada como herramienta de cálculo del coeficiente de transferencia de calor interno, puesto que, el funcionamiento de este proyecto consta de un fluido forzado que atraviesa un ducto, por la acción de un ventilador. Los cálculos de la convección forzada fueron realizados empleando las ecuaciones y tablas de propiedades del libro de transferencia de calor (Cengel, 2011).

La temperatura de propiedades (T_b) se determinó con la ecuación [6.7]. Con esta temperatura se determinan el número de Prandtl (P_r), viscosidad dinámica (μ), conductividad térmica del aire (k_{air}), densidad del aire (ρ), dichos valores se encuentran consignados en la Tabla 7.

$$T_b = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad [6.7]$$

Cálculo de la velocidad promedio, este valor se obtiene del promedio de los resultados de las velocidades del aire antes y después de las resistencias (V_1 , V_2), calculadas en el apartado

6.3.3.3.

$$V_{prom} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad [6.8]$$

Cálculo de número de Reynolds (R_{eD}) para el flujo en un tubo circular. Si el resultado es mayor a 10000, significa que el flujo es turbulento, totalmente desarrollado.

$$R_{eD} = \frac{\rho_{@Tb} * V_{prom} * D}{\mu_{@Tb}} \quad [6.9]$$

El factor de fricción (f) en flujo turbulento para ductos lisos está dado por la ecuación [6.10]

$$f = (0,79 * \ln(R_{eD}) - 1,64)^{-2} \quad [6.10]$$

Para el cálculo del Nusselt se utiliza la ecuación de Gnielinski, que se toma del libro de transferencia de calor (Cengel, 2011). Dado que brinda mayor exactitud en el resultado.

$$Nu_{ci} = \frac{\frac{f}{8} * (R_{eD} - 1000) * Pr_{@Tb}}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} * (Pr_{@Tb})^{\frac{2}{3}} - 1} \quad [6.11]$$

Una vez calculadas todas las variables es posible hallar el valor del coeficiente de transferencia de calor interno del reactor, despejando h_{int} de la ecuación [6.12]

$$Nu_{ci} = \frac{h_{int} * D_1}{k_{air}} \quad [6.12]$$

6.3.4.2 Cálculo de convección natural externa.

Todos los cálculos de la convección natural externa fueron realizados empleando las ecuaciones y tablas de propiedades del libro de transferencia de calor (Cengel, 2011).

Se calcula la temperatura de película (T_f), a partir de la temperatura de superficie (T_s) del cilindro, cuyo valor se estableció pensando en la seguridad de los operadores a la hora de interactuar con el equipo, en cuanto a la temperatura ambiente (T_{amb}), se estableció la correspondiente a la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

$$T_f = \frac{T_s - T_{amb}}{2} \quad [6.13]$$

El coeficiente de expansión volumétrica (β) hace referencia a la variación de la densidad del fluido, teniendo en cuenta la temperatura a una presión constante y se calcula con la ecuación [6.14]

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad [6.14]$$

Para el cálculo del número de Grashof se tiene en cuenta la longitud característica de la cámara de carbonizado y la viscosidad cinemática a la temperatura de película.

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_{amb}) * Lc^3}{\nu^2} \quad [6.15]$$

El cálculo del número de Rayleigh se obtiene a partir de la ecuación [6.16]

$$Ra_L = \frac{Gr_L}{Pr_{@T_f}} \quad [6.16]$$

Para el cálculo del número de Nusselt, es necesario evaluar la configuración geométrica del reactor, en este caso al ser un cilindro vertical es posible tratarlo como una placa vertical, siempre y cuando se cumpla la relación $D_{cond} \geq Dc$. Donde " D_{cond} " es definida con la ecuación [6.17]

$$D_{cond} = \frac{35 * Lc}{Gr_L^{1/4}} \quad [6.17]$$

Puesto que la relación $D_{cond} \geq Dc$ no se cumple, se aplica el siguiente factor de corrección.

$$F = 1.3 * \left[\frac{Lc}{Dc * Gr_D} \right]^{\frac{1}{4}} + 1 \quad [6.18]$$

A continuación, se muestra la ecuación de cálculo del número de Grashof necesario para calcular el factor de corrección (F)

$$Gr_D = \frac{g * \beta * (T3 - Tamb) * Ld^3}{\nu^2} \quad [6.19]$$

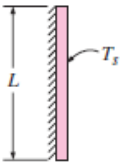
Como se mencionó anteriormente, el análisis del reactor se asume como una placa vertical, para el cálculo del número de Nusselt, se utiliza la correlación expuesta en el libro de transferencia de calor (Cengel, 2011), Figura 9. Para poder utilizar la correlación se debe multiplicar el valor del Nusselt por el factor de corrección.

$$Nu_{cn} = \left[0.825 + \frac{0.387 * Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr_{@Tf}} \right)^{9/16} \right]^{2/7}} \right]^2 * F \quad [6.20]$$

Figura 9

Correlaciones para el cálculo del número de Nusselt.

Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies

Configuración geométrica	Longitud característica L_c	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	L	$10^4 - 10^9$	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19)
		$10^{10} - 10^{13}$	$Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20)
		Todo el intervalo	$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{2/7}} \right\}^2$ (9-21) (compleja pero más exacta)

Nota. Correlación (9-21) utilizada para el cálculo de convección natural. Tomado de Cengel, Y.

A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones/ (4a. ed.)*. Mexico DF: McGraw Hill.

Ecuación para determinación del coeficiente de transferencia de calor externo.

$$Nu_{cn} = \frac{h_{ext} * Dc}{K} \quad [6.21]$$

Ecuación para el cálculo del calor de pérdidas del reactor.

$$Q_{per} = A_s * h_{ext} * (T_{amb} - T_s) \quad [6.22]$$

Cálculo del área superficial.

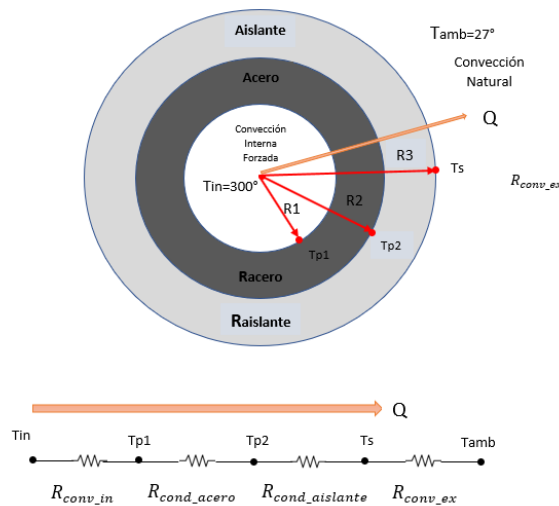
$$A_s = \pi * Dc * Lc \quad [6.23]$$

6.3.4.3 Malla de resistencias.

El análisis de la transferencia de calor se realiza con una malla de resistencias acordes a la configuración geométrica (cilíndrica) del reactor. Para este caso el efecto de la radiación es muy pequeño, por lo tanto, su efecto será despreciado y se asume la mayor transferencia de calor al ambiente por convección.

Figura 10

Malla de resistencias térmicas.



Nota. Tomado de los autores.

Resistencia de convección interna.

$$R_{\text{convi}} = \frac{1}{h_{\text{int}} * A1} \quad [6.24]$$

Resistencia de conducción del acero.

$$R_{\text{condac}} = \frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 * \pi * K_{\text{ac}} * L_c} \quad [6.25]$$

Resistencia de conducción del aislante.

$$R_{\text{condais}} = \frac{\ln\left(\frac{rS}{r2}\right)}{2 * \pi * K_{\text{ais}} * L_c} \quad [6.26]$$

Resistencia de convección externa.

$$R_{\text{convext}} = \frac{1}{h_{\text{ext}} * A2} \quad [6.27]$$

Resistencia total.

$$R_T = R_{\text{convi}} + R_{\text{condac}} + R_{\text{condais}} + R_{\text{convamb}} \quad [6.28]$$

6.3.4.4 Solución sistema de ecuaciones.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor externo, calor de pérdidas, espesor del aislante, donde se establecen temperaturas, radios, longitudes y el dimensionamiento completo del reactor. Se resuelve un sistema basado en las ecuaciones planteadas en los ítems 6.2.4.1(cálculo

convección interna forzada), 6.2.4.2 (cálculo de convección natural externa) y 6.2.4.3 (Malla de resistencias de la cámara de carbonizado).

Para determinar el calor de pérdidas, se supone un porcentaje de pérdidas que no debe superar el 10% del calor de termodinámica (Q_{term}), como se muestra en la ecuación [6.29]

$$Q_{per} = Q_{term} * \%perdida \quad [6.29]$$

Luego de tener un valor inicial de calor perdido, se supone un valor de coeficiente de transferencia de calor externo inicial (h_{ext}), y se despeja el valor de diámetro [Dc] de la ecuación [6.31]

$$Q_{per} = A_s * h_{ext} * (T_{amb} - T_s) \quad [6.30]$$

$$Q_{per} = (\pi * Dc * Lc) * h_{ext} * (T_{amb} - T_s) \quad [6.31]$$

Una vez obtenido el diámetro (Dc), este se reemplaza en el sistema de ecuaciones del programa EES, con el fin de obtener un coeficiente de convección externo igual al supuesto inicialmente, en caso de que los valores no coincidan, se continúa la iteración cuantas veces sea necesario hasta que los coeficientes sean iguales. Los valores seleccionados tras la iteración se encuentran en la Tabla 8. Con la ecuación [6.32] se determina el calor total (Q_{TOT}) que deben suministrar las resistencias térmicas para el proceso, que es la suma entre el calor termodinámico (Q_{term}) y el calor de pérdidas (Q_{per})

$$Q_{TOT} = Q_{term} + Q_{per} \quad [6.32]$$

7. RESULTADOS TEORICOS.**7.1 PROPIEDADES DEL LECHO Y DE LOS RESIDUOS ORGANICOS.****Tabla 5***Resultados propiedades del lecho y de los residuos orgánicos.*

PARAMETRO	UNIDAD	SIGLA	RESULTADO
Flujo masico de residuos orgánicos.	Kg/h	\dot{m}_r	1
Porcentaje de humedad de los residuos orgánicos.	%	%H	83
Densidad de las partículas.	Kg/m^3	ρ_p	988,6
Densidad aparente del lecho.	Kg/m^3	ρ_b	566,072
Densidad del gas a la T2.	Kg/m^3	ρ_g	0,6155
Viscosidad dinámica del gas.	Kg/m^3	μ_g	$2,98 \times 10^{-5}$
Diámetro de partícula.	m	D_p	0.01
Esfericidad de la partícula.	Adimensional	ϕ	1
Fracción de vacío.	Adimensional	ε	0.4272
Fracción de vacío mínima de fluidización.	Adimensional	ε_{mf}	0.3181
Velocidad mínima de fluidización.	m/s	U_{mf}	1.56
Velocidad de arrastre.	m/s	U_T	2.89

Nota. Tomado de los autores.

7.2 RESULTADOS PARA EL ANÁLISIS DE TERMODINÁMICA

Tabla 6

Resultados análisis de termodinámica.

PARAMETRO	UNIDADES	NOMENCLATURA	RESULTADO
Temperatura del aire antes de las resistencias.	°C	T_1	27
Temperatura del aire después de las resistencias.	°C	T_2	300
Velocidad del aire antes de las resistencias.	m/s	V_1	2,6
Velocidad del aire después de las resistencias.	m/s	V_2	4,968
Densidad del aire a temperatura 1.	Kg/m^3	ρ_1	1,176
Densidad del aire a temperatura 2.	Kg/m^3	ρ_2	0,6155
Cp del aire.	$KJ/Kg.K$	Cp	1.007
Flujo masico de aire del lecho.	Kg/s	\dot{m}_a	0.09607
Calor termodinámico.	KW	Q_{term}	26,41
Calor de resistencia térmica.	KW	Q_{TOT}	26,44

Nota. Tomado de los autores

7.3 RESULTADOS ANALISIS TRANSFERENCIA DE CALOR.

Tabla 7

Resultados convección interna forzada.

PARAMETRO	UNIDADES	NOMENCLATURA	RESULTADO
Temperatura de propiedades.	°C	T_1	163,5
Velocidad promedio.	m/s	V_{prom}	3,784
Densidad del aire a la temperatura de propiedades.	Kg/m^3	$\rho_{@Tb}$	0,8085
Factor de fricción.	Adimensional	f	$2,47 \times 10^{-2}$
Conductividad del aire a temperatura de propiedades.	$W/m.K$	k_{air}	$3,535 \times 10^{-2}$
Prandatl a temperatura de propiedades.	Adimensional	$Pr_{@Tb}$	0.70
Viscosidad dinámica a temperatura de propiedades.	$Kg/m.s$	$\mu_{@Tb}$	$2,435 \times 10^{-5}$
Reynolds convección interna.	Adimensional	Re_D	25131
Numero de Nusselt. convección interna forzada.	Adimensional	Nu_{ci}	93,74
Coefficiente de convección interna.	$W/m^2.K$	h_{int}	16,57

Fuente: los autores

Tabla 8

Resultados convección natural.

PARAMETRO	UNIDADES	NOMENCLATURA	RESULTADO
Temperatura de película.	°C	T_f	34
Temperatura de superficie.	°C	T_s	41
Temperatura ambiente.	°C	T_{amb}	27
Coefficiente de expansión volumétrica.	1/K	β	3,256X10 ⁻³
Número de Grashof para cálculo de Nusselt.	Adimensional	Gr_L	1,06X10 ⁸
Número de Grashof para cálculo factor de corrección.	Adimensional	Gr_D	3.884X10 ⁷
Numero de Rayleigh.	Adimensional	Ra_L	7.49X10 ⁷
Numero de Nusselt.	Adimensional	Nu_{cn}	57
Viscosidad cinemática del aire a temperatura de película.	m^2/K	ν	1.643X10 ⁻⁵
Prandtl a temperatura de película.	Adimensional	$Pr_{@T_f}$	0,7063
Factor de corrección.	Adimensional	F	1,018
Longitud de la cámara de carbonizado.	m	L_C	0,4
Diámetro para condición.	m	D_{cond}	0,138
Área superficial de la Cámara de carbonizado.	m^2	A_s	0,3596
Gravedad.	m/s^2	g	9,81
Coefficiente de transferencia de calor externo.	$W/m^2.K$	h_{ext}	5.3
Calor de perdidas.	W	Q_{per}	26.67

Nota. Tomado de los autores

Tabla 9

Resultados malla de resistencias.

PARAMETRO	UNIDADES	NOMENCLATURA	RESULTADO
Conductividad térmica del acero AISI 304.	$W/m.K$	K_{ac}	14,9
Conductividad térmica aislante, (Thermolon).	$W/m.K$	K_{ais}	0,0484
Longitud cámara de carbonización.	m	L_C	0,4
Diámetro interno del reactor.	m	D_1	0.2
Espesor del acero.	mm	e_{ac}	1
Espesor del aislante.	m	e_{ais}	0,041
Temperatura interna.	$^{\circ}C$	T_{int}	300
Temperatura en la pared interna del acero.	$^{\circ}C$	T_{p1}	281.91
Temperatura en la pared externa del acero.	$^{\circ}C$	T_{p2}	281.89
Temperatura de superficie en el aislante.	$^{\circ}C$	T_s	41
Temperatura ambiente.	$^{\circ}C$	T_{amb}	27
Resistencia térmica por convección interna.	$^{\circ}C/W$	R_{conv_in}	0.2401
Resistencia térmica por conducción del acero.	$^{\circ}C/W$	R_{cond_acero}	0.0002657
Resistencia térmica por conducción del aislante.	$^{\circ}C/W$	$R_{cond_aislante}$	2.864
Resistencia térmica por convección externa.	$^{\circ}C/W$	R_{conv_amb}	0.5187
Resistencia térmica total.	$^{\circ}C/W$	R_{Tot}	3.623

Nota. Tomado de los autores.

7.4 RESULTADOS CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO CARBONIZADOR.

Las propiedades del acero AISI 304, fueron tomadas del Software CAD SolidWorks.

Tabla 10

Propiedades del acero AISI 304.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Modulo elástico	190000	N/mm^2
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Modulo cortante	75000	N/mm^2
Densidad de masa	8000	Kg/m^3
Límite de tracción	517.017	N/mm^2
Limite elástico	206.807	N/mm^2
Coefficiente de expansión térmica	1.8e-05	/K
Conductividad Térmica	16	$W/m.K$
Calor específico	500	$J/Kg.K$

Nota. Tomado de los autores

Tabla 11

Componentes equipo de carbonización.

COMPONENTE	CARACTERÍSTICA
Ventilador eléctrico con motor de escobillas.	Potencia del motor: 144 [W] Número de aspas: 5 Diámetro: 31 [cm]
Transformador eléctrico	Potencia del transformador: 250 [W] Voltaje de entrada: 120 [VAC] Voltaje de salida: 14 [VCC]
Controlador de velocidad del ventilador	Dimmer a 110 [VAC]
Resistencia térmica	Potencia resistencia: 725 [W]
Malla que soporta los residuos	Calibre: 0.8 [mm] Separación huecos: 7[mm]

Nota. Tomado de los autores

7.5 RESULTADOS DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE ENTRE EQUIPOS

Tabla 12

Resultados diseño del sistema de transporte.

PARAMETRO	UNIDADES	SIMBOLO	RESULTADO
Capacidad volumétrica del equipo	m^3/h	Q_{mc}	0,00223
Flujo másico de material transportado	Kg/h	\dot{m}_{mc}	1
Densidad de material transportado	Kg/m^3	ρ_{mc}	448,5
Velocidad de transporte	m/s	V	$1,97 \times 10^{-4}$
Área de relleno del canalón	m^2	S	$3,1 \times 10^{-3}$
Diámetro de la hélice	m	D_H	0.087
Diámetro del canalón	m	D_k	0.1
Diámetro del eje	cm	D_E	3.81
Coefficiente de relleno	Adimensional	λ	0,4
Coefficiente de disminución de flujo	Adimensional	i	1
Factor de relación del paso del helicoidal	Adimensional	C_{F1}	1
Factor al tipo de helicoidal	Adimensional	C_{F2}	1
Factor de uso de paletas mezcladoras	Adimensional	C_{F3}	1
Capacidad pies cúbicos por hora a 1r.p.m	$r.p.m$	-	0,21
Número de revoluciones	$r.p.m$	N	0,38
Paso del tornillo	cm	P	3,1
Coefficiente de resistencia del material	Adimensional	C_0	1,6
Longitud del transportador	m	L	0,7
Potencia para el desplazamiento horizontal	KW	P_H	$3,05 \times 10^{-6}$
Potencia de accionamiento del tornillo en vacío	KW	P_N	$3,5 \times 10^{-3}$
Potencia total sistema de transporte	KW	P_T	$3,5 \times 10^{-3}$

Nota. Tomado de los autores

8.RESULTADOS PRACTICOS.

8.1 MODELADO EN SOFTWARE CAD

Con la información que se obtuvo de los resultados teóricos, se diseñó el equipo de carbonización, en el programa SolidWorks. En el **Apéndice 4** se encuentra consignados el modelado y los planos del equipo de carbonización y en el **Apéndice 5** el modelado y planos del sistema de transporte. Posterior al diseño se inicia con la construcción y puesta en marcha del equipo de carbonización, para obtener los resultados funcionales.

8.2 CONSTRUCCION DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.

El proceso de construcción del equipo consto de dos partes, la primera fue la fabricación de la estructura del equipo, el carbonizador se construyó a partir de una lámina de acero inoxidable AISI 304 de 1/8", mediante el proceso de corte, rolado y soldadura; por otra parte, se elaboró el bastidor utilizando ángulo de acero de 3/4", mediante el proceso de corte, doblado y soldadura, el resultado se puede apreciar en la **ilustración 5**. La segunda parte fue la elaboración de los circuitos eléctricos para el funcionamiento del ventilador y las resistencias térmicas, y sistemas de control de los equipos.

El sistema de control de temperatura del equipo funciona a 220 [VAC], cuenta con un Breaker principal EasyPact EZC100B de 50 [A], un contactor ABB A95-30, un breaker de seguridad Legrand 0640 61, un selector, un controlador de temperatura Autonics TCN4S-24R y una termocupla tipo K. Los planos eléctricos de conexión se encuentran consignados en el **apéndice 6**.

El sistema de control de velocidad del ventilador, opera a 110 [VAC], cuenta con un transformador reductor a 12 [VCC], para accionamiento del ventilador, un rectificador de onda

completa QBPC3506 y un Dimmer para regular el voltaje. Los planos eléctricos de conexión se encuentran consignados en el **apéndice 7**.

8.3 PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.

Tabla 13

Procedimiento operación equipo de carbonización.

PASO	DESCIPCION	RECOMENDACIONES
1. Alistar materiales a utilizar y elementos de protección personal.	- Utilice bata manga larga, pantalón largo y zapatos cerrados durante la operación del equipo. - Prepare los residuos orgánicos, que desea carbonizar.	-Los residuos orgánicos no deben superar un tamaño de 1 [cm ²]
2.Verificar conexión eléctrica del equipo.	-Asegúrese que el cable de conexión para el calentamiento de las resistencias se encuentre conectado a la red de 220 [VAC] -Asegúrese que el cable de conexión del ventilador se encuentre conectado a la red de 110 [VAC]	-Antes de conectar el equipo, asegúrese que el Breaker principal, el Breaker de seguridad y el selector de las resistencias se encuentren en posición apagado. -Asegúrese que el selector del ventilador se encuentre en posición “OFF” - Si tiene dudas acerca del funcionamiento del equipo, revise los planos eléctricos del sistema de calentamiento y del sistema de ventilación (Apéndice 6 y 7)
3. Adición de los residuos orgánicos al equipo.	- Introduzca el lote de los residuos orgánicos que desea carbonizar, por la “cámara de salida” (cámara en forma de codo).	- Dado que la tasa de producción del equipo es de 1 [Kg/h]. Cada lote NO debe superar los 250 [gr] de material
	-Primero debe verificar que el breaker de control se encuentre encendido en la posición “ON”	

PASO	DESCIPCION	RECOMENDACIONES
4. Programación del controlador de temperatura.	<p>-Verifique que el breaker principal se encuentre apagado, en posición “OFF”</p> <p>-Ubique el selector de las resistencias de tal manera que se encuentre en posición encendido “ON”.</p> <p>-Configure los parámetros de trabajo y Utilice como guía el manual de operación del controlador de temperatura.</p> <p>Una vez establezca los parámetros del controlador, ubique el selector en la posición OFF, y des energizar breaker de control</p>	<p>- La temperatura máxima de trabajo del equipo es de 300°C.</p> <p>-La termocupla utilizada es tipo K</p>
5. Energización del equipo.	<p>-Primero debe accionar que el breaker de control (posición “ON”).</p> <p>-Accione el Breaker principal, (posición de encendido).</p> <p>-Accione el selector del sistema de calentamiento de las resistencias (posición “ON”)</p> <p>-Mantenga el equipo en funcionamiento hasta que el proceso de carbonización finalice.</p> <p>-Para encender el ventilador accione el selector del equipo y con el dimmer regule la velocidad del aire.</p>	<p>Verifique que todos los componentes inicien su funcionamiento</p>
6. Desenergización del equipo y 5’S.	<p>-Una vez finalice la carbonización del material, ubique el selector del sistema de calentamiento en la posición apagado “OFF”</p> <p>-Ubique el Breaker principal en la posición “OFF”</p> <p>- Ubique el Breaker de control en posición “OFF”</p> <p>- Ubique el selector del ventilador en la posición apagado “OFF”</p> <p>- Con un paño, limpie cualquier residuo que haya quedado dentro del reactor</p>	<p>- Realice la limpieza después que el equipo este totalmente frio.</p>

Nota. Tomada de los autores.

8.4 COSTOS ECONOMICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.**Tabla 14**

Materiales utilizados para la construcción del equipo carbonizador.

COMPONENTE	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Lamina acero inoxidable AISI 304 calibre 18	1 lamina	\$ 860.000
Angulo de acero de 3/4"	6 m	\$ 24.700
Malla de acero	1 m	\$11.000
Aislante térmico Thermolón espesor 4 cm	1.8 m	\$30.500
Abrazaderas plásticas de 55 cm	16 UN	\$24.000
Ventilador de escobillas 12 VAC	1 UN	\$60.000
Transformador reductor a 12 VAC	1 UN	\$50.000
Fuente rectificadora de onda completa QBPC3506 con disipador de calor	1 UN	\$15.000
Dimmer	1 UN	\$ 20.000
Breaker principal a 220 V EasyPact EZC100B	1 UN	\$ 270.000
Breaker de seguridad Legrand 064 61	1 UN	\$ 50.000
Contactador ABB A95-30	1 UN	\$450.000
Controlador temperatura Autonics TCN4S24R	1 UN	\$350.000
Termocupla tipo K	1 UN	\$16.000
Resistencias de ferrónquel	3 UN	\$130.000
Cable eléctrico calibre 10	3 m	\$ 27.000
Cable eléctrico calibre 14	1 m	\$ 7.000
Cable eléctrico calibre 18	3 m	\$ 3.500
Costo total de los materiales		COP\$ 2.398.700

Nota. Tomado de los autores

8.5 RESULTADOS FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE CARBONIZACIÓN.

Una vez finalizada la construcción e instalación de los quipos, necesarios para el calentamiento y ventilación del equipo, se inicia con la puesta en marcha del equipo. Para las pruebas de funcionamiento se toman 250 [gr] de residuos orgánicos cuyo tamaño no supera 1 [cm²], estos se introducen en el equipo de carbonización y se inicia con la operación del equipo.

Ilustración 5

Equipo de carbonización construido.



Nota. Equipo totalmente armado tanto estructural como eléctricamente, Tomado de los autores.

8.5.1 Primera prueba de funcionamiento.

En la primera prueba se toman los 250 gr de material y se ubican dentro del carbonizador, se procede a encender las resistencias con su respectivo sistema de control, al tiempo que se enciende el ventilador y se regula la velocidad con ayuda del dimmer y el anemómetro,

8.5.2 Segunda prueba de funcionamiento.

Para esta prueba se introducen 250 [gr] de residuos orgánicos, se encienden primero las resistencias y su respectivo sistema de control y se permite que el sistema alcance una temperatura superior a los 100 [°C], luego de llegar a dicha temperatura se enciende el ventilador a la velocidad de arrastre (debido a la precisión del anemómetro la medición de la velocidad del aire fluctuaba entre los 2.8 y 3.2 [m/s]), esto hace que la temperatura baje significativamente, en cuanto a las partículas, algunas de ellas se elevan en forma circular sin salir del reactor y otras de ellas salen expulsadas del reactor, y se decide detener el ventilador por primera vez.

Se encuentra que de las partículas que salen expulsadas del reactor, algunas se encuentran carbonizadas mientras que otras solo se muestran secas, se continúa con la prueba. La prueba tuvo una duración aproximada de 15 minutos, tiempo durante el cual, se enciende el ventilador 2 veces, la primera fue la mencionada anteriormente y la segunda se realizó justo antes de finalizar la prueba, en esta oportunidad salieron proyectadas la mayoría de las partículas que aún quedaban dentro del equipo, encontrando la mayoría de ellas carbonizadas, pero aun con presencia de residuos que solo se encuentran secos. A continuación, se muestran los resultados de la prueba.

Tabla 15

Resultados obtenidos en prueba 2 de funcionamiento del equipo.

PARAMETRO	NOMENCLATURA	UNIDAD	VALOR
Masa de residuos húmedos (antes de la carbonización)	m_H	gr	250
Masa de los residuos carbonizados	m_c	gr	20
Porcentaje de humedad de los residuos.	%H	%	92
Tiempo de carbonización de la muestra	T_C	min	23

Nota. Resultados prueba de carbonización de 250 [gr] de residuos. Tomado de los autores.

Estos resultados muestran que la reducción de volumen de material es significativa, ya que representa la pérdida de casi 8 veces la masa inicial, esto debido a la gran pérdida de humedad de los residuos con el uso de este equipo de carbonización

Ilustración 7

Muestra antes y después de la carbonización.



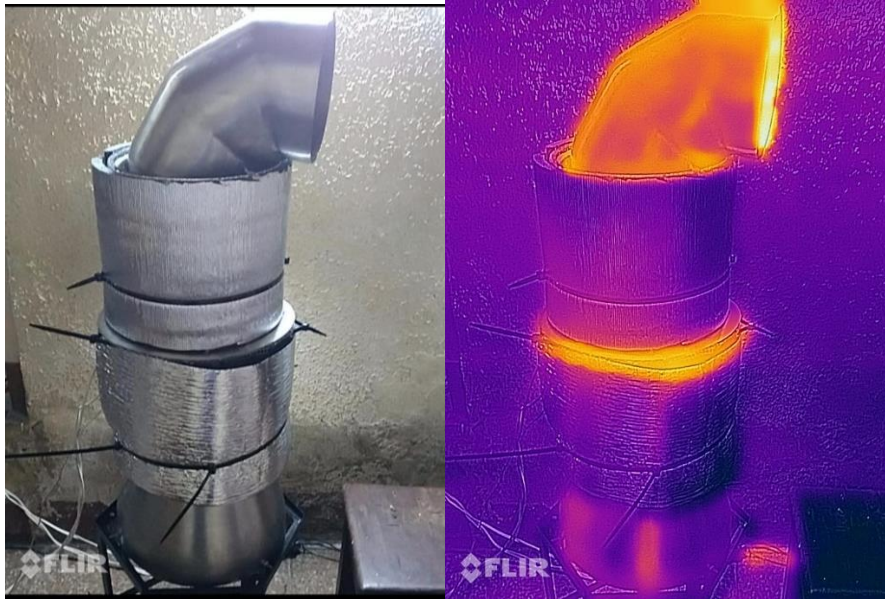
Nota. Muestra de 250 [gr] antes y después de ser carbonizada. Tomado de los autores

Tras la carbonización se observa que a nivel general el equipo logra la carbonización de los residuos orgánicos y que los equipos de control de temperatura y velocidad del ventilador permiten el ajuste de parámetros necesarios para el proceso. Acordes al dimensionamiento que se hizo del equipo se puede ver en la ilustración 8, tomada con cámara termográfica, que el aislante térmico cumple con su función, minimizando la pérdida de calor en el proceso, y así mismo se observa que el ventilador no está expuesto a gran temperatura, por otra parte, la cámara de salida tiene las medidas y forma adecuada para que el material pueda salir del equipo. En cuanto a la rata de producción de 1 Kg/h, se analiza basados en la prueba 2 que se necesitaría cerca de 1 hora y 12

minutos para completar la carbonización de 1 Kg de residuos orgánicos, cabe resaltar que las resistencias gastan cerca de 4 minutos para iniciar su proceso de estabilización en el calentamiento.

Ilustración 8

Fotografía termográfica del equipo en funcionamiento.



Nota. Fotografía tomada con cámara termográfica para análisis del comportamiento y temperatura del equipo durante la operación. Tomada de los autores.

9. CONCLUSIONES.

- Durante el desarrollo de este proyecto se realizó el diseño y la construcción de un equipo a escala de laboratorio, para la transformación de residuos orgánicos, el cual es capaz de procesar aproximadamente 1 [Kg/h] de residuos orgánicos, bajo ciertas condiciones como un tamaño de partícula inferior a 1[cm²], ingreso por lotes al equipo de carbonización, en total 4 lotes de 250 [gr] cada uno, por hora.
- Se garantizó mediante el adecuado diseño y dimensionamiento y selección de materiales, la efectividad de los componentes estructurales tales como los cilindros que componen el cuerpo del reactor, rejilla que sostiene los residuos, cámara de salida y bastidor.
- Se logró mantener una temperatura de trabajo adecuada, para el proceso de carbonización de los residuos, mediante la implementación de un sistema de control de temperatura.
- No se logró controlar en su totalidad la velocidad y flujo constante de aire dentro del reactor, ya que, al mantener una velocidad constante, que sea igual a la velocidad de arrastre del material carbonizado, genera una disminución significativa en la temperatura que afecta el proceso de carbonización, solo se logra controlar que el ventilador sea capaz de extraer en mayor parte el material carbonizado una vez empiece a trabajar.
- Se diseñó un sistema idóneo para el transporte de material carbonizado y molido, que permitirá el proceso continuo entre los equipos de carbonización, molienda y peletizado.
- El desarrollo de un proyecto a escala laboratorio, permite establecer principios y bases para futuros proyectos relacionados con la transformación de residuos orgánicos a pequeña, mediana y gran escala, e influir en la forma de mejorar las condiciones ambientales y sociales de diversas comunidades.

- El proceso de carbonizado fue idóneo, puesto que las partículas carbonizaron correctamente perdiendo su humedad sin dejar rastros de lixiviados.

10. RECOMENDACIONES.

- Para futuros proyectos se recomienda instalar un sistema de control de velocidad de ventilación más robusto, donde de forma automática se generen cambios en la velocidad del aire en función de la temperatura, y de esta manera no ocurran caídas de temperatura en el equipo y el material salga del equipo cuando esté totalmente carbonizado.
- Si es posible utilizar equipos que cuenten con alta precisión para la determinación de parámetros importantes, como la velocidad del aire y la temperatura del equipo.
- Realizar pruebas de peletizado con los residuos obtenidos mediante la carbonización

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Balseca, O. F. (2021). Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición . *Polo del conocimiento*, 32. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8016903>
- Cengel , Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones/ (4a. ed.)*. Mexico DF: McGraw Hill.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *TERMODINAMICA / (8a. ed.)*. Mexico DF: McGraw Hill.
- Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). *Caracterización y gestion de Residuos [Fotografía]*. Obtenido de <http://www3.cec.org/islandora/fr/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>
- Consorcio NAM Ltda;Velzea Ltda. (2008). *Gestion de los residuos organicos en las plazas de mercado de Bogota*. Contrato PNUD (COL/96/23). Obtenido de <http://ambientebogota.gov.co/documents/sda/Plazas.pdf>
- Diaz, C. (2011). Revista Científica. *Gestion y Gerencia*, pág. 118. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5272671>
- Escalante; Perez; Hidalgo; Lopez ; Campo; Valtierr, A. (2016). *Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo*. Mexico. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
- Forero; Guerrero; Sierra, C. (2012). *Producción y uso de pellets de biomasa, para la generación de energía térmica*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4991583.pdf>
- Fortalecimiento de la capacidad en energia renovab, F. (2002). *Manual sobre energias renovables BIOMASA*. Costa Rica. Obtenido de <http://www.bio-nica.info/biblioteca/BUNCA2002Biomasa.pdf>

- Jaramillo; Zapata , G. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Universidad de Antioquia, Antioquia. Obtenido de <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>
- Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering (Butterworths Series in Chemical Engineering) / (2nd. ed.)*. butterworth-Heinemann.
- Lucas, Peso, Rodríguez, Prieto, A., Carlos, Encarna, & Prado. (2012). *Biomasa biocombustibles y sostenibilidad*. Graficolor-Palencia S.L. 2012. Obtenido de <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Organización de las naciones unidas ONU. (2018). *Perspectiva de la gestión de residuos en America Latina y el Caribe*. Medio Ambiente. Obtenido de <http://ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2019/09/Perspectiva-de-la-Gesti%C3%B3n-de-Residuos-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.-Resumen-para-tomadores-de-decisiones.pdf>
- Portero Jijon, A. (2014). *Analisis termico del proceso de peletizado de aserrin*. Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8304/1/Tesis%20I.%20M.%20218%20-%20Portero%20Jij%C3%B3n%20Alex%20Mauricio.pdf>
- Quesada Kimzey, J. (2012). *La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes*.
- Quezada, J. (1990). *Diseño y construcción de un equipo para la obtención de carbón de alta pureza a partir de la destilación seca de la madera* . Guayaquil.

- Raaeli , N. (2016). *Elaboración de carbon vegetal en horno metalico transportable*. Universidad Nacional de la Plata. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/69029/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Resolución, 1045 (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial 2003).
- Rodríguez Galbarro, H. (2018). *ingemecanica*. Obtenido de Cálculo de Transportadores: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>
- Sprocket, M. (2013). *ISSUU El gran catalogo 4000 sección H*. Obtenido de <https://issuu.com/msg-mexico/stacks/e99bf2ef00374dec9ec88a9f950e23ee>
- Tejeiro, J. (2010). *Reactores Quimicos*. Universidad de Barcelona.
- Urien Pinedo, A. (2013). *OBTENCIÓN DE BIOCARBONES Y BIOCMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS DE BIOMASA RESIDUAL*. Obtenido de https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf
- Zapata Saad, A. (2016). *Investigación de los parámetros de la elaboracion de pellets de cuesco de palma en el proceso de pirolisis*. Bogota . Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58926/72292695.2016.pdf?sequence=1>

APÉNDICE

Apéndice 1. Cálculo de la densidad aparente del lecho.

Para determinar la densidad aparente del lecho, se utilizó un cilindro, de 20 [cm], graduado con diferentes alturas entre 0-7.5[cm]. Se procedió a dejar caer libremente en el material dentro de cilindro variando la altura a la que llegaba el material, y de esta manera se determinó el volumen aparente del lecho, con la ecuación de volumen de cilindro, por otra parte, la masa se halló con ayuda de una gramera. El valor final fue un promedio de todas las muestras.

Tabla A.

Determinación de la densidad aparente de lecho.

ALTURA [cm]	VOLUMEN [m ³]	MASA TOT [Kg]	MASA RECIPIENTE [Kg]	MASA REAL [Kg]	DENSIDAD [Kg/m ³]
2,5	0,000785398	0,594	0,114	0,48	611,1549815
2,5	0,000785398	0,57	0,114	0,456	580,5972324
2,5	0,000785398	0,616	0,114	0,502	639,1662515
5	0,001570796	0,97	0,114	0,856	544,9465251
5	0,001570796	0,954	0,114	0,84	534,7606088
5	0,001570796	1,01	0,114	0,896	570,411316
7.5	0,002356194	1,394	0,114	1,28	543,2488724
7.5	0,002356194	1,37	0,114	1,256	533,0629561
7.5	0,002356194	1,38	0,114	1,266	537,3070879
Densidad aparente del lecho promedio					566,072

Nota. Tomado de los autores.

Apéndice 2. Cálculo del volumen de la partícula.

Para la determinación del diámetro de las partículas, se calcula el volumen de cinco muestras de residuos orgánicos. Finalmente, se toma el volumen promedio de las 5 muestras como el valor para el cálculo. Se obtuvo que el volumen promedio de la partícula es de $5.3 \times 10^{-7} [m^3]$

Tabla B.

Calculo experimental del volumen de la partícula.

DIMENSIONES DE LA PARTICULA DE RESIDUOS ORGANICOS				
No. MUESTRA	LARGO [cm]	ANCHO (cm)	ESPESOR (cm)	Volumen (cm³)
1	1	1	0,4	0,4
2	1,1	1,1	0,32	0,3872
3	1,2	1,1	0,5	0,66
4	1,1	1,2	0,5	0,66
5	1,1	1,1	0,45	0,5445
Volumen promedio.				0,530

Nota. Tomado de los autores

Ilustración B.

Muestras de residuos orgánicos seleccionadas.



Nota. Tomado de los autores

Apéndice 3. Cálculo experimental de la velocidad del aire antes de las resistencias.

La velocidad en el estado 1 fue calculada, empleando un anemómetro portátil, para esto se fabrica un prototipo de la estructura del reactor en cartón y se utiliza el ventilador seleccionado para el proceso. Se utilizaron residuos orgánicos, húmedos y carbonizados, respetando el tamaño de partícula definido en el proyecto.

La carbonización de los residuos empleados en la prueba se realizó en el laboratorio de combustión de la UIS, donde se utilizó una mufla para el carbonizado.

Ilustración C.

Carbonizado del material.

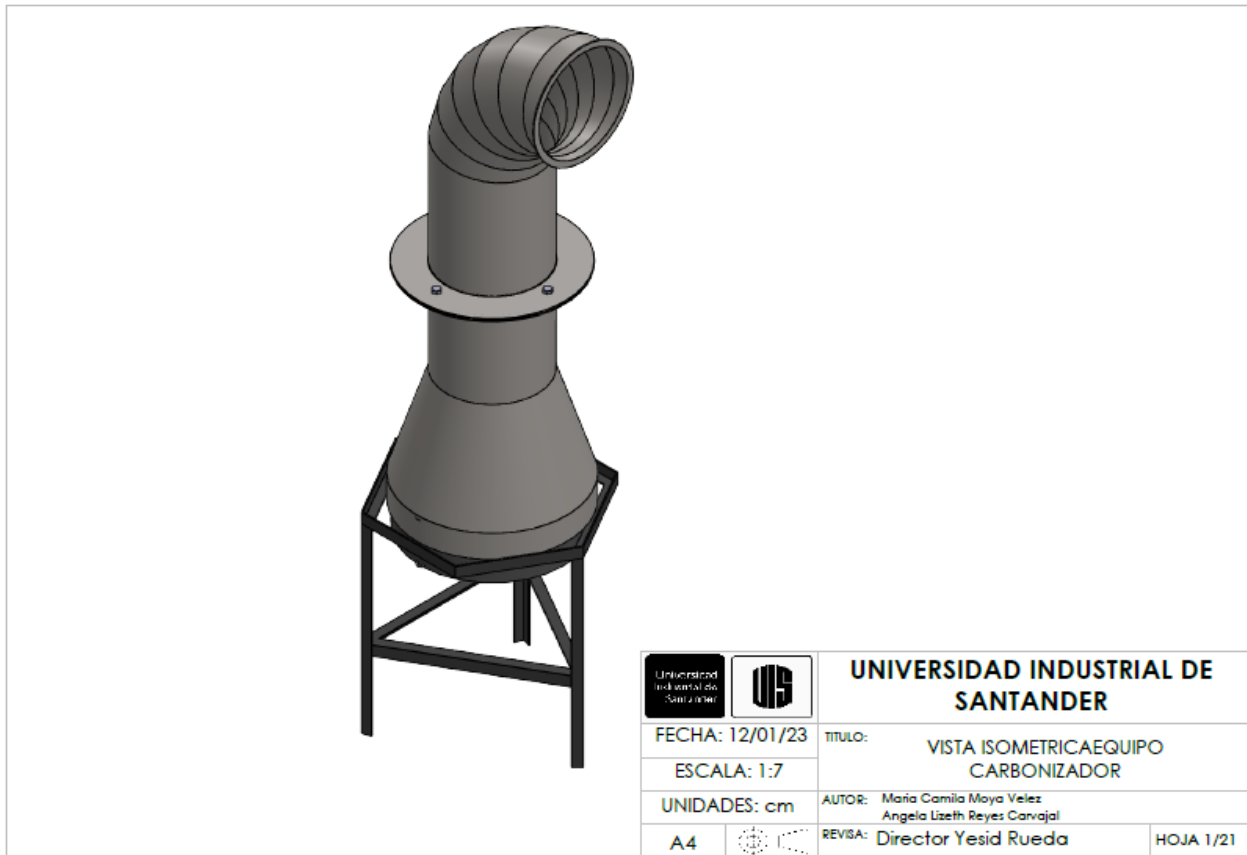


Nota. Tomado de los autores.

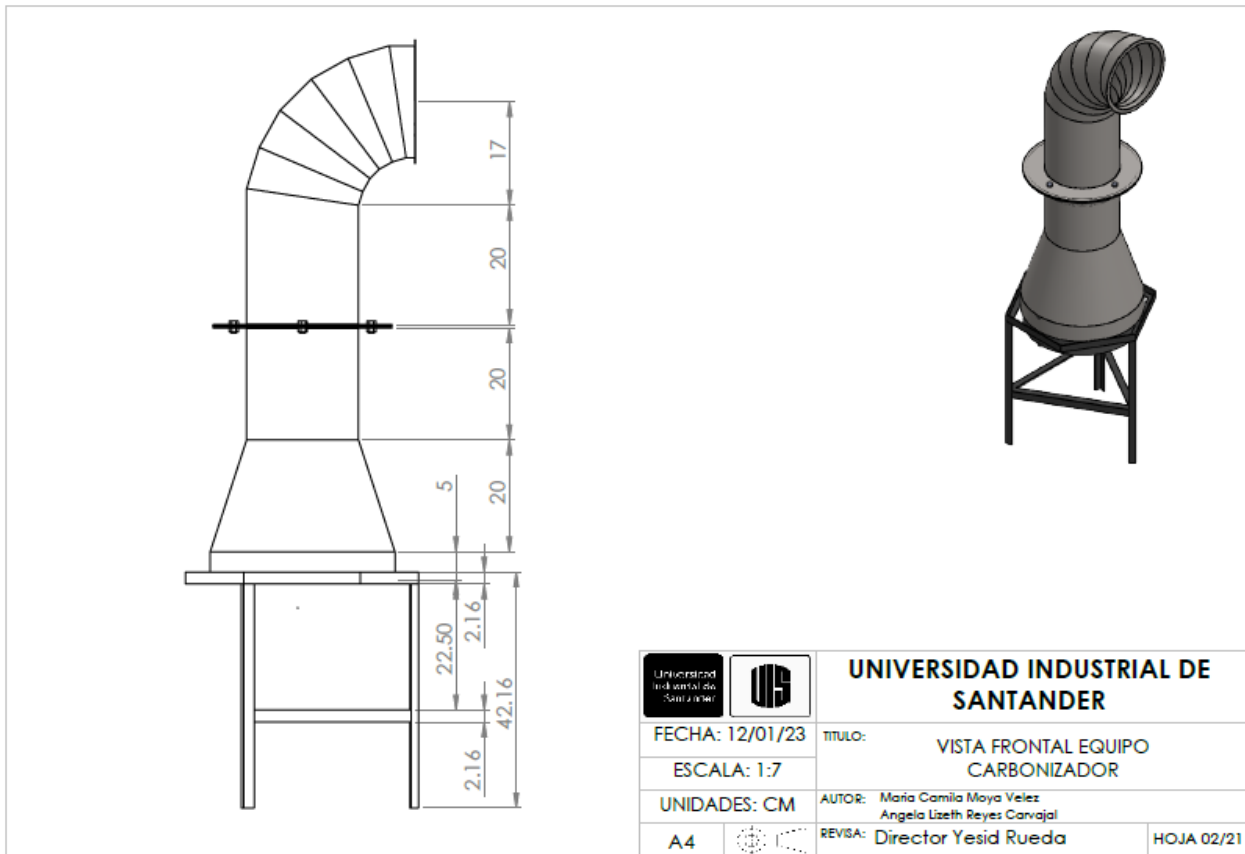
Para hallar la velocidad, en primer lugar, se ubican dentro del prototipo los residuos orgánicos carbonizados; con ayuda del dimmer (dispositivo de control de la velocidad del ventilador), se puso a variar la velocidad hasta encontrar el punto exacto donde las partículas salen expulsadas del prototipo. Manteniendo esa velocidad se introducen las partículas húmedas, y se verifica que estas no salgan del reactor, por último, se introducen partículas húmedas y secas y se garantiza que solo sean expulsadas las partículas carbonizadas.

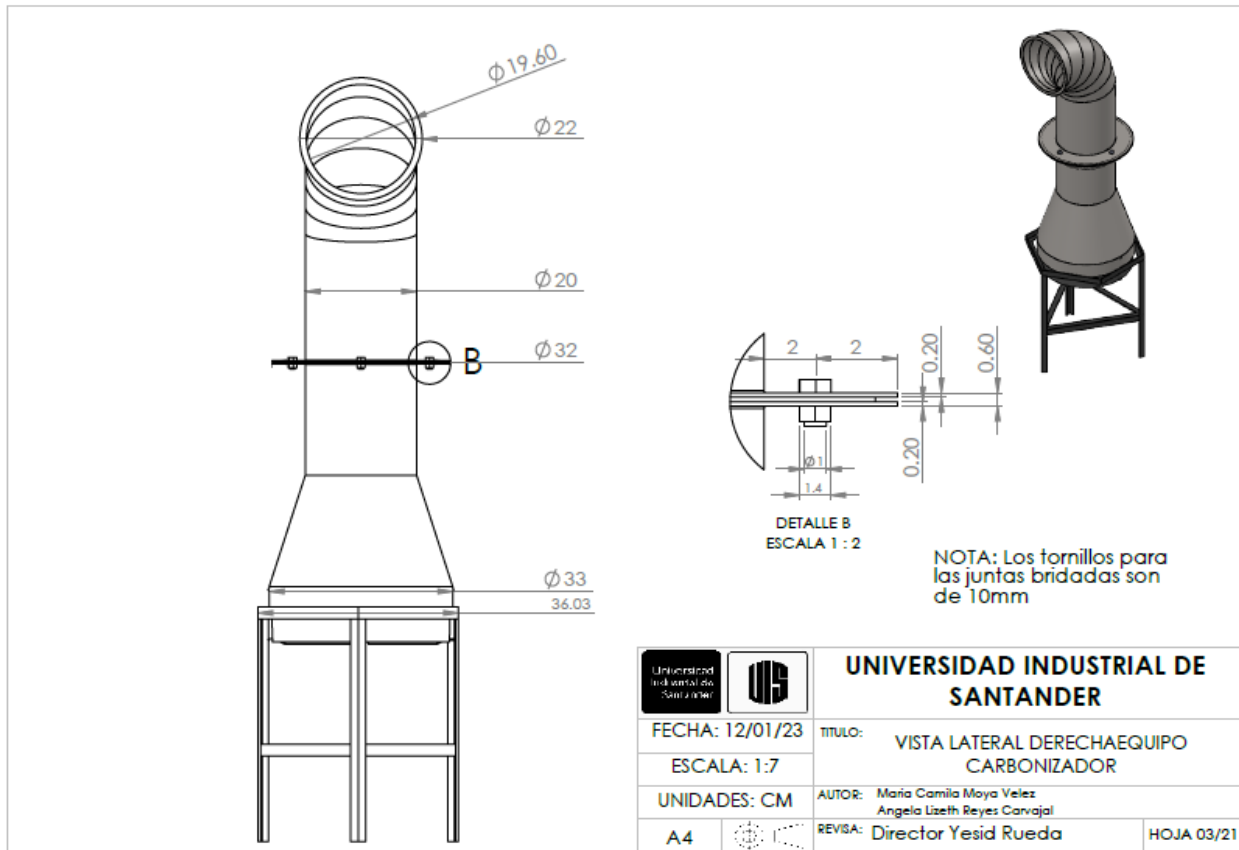
La velocidad que cumplió con la condición de mantener dentro del reactor las partículas húmedas y expulsar las carbonizadas corresponde a 2,6 [m/s].

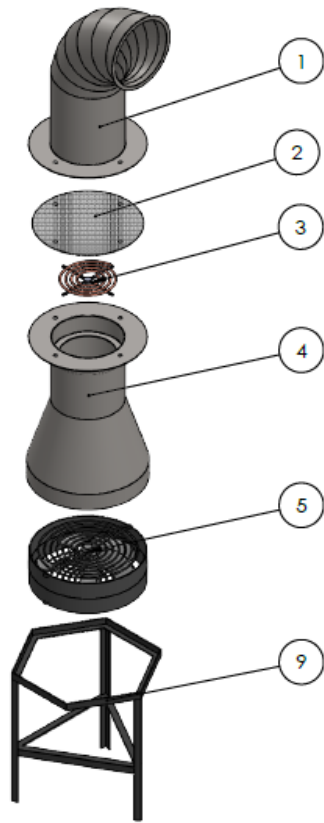
Apéndice 4. Modelado y planos del equipo de carbonización



		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 12/01/23		TITULO: VISTA ISOMETRICA EQUIPO CARBONIZADOR	
ESCALA: 1:7		AUTOR: Maria Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal	
UNIDADES: cm		REVIS: Director Yesid Rueda	
A4		HOJA 1/21	

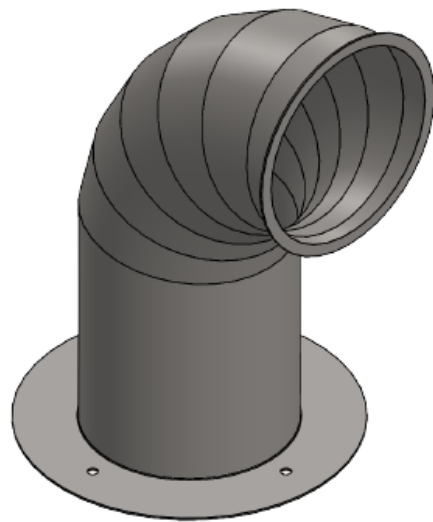




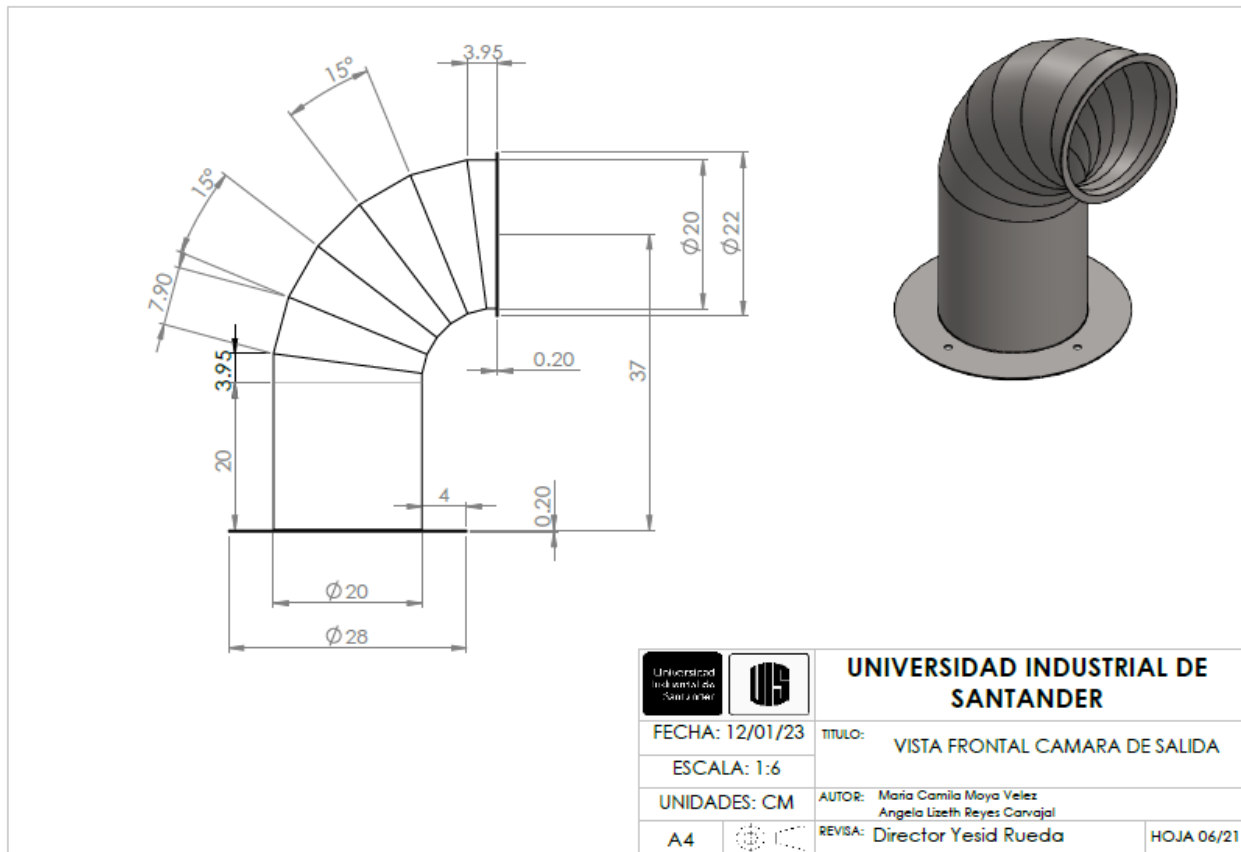


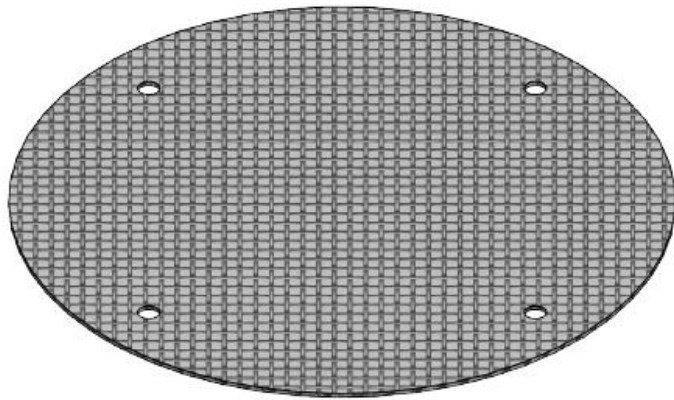
Nº	NOMBRE
1	CAMARA DE SALIDA
2	REJILLA
3	RESISTENCIA
4	CILINDRO INFERIOR
5	VENTILADOR
6	BASTIDOR

 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 12/01/23	TITULO: EXPLOSIONADO SUBSISTEMAS EQUIPO CARBONIZADOR	
ESCALA: 1:12	AUTOR: Maria Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal	
UNIDADES: cm	REVISOR: Director Yesid Rueda	HOJA 04/21
A4		

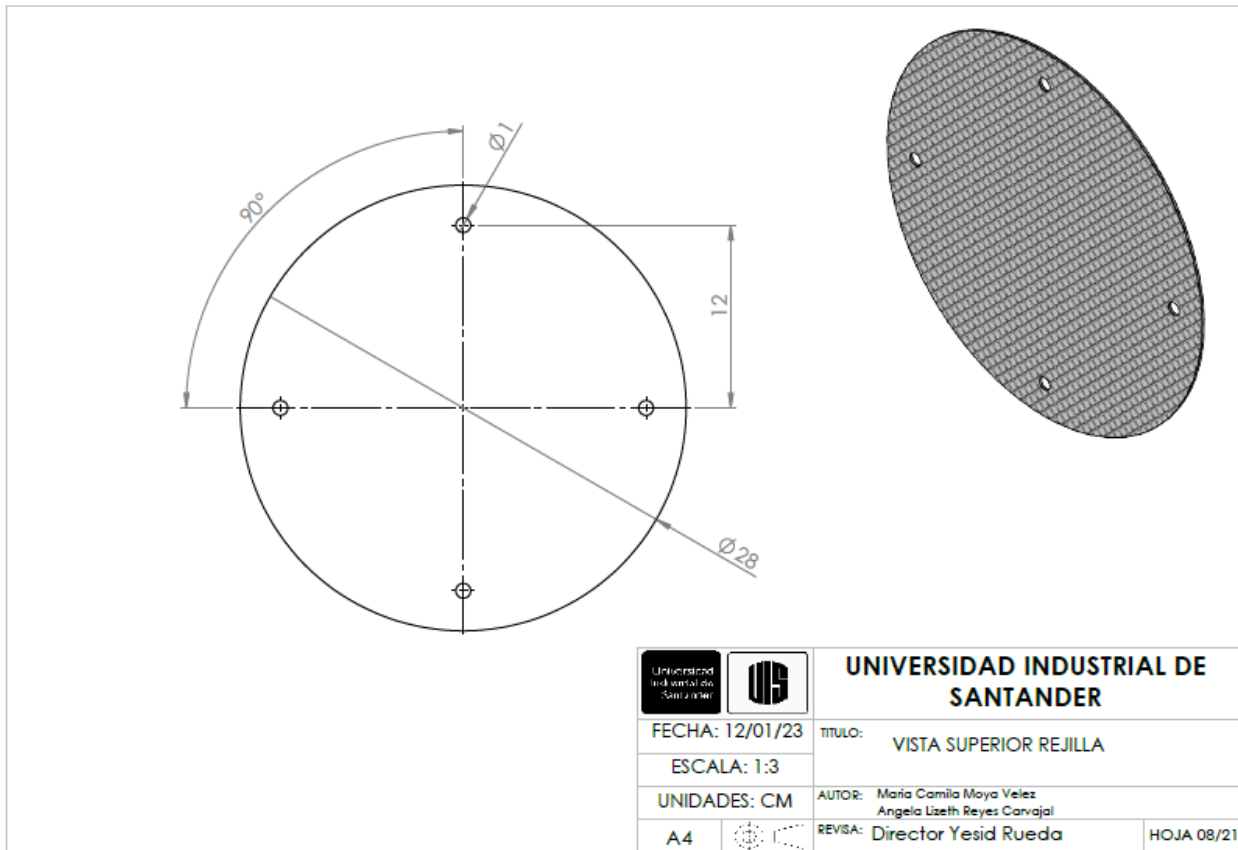


		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 12/01/23	ESCALA: 1:4	TITULO: ISOMETRICA CAMARA DE SALIDA	
UNIDADES: cm	A4	AUTOR: Maria Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal	REVISOR: Director Yesid Rueda
			HOJA 05/21

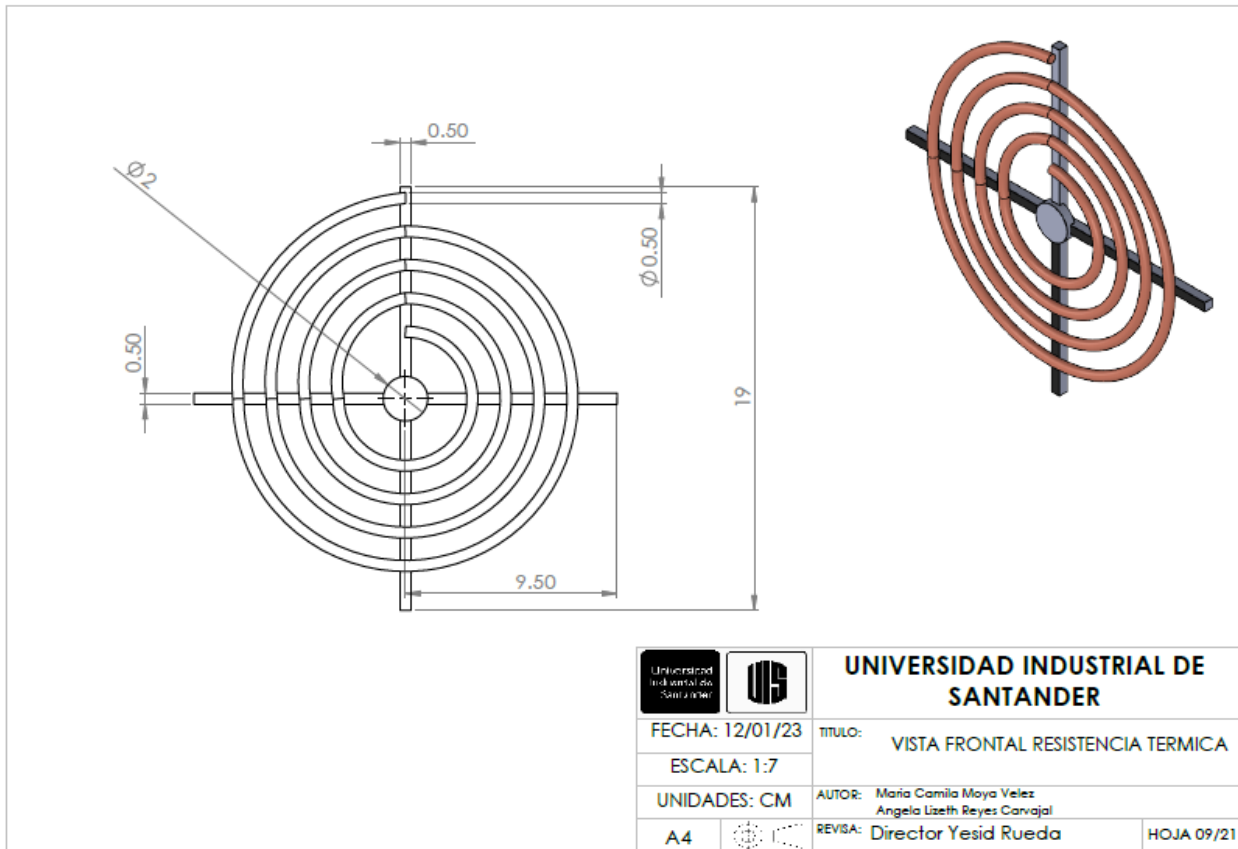


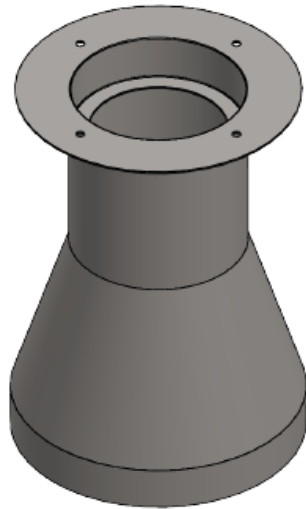


		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 12/01/23	TITULO: REJILLA		
ESCALA: 1:2			
UNIDADES: CM	AUTOR: Maria Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal		
A4		REVISOR: Director Yesid Rueda	HOJA 07/21

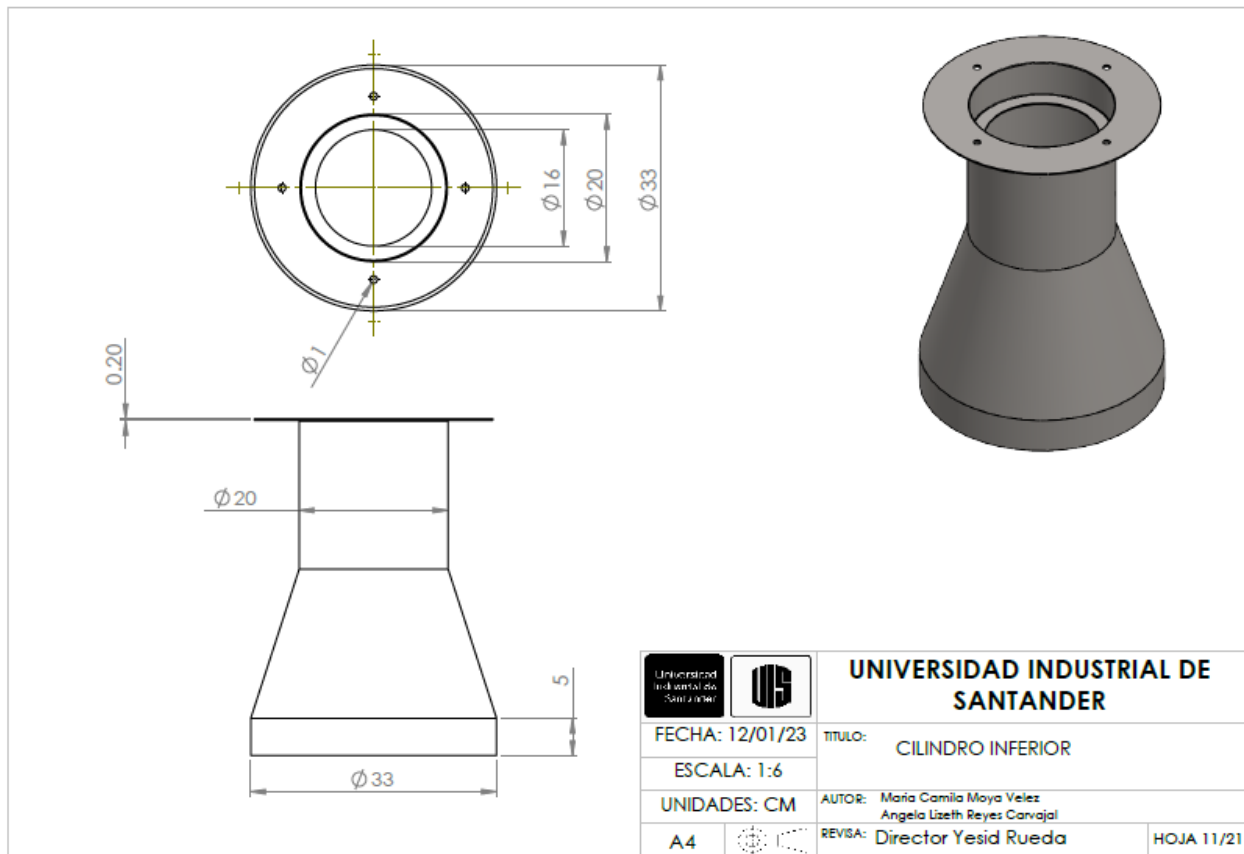


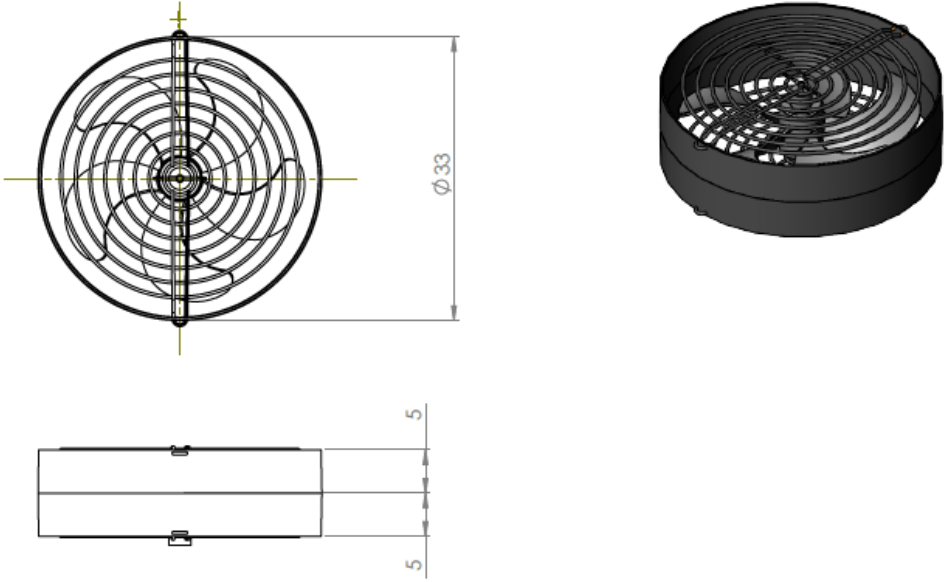
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 12/01/23	TITULO:	VISTA SUPERIOR REJILLA	
ESCALA: 1:3	AUTOR:	María Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal	
UNIDADES: CM	REVISA:	Director Yesid Rueda	HOJA 08/21
A4			








		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 12/01/23	TITULO: VISTA ISOMETRICA CILINDRO INFERIOR		
ESCALA: 1:5	AUTOR: Maria Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal		
UNIDADES: CM	REVISOR: Director Yesid Rueda		HOJA 10/21
A4			



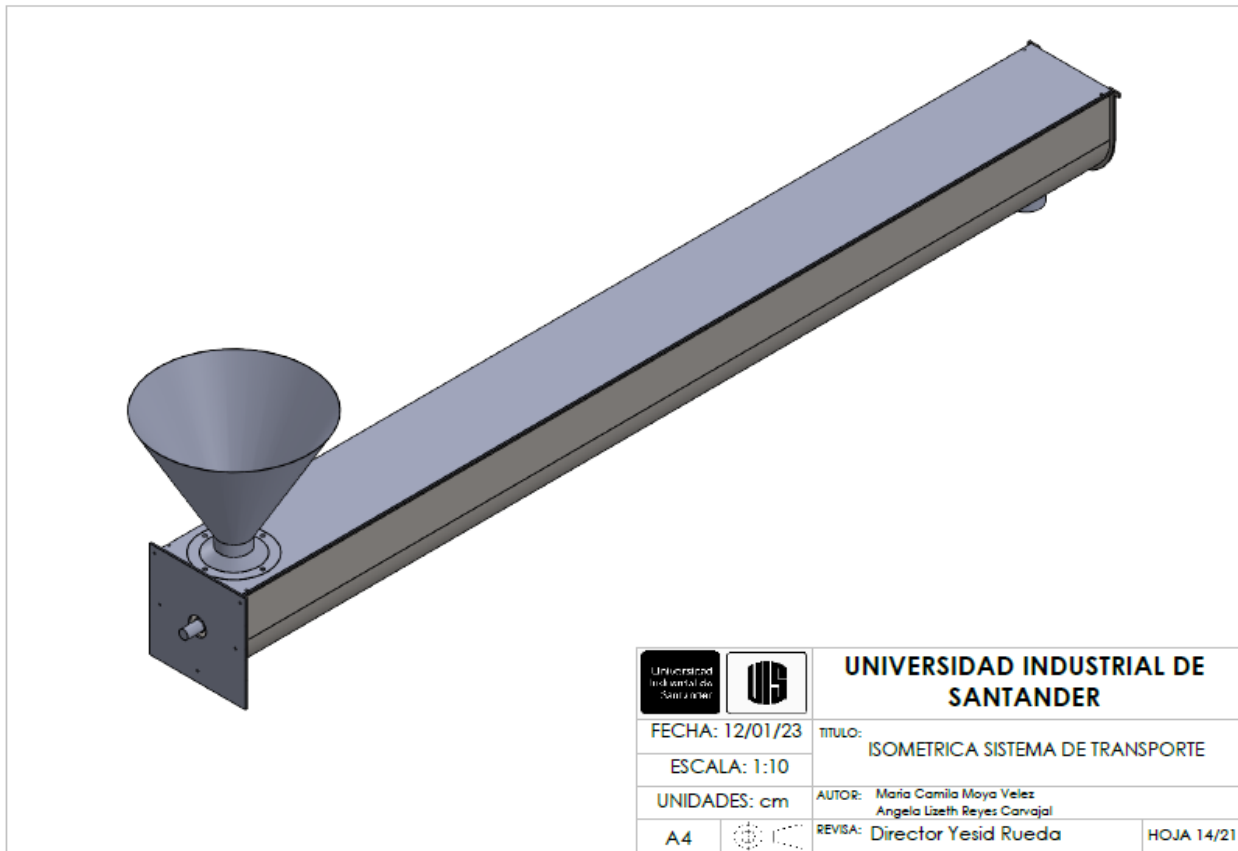


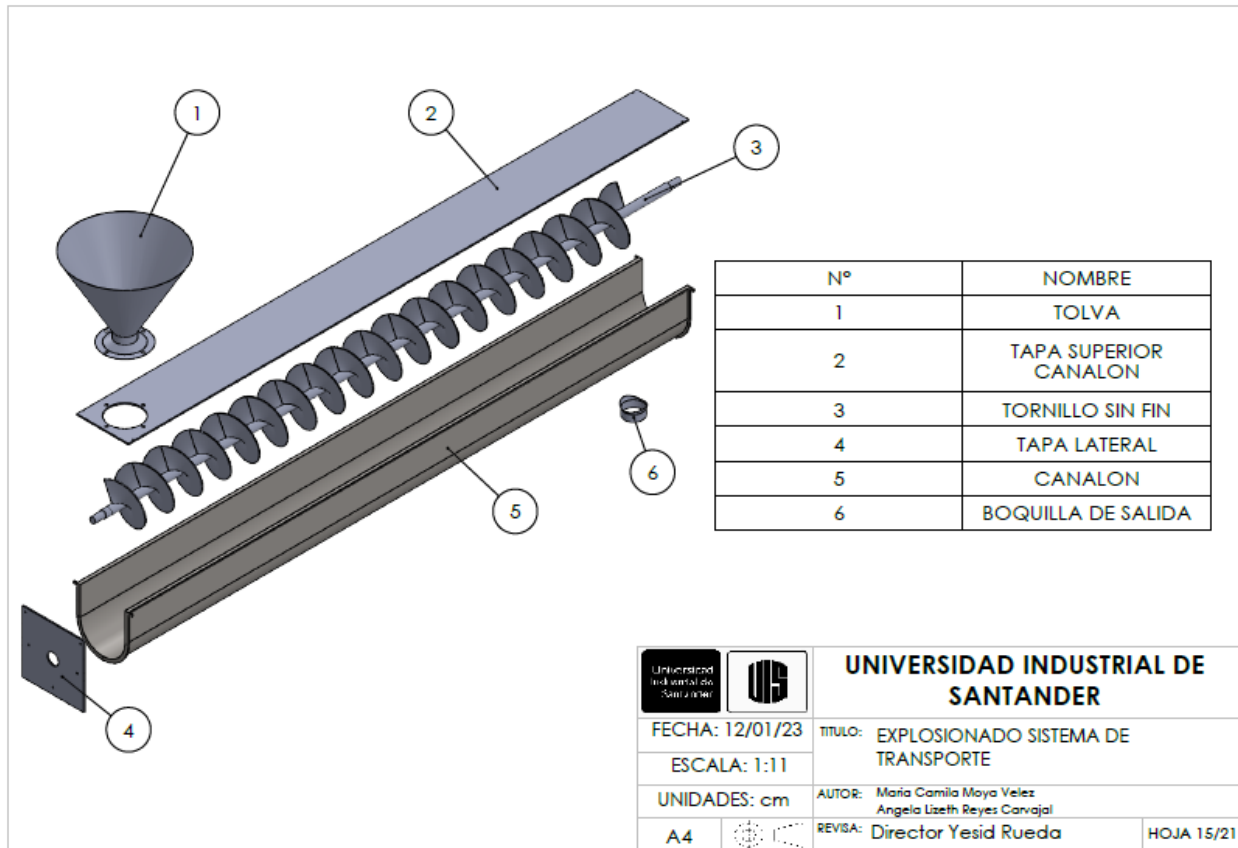
Technical drawing of a fan. The top view shows a circular fan with a diameter of $\varnothing 33$. The side view shows a cylindrical body with a height of 5. A 3D perspective view of the fan is also shown.

NOTA: todas las características y dimensiones del ventilador, se pueden encontrar en los datos del fabricante

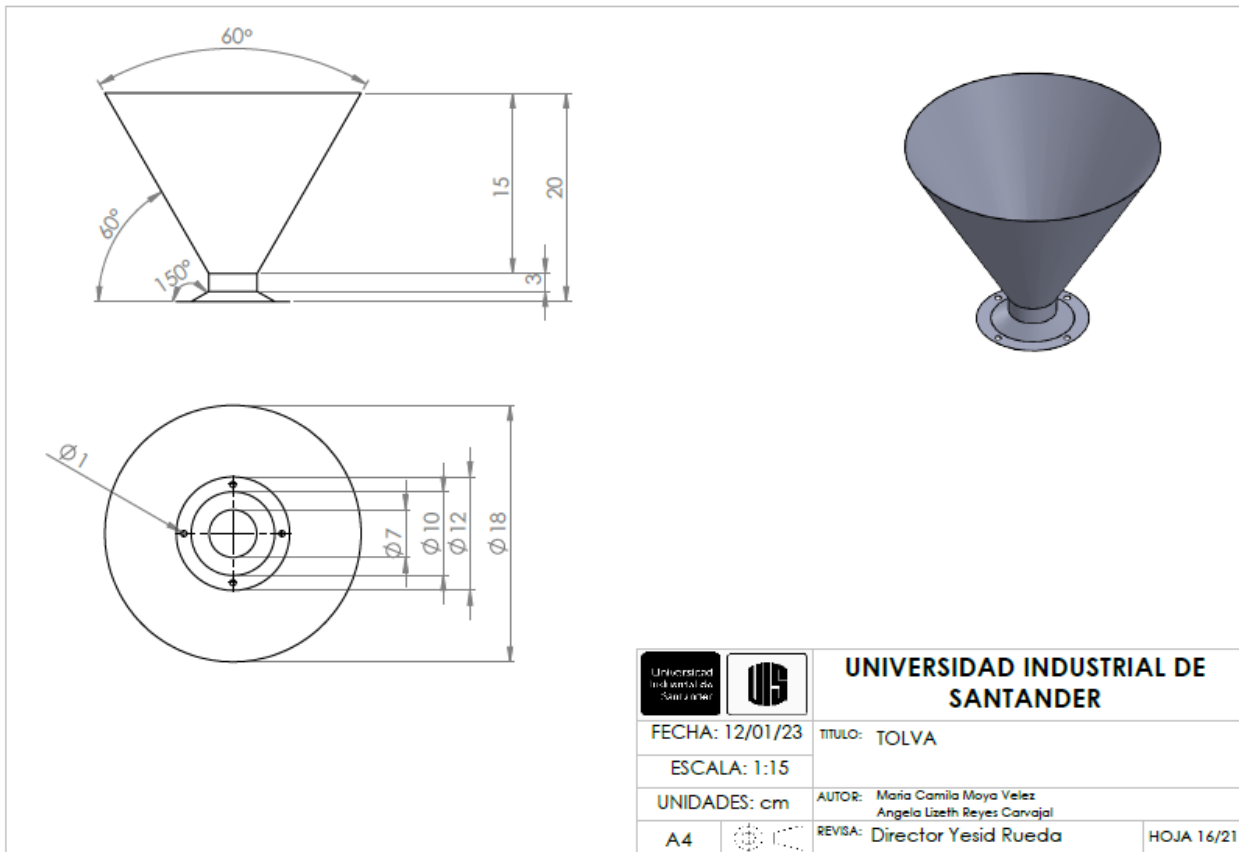
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 12/01/23	TITULO: VENTILADOR		
ESCALA: 1:7	AUTOR: Maria Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal		
UNIDADES: CM	REVISIA: Director Yesid Rueda		
A4		HOJA 12/21	

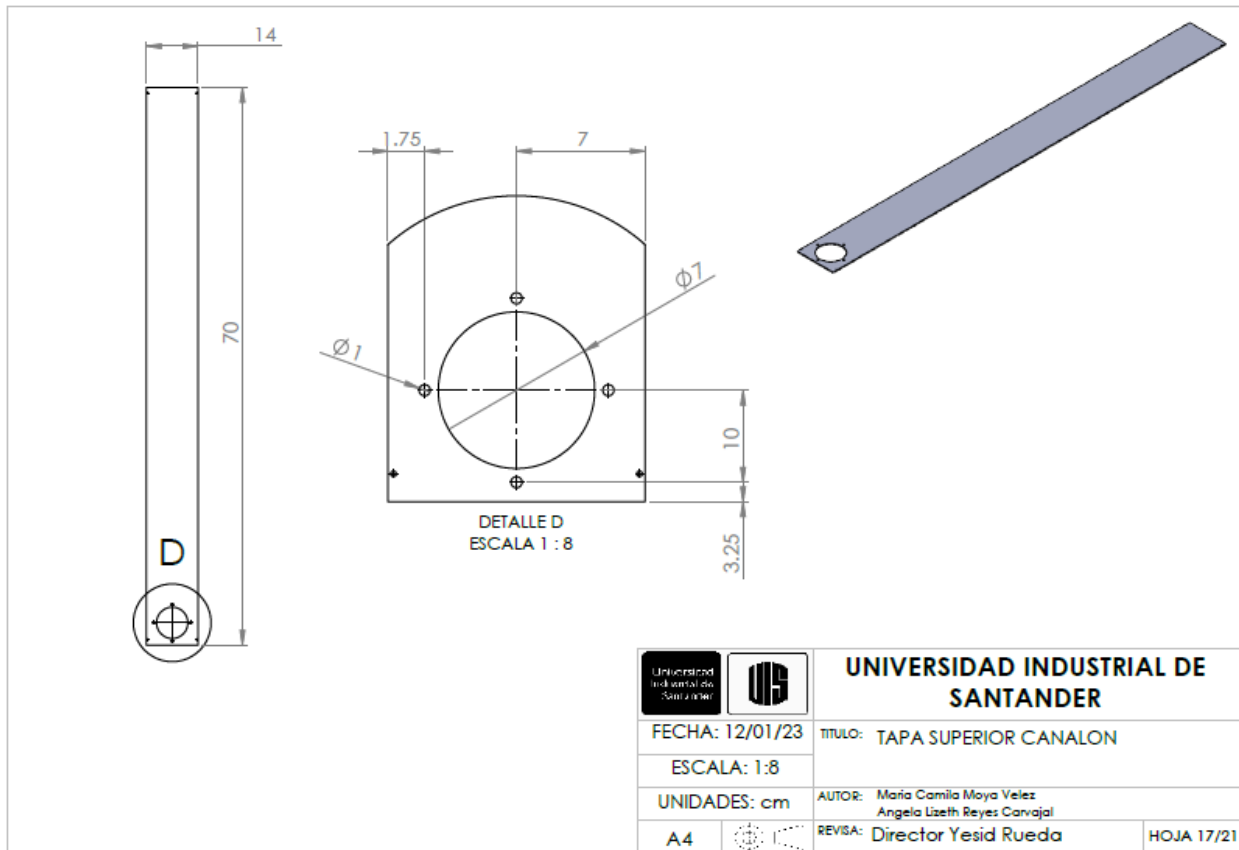
Apéndice 5. Modelado y planos sistema de transporte.



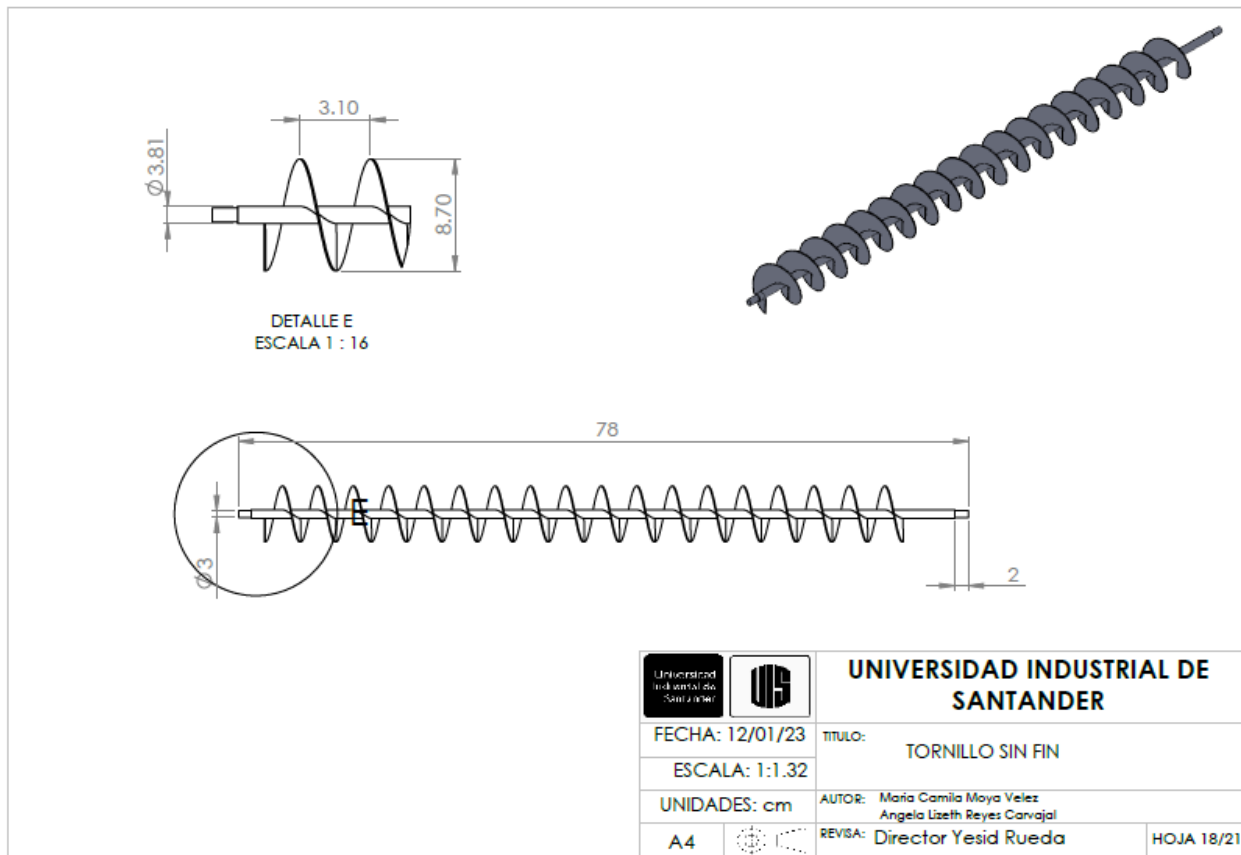


		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
		FECHA: 12/01/23	TITULO: EXPLOSIONADO SISTEMA DE TRANSPORTE
ESCALA: 1:11		AUTOR: Maria Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal	
UNIDADES: cm		REVISA: Director Yesid Rueda	HOJA 15/21
A4			

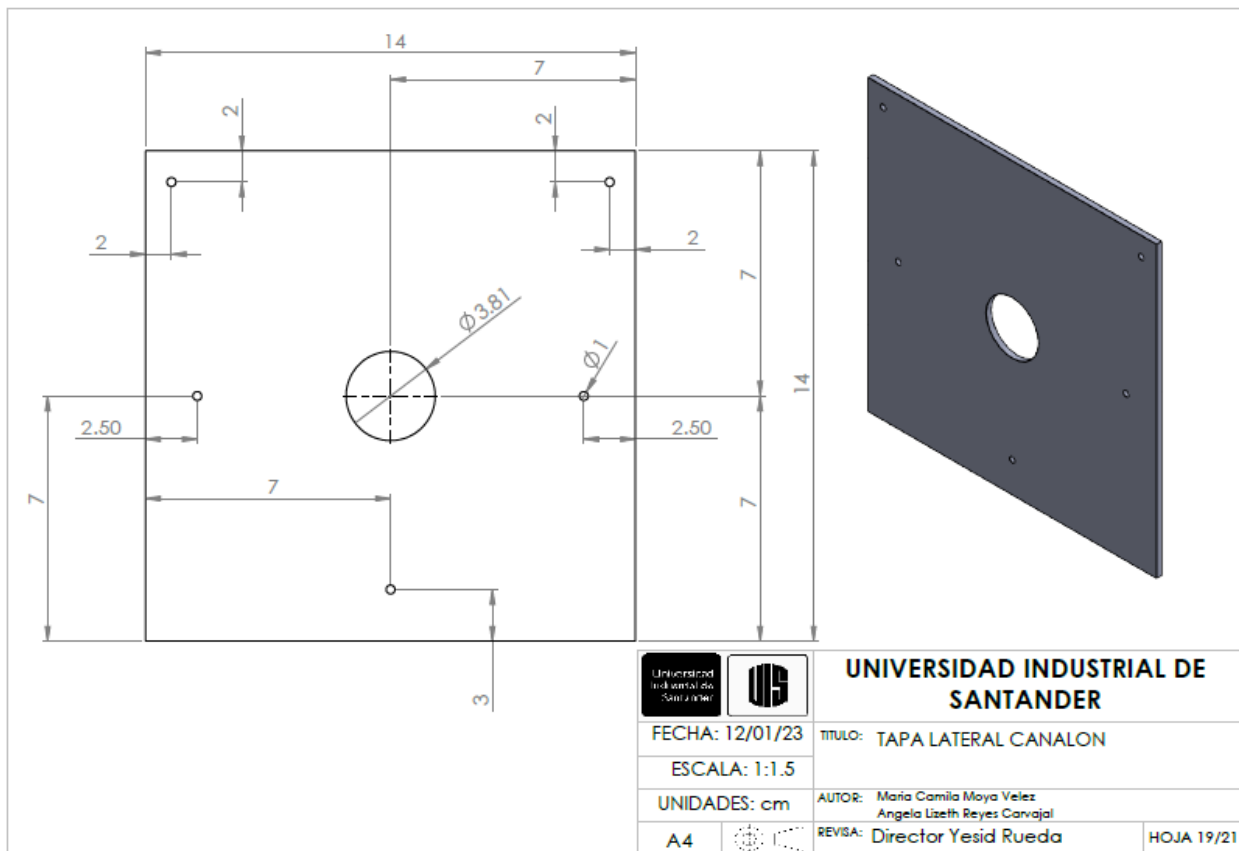


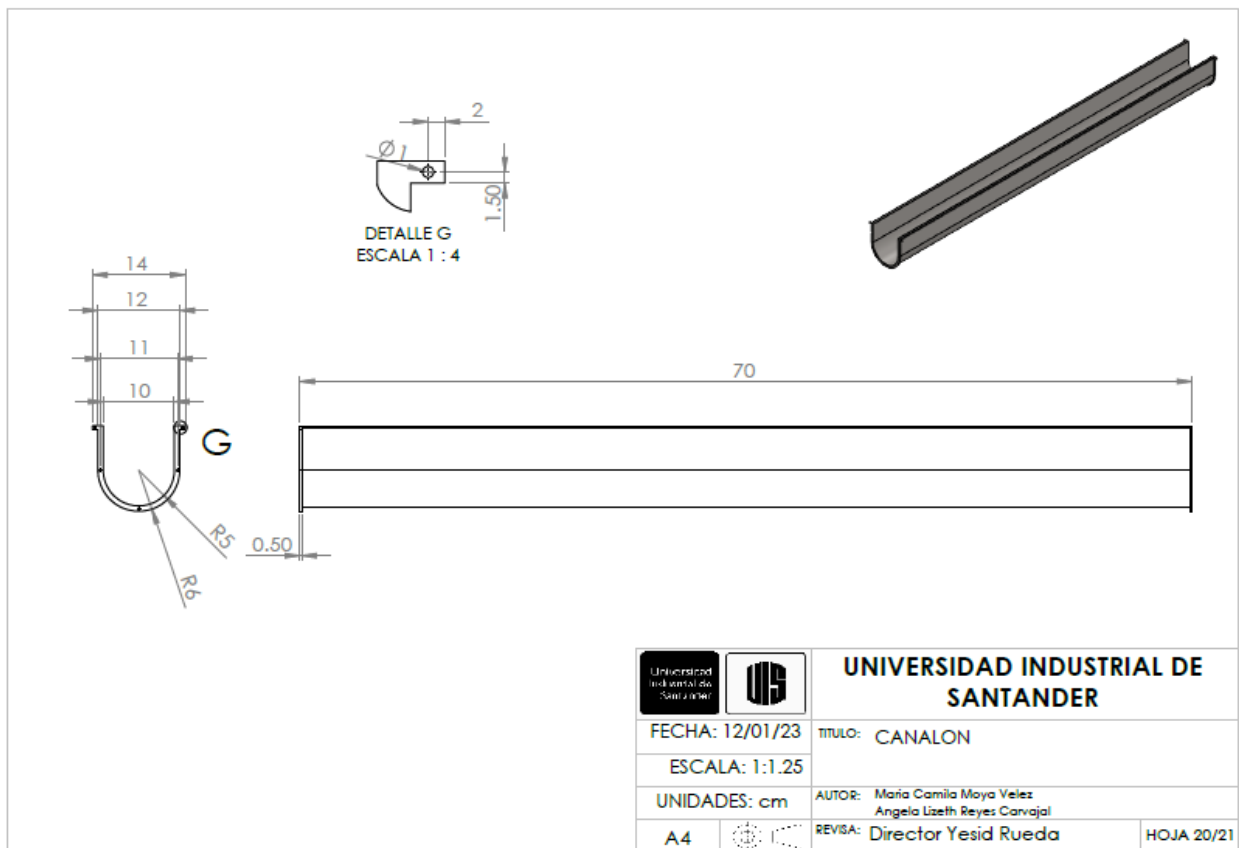


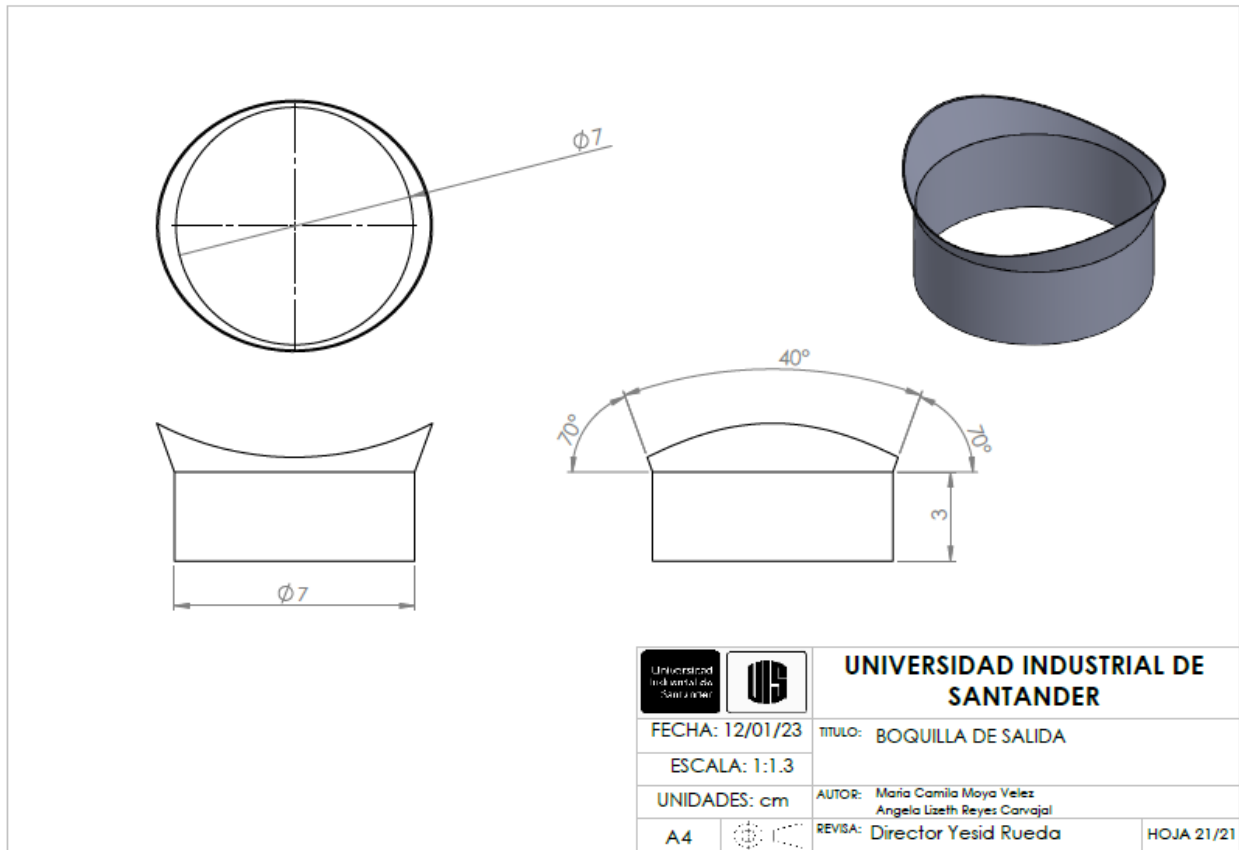
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
		FECHA: 12/01/23	TÍTULO: TAPA SUPERIOR CANALON
ESCALA: 1:8		AUTOR: María Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Canrajal	
UNIDADES: cm		REVISOR: Director Yesid Rueda	HOJA 17/21



		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 12/01/23	TITULO:	TORNILLO SIN FIN	
ESCALA: 1:1.32	AUTOR:	Maria Camila Moya Velez Angela Lizeth Reyes Carvajal	
UNIDADES: cm	REVISOR:	Director Yesid Rueda	HOJA 18/21
A4			

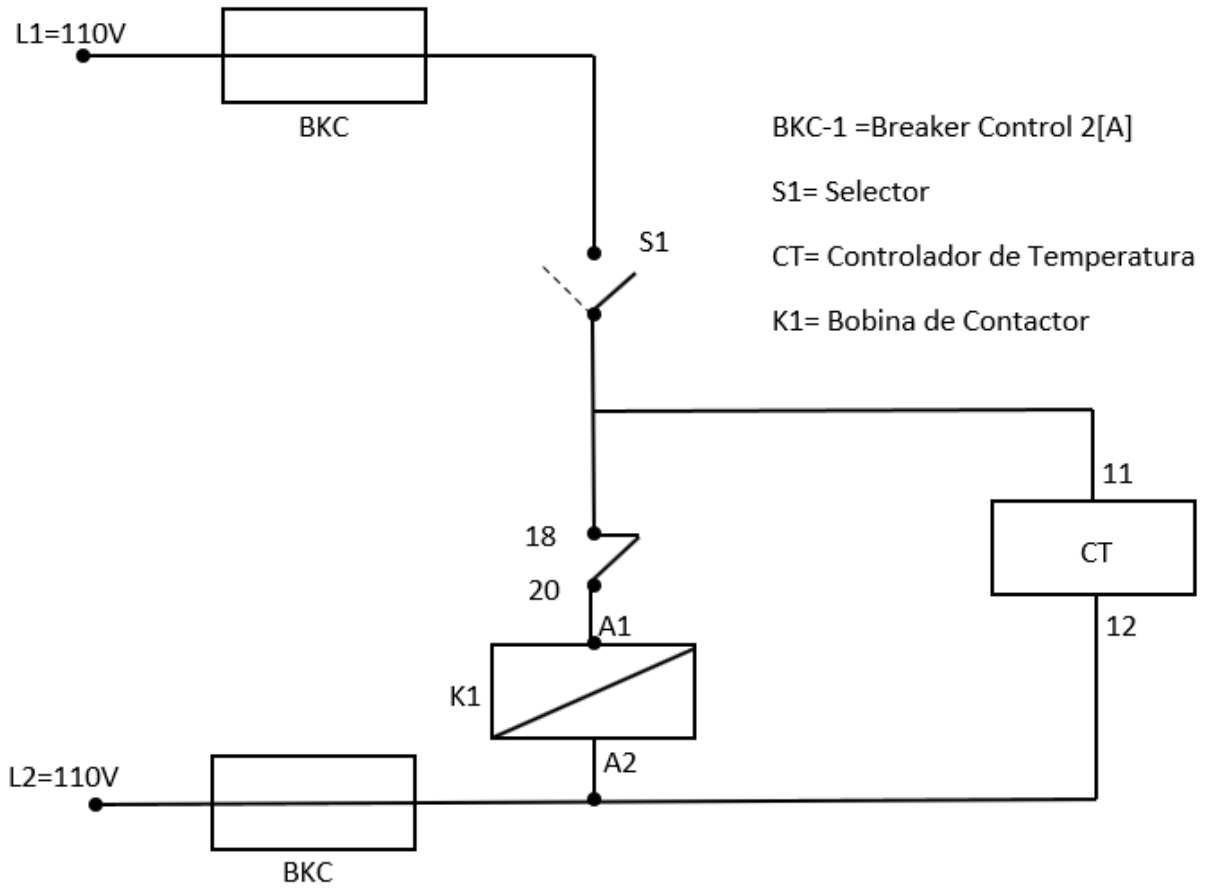






Apéndice 6. Planos eléctricos del sistema de calentamiento

CIRCUITO DE CONTROL PARA CALENTAMIENTO DEL EQUIPO

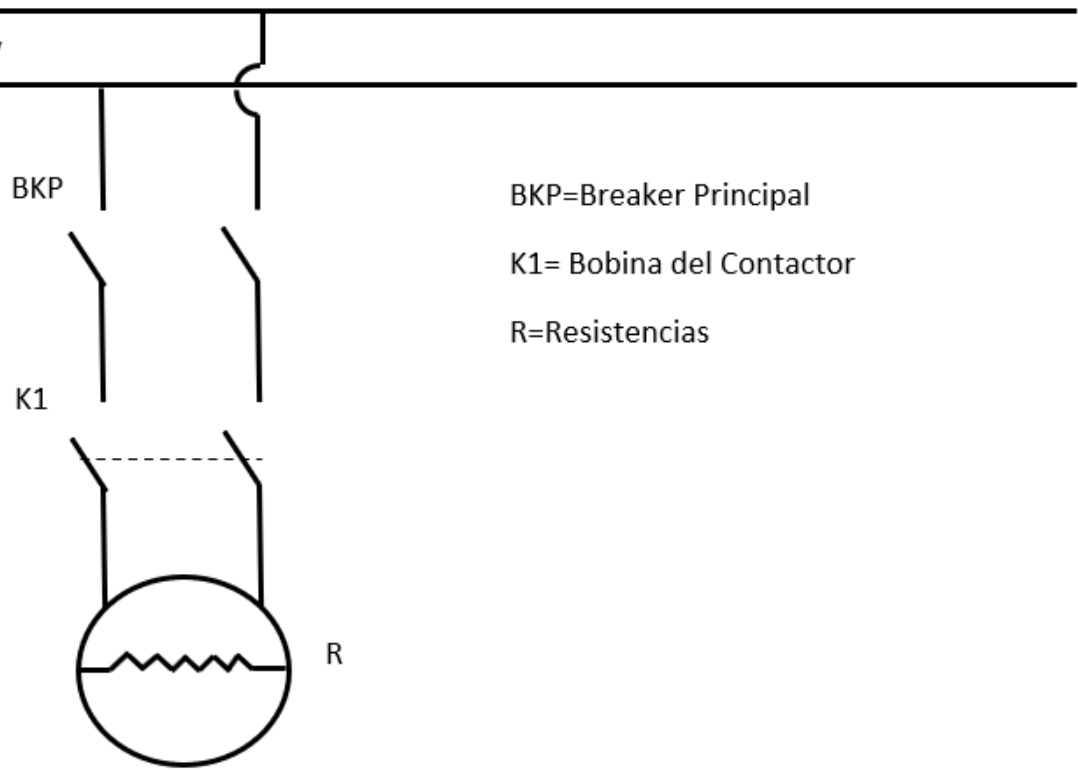


Apéndice 7. Planos eléctricos del sistema de ventilación

CIRCUITO DE FUERZA PARA CALENTAMIENTO DEL EQUIPO

L1=110V

L2=110V



BKP=Breaker Principal

K1= Bobina del Contactor

R=Resistencias