

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO PARA  
COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL A ESCALA DE LABORATORIO

KAREN DAYANA CALA ESTÉVEZ  
JORGE ORLANDO CAMARGO MÉNDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2021

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO PARA  
COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL A ESCALA DE LABORATORIO

KAREN DAYANA CALA ESTÉVEZ  
JORGE ORLANDO CAMARGO MÉNDEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero mecánico

Director:

Yesid Javier Rueda

Ph.D. en Ingeniería química, ingeniero mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2021

## DEDICATORIA

A Dios quien me ha guiado sabiamente, me ha brindado la fuerza necesaria para seguir adelante y no rendirme ante las dificultades, por todo lo que me ha permitido lograr a lo largo de estos años.

A mi padre Ramiro Cala López por su amor y apoyo incondicional, por creer en mí siempre, en todo momento, por enseñarme a resistir, persistir y nunca desistir hasta llegar a la meta, por esas palabras de aliento y motivación en los momentos en que dude.

A mi madre Fanny Yaneth Estévez Sánchez por enseñarme que la paciencia es una maravillosa virtud, por su comprensión y demostrarme lo fuerte que se puede llegar a ser sin importar los obstáculos.

A mi hermano Ramiro Andrés Cala Estévez por ser mi confidente y ser ese amigo incondicional, aquel que siempre escucha y no juzga, ese amigo que siempre me ayuda a ver el lado positivo de todas las cosas en medio de las adversidades.

A mi hermanita Mariángel Cala Estévez por motivarme a ser uno de sus mayores ejemplos, por inspirarme a ser mejor cada día y a superarme.

A ti gordito gracias por el amor, el apoyo, la paciencia, los consejos, el aprendizaje, pero sobre todo la compañía que me brindaste en estos últimos años.

A mis amigos de la carrera, el equipo dinamita gracias porque ustedes fueron las personas más leales que conocí, con ustedes entendí el verdadero valor de la amistad, gracias por toda la paciencia que tuvieron conmigo, y por hacer más llevaderos mis días lejos de casa.

A mis amigos, conocidos y a las personas que de una u otra manera me acompañaron en alguna parte de este camino y que me ayudaron a hacer este sueño realidad.

Karen Dayana Cala Estévez

## **DEDICATORIA**

A Dios por ser el proveedor de sabiduría y fuerza durante toda la carrera.

A mis padres Orlando Camargo Amado y Yolanda Méndez García por el apoyo que me brindaron durante toda mi carrera, tanto emocional como económico y darme la oportunidad de ser el profesional que siempre soñé.

A mis compañeros de carrera y amigos cercanos por el apoyo brindado en los momentos difíciles y en los momentos felices, que hicieron mi estancia en la universidad una de mis mejores etapas de mi vida.

A mis profesores que no solo me brindaron conocimientos, si no me enseñaron a ser mejor persona para llegar a ser un excelente profesional.

Jorge Orlando Camargo Méndez

## **AGRADECIMIENTOS**

Al ingeniero Yesid Javier Ordoñez Rueda por el apoyo, la confianza, su conocimiento y colaboración en el desarrollo del proyecto.

A nuestros docentes y a la Universidad Industrial de Santander, por darnos la oportunidad de crecer a nivel personal y profesional.

A nuestros padres por todo su esfuerzo y sacrificio, por el respaldo económico que nos brindaron a lo largo del proyecto.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1. OBJETIVOS .....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	18
2.1 MARCO REFERENCIAL .....	18
2.1.1.2 Antecedentes internacionales .....	18
2.1.1.3 Antecedentes Nacionales .....	21
2.2 MARCO TEÓRICO .....	24
2.2.1 Lecho fluidizado .....	24
2.2.2 Propiedades del lecho fluidizado .....	26
2.2.2.2 Densidad de partícula .....	26
2.2.2.3 Porosidad del lecho o fracción de vacío .....	26
2.2.2.4 Diámetro equivalente .....	27
2.2.2.5 Esfericidad de la partícula.....	27
2.2.2.6 Tamaño de la partícula .....	27
2.2.2.7 Porosidad a mínima fluidización .....	27
2.2.2.8 Caída de presión del lecho fluidizado .....	28
2.2.2.9 Velocidad mínima de fluidización.....	30
2.2.2.10 Velocidad terminal de partículas .....	30
2.2.3 Clasificación de partículas .....	31
2.3 MARCO CONCEPTUAL .....	33
2.3.1 Biomasa .....	33

2.3.2 Combustión.....	34
2.3.3 Energías alternativas .....	34
2.3.4 Fluidización .....	34
2.3.5 Reacción exotérmica .....	34
3. MÉTODO .....	35
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	35
3.2. METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS .....	35
3.2.1 Objetivo 1.....	35
3.2.2 Objetivo 2.....	36
3.2.3 Objetivo 3.....	37
4. DISEÑO .....	38
4.1 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	38
4.1.2 Cámara de fluidización .....	39
4.1.3 Plato distribuidor .....	39
4.1.4 Sistema de alimentación de biomasa .....	39
4.1.5 Sistema de escape de gases y filtración de partículas .....	39
4.1.6 Compresor .....	39
4.2 DISEÑO EN DETALLE .....	40
4.2.1 Determinación de las propiedades del lecho .....	40
4.2.2 Diseño cámara de fluidización .....	41
4.2.3 Esfuerzos mecánicos en la cámara de fluidización.....	42
4.2.4 Esfuerzos térmicos en la cámara de fluidización .....	43
4.2.5 Cálculos para velocidad mínima de fluidización.....	43
4.2.6 Cálculos para la transferencia de calor .....	44
4.2.7 Cálculos para el diseño del plato distribuidor.....	48
4.2.8 Pérdidas en tuberías y accesorios .....	50

4.2.8.2 Pérdidas en la cámara de fluidización .....	50
4.2.8.3 Pérdidas en accesorios.....	51
4.2.9 Estequiometría de la combustión .....	53
4.2.10 Cálculos para la termodinámica.....	58
4.2.11 Cálculos para el diseño del tornillo sin fin .....	61
5. RESULTADOS.....	63
5.1 RESULTADOS PARA VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN.....	63
5.2 RESULTADOS PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR .....	64
5.3 RESULTADOS PARA EL DISEÑO DEL PLATO DISTRIBUIDOR.....	65
5.4 RESULTADOS PARA EL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS .....	65
5.5 RESULTADOS PARA EL ANÁLISIS TERMODINÁMICO.....	67
5.6 RESULTADOS PARA EL DISEÑO DEL TORNILLO SIN FIN .....	68
6. PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO .....	69
6.1 INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN .....	70
7. PRUEBAS.....	71
7.1 PRUEBA DE FLUJO MÁSSICO DE BIOMASA .....	71
7.2 PRUEBAS DE FLUIDIZACIÓN .....	71
7.3 PRUEBAS DE COMBUSTIÓN.....	72
8. CONCLUSIONES .....	77
9. RECOMENDACIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS.....	82

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de fluidización	26
Figura 2. Comportamiento de la pérdida de carga en el lecho respecto a la velocidad superficial del gas	29
Figura 3. Clasificación de partículas de Geldart	32
Figura 4. Diseño conceptual del reactor	38
Figura 5. Diseño final del reactor	40
Figura 6. Principales dimensiones de la cámara de fluidización	42
Figura 7. Análisis de resistencias térmicas	45
Figura 8. Distribuidores de placa	48
Figura 9. Coeficiente de pérdidas en accesorios	52
Figura 10. Lecho fluidizado	59

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clasificación de partículas de Geldart	33
Cuadro 2. Propiedades físicas e hidrodinámicas de la arena	41
Cuadro 3. Propiedades mecánicas del AISI 304	41
Cuadro 4. Propiedades físicas e hidrodinámicas del cisco de café	44
Cuadro 5. Coeficiente de orificio	49
Cuadro 6. Coeficiente de pérdidas para la válvula	52
Cuadro 7. Composición volumétrica del gas natural	53
Cuadro 8. Análisis ultimo y próximo del cisco de café	55
Cuadro 9. Resultados cálculo a mínima fluidización para arena	63
Cuadro 10. Resultados cálculo a mínima fluidización para las partículas de cisco de café	63
Cuadro 11. Resultados cálculo para la transferencia de calor	64
Cuadro 12. Resultados para el diseño del plato distribuidor	65
Cuadro 13. Resultados de pérdidas en la cámara de fluidización	65
Cuadro 14. Resultados de pérdidas en accesorios	65
Cuadro 15. Cuantificación de pérdidas	66
Cuadro 16. Resultados para el análisis termodinámico	67
Cuadro 17. Resultados para el diseño del tornillo sin fin	68
Cuadro 18. Flujos máxicos de biomasa	71
Cuadro 19. Pruebas de fluidización	72
Cuadro 20. Resultados para la quema de cisco de café	73

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Fotografía 1. Reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio	69
Fotografía 2. Cisco de café	73
Fotografía 3. Prueba de combustión llama directa	73
Fotografía 4. Muestras después de la prueba de combustión	74
Fotografía 5. Hélices dobladas	75
Fotografía 6. Manivela del pistón fracturada	76

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Análisis del plato distribuidor por elementos finitos	82
Anexo B. Planos del reactor	88
Anexo C. Guía de laboratorio	129
Anexo D. Tutorial para los programas de Arduino y CoolTerm	133

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO PARA COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL A ESCALA DE LABORATORIO\*

**AUTOR:** KAREN DAYANA CALA ESTÉVEZ, JORGE ORLANDO CAMARGO MÉNDEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** LECHO FLUIDIZADO, COMBUSTIÓN, BIOMASA, VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN.

**DESCRIPCIÓN:** Colombia es uno de los principales productores de café en el mundo, debido a la alta producción se generan grandes cantidades de desechos orgánicos los cuales en la mayoría de los casos no son tratados adecuadamente y contribuyen a la contaminación ambiental en forma de gases de efecto invernadero durante el proceso de descomposición, la situación actual es crítica y, por lo tanto, es necesario implementar energías renovables.

El cisco de café presenta un bajo contenido de humedad y un alto poder calorífico, propiedades óptimas para ser utilizadas en aplicaciones térmicas, como por ejemplo la combustión propuesta en el presente proyecto, a manera de alternativa viable para reemplazar los combustibles tradicionales y a su vez una forma para generar energía.

La combustión por lecho fluidizado es una técnica cuyo mecanismo de transferencia de calor es la convección de alta eficiencia, para llevar a cabo este proceso se diseñó un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio, el cual requiere principalmente de una cámara de fluidización, un compresor para brindar el flujo de aire necesario a fin de que las partículas en el lecho leviten, un sistema de filtración de partículas y una cámara de combustión que suministre suficiente energía calórica. Cabe resaltar que en este diseño fue primordial determinar algunos parámetros físicos e hidrodinámicos de las partículas en el lecho tales como: tamaño de partícula, esfericidad, densidad de partícula, entre otros y también ciertos parámetros de fluidización.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías físicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez PhD en ingeniería química, ingeniero mecánico.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FLUIDIZED BED REACTOR FOR COMBUSTION OF RESIDUAL BIOMASS AT LABORATORY SCALE\*

**AUTHOR:** KAREN DAYANA CALA ESTÉVEZ, JORGE ORLANDO CAMARGO MÉNDEZ\*\*

**KEY WORDS:** FLUIDIZED BED, COMBUSTION, BIOMASS, MÍNIMUM FLUIDIZATION SPEED.

**DESCRIPTION:** Colombia is one of the main coffee producers in the world, due to its high production, large amounts of organic waste are generated which in most cases are largely not treated properly and contribute to environmental pollution in the form of greenhouse gases during the process decomposition, the current situation is critical and therefore, it is necessary to implement renewable energies.

The coffee cisco has a low moisture content and a high calorific value, optimal properties to be used in the thermal applications, such as the combustion proposed in this project, as a viable alternative to replace traditional fuels and in turn a way to generate energy.

Fluidized bed combustion is a technique whose heat transfer mechanism is high efficiency convection, to carry out this process a laboratory scale fluidized bed reactor was designed, which mainly requires a fluidization chamber a compressor to provide the necessary air flow for the particles in the bed to levitate, a particle filtration system and a combustion chamber that supplies sufficient heat energy. It should be noted that in this design it was essential to determine some physical and hydrodynamic parameters of the particles in the bed such as: particle size, sphericity, among others, and also certain fluidization parameters.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physics mechanical engineering. School of Mechanical engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. PhD in chemical engineering, mechanical engineer.

## INTRODUCCIÓN

La emisión de gases de efecto invernadero a la atmosfera es una de las principales causas del cambio climático que ha afectado durante los últimos tres siglos al planeta Tierra, la causa principal de dichas emisiones de gases se debe a la gran producción de energías no renovables y quema de basuras, otro factor influyente es la concentración de estas las cuales no solamente generan un daño a la atmosfera, sino que también afectan directamente al ecosistema que se encuentra a los alrededores. Por ello, se hace necesario la reducción de dichas basuras, buscar herramientas para ejecutar el correcto tratamiento de residuos e implementar nuevas alternativas de manejo para desechos orgánicos, buscando extraer de los mismos materiales reciclables, generación de energía y/o combustibles a partir de su tratamiento termico.

La biomasa se puede utilizar en todos los ámbitos, en vista de que es posible encontrar desde instalaciones de pequeño tamaño para uso doméstico como por ejemplo chimeneas u hogares de leña, de tamaño mediano como calefacciones para granjas, o de gran tamaño en centrales térmicas. La biomasa pretende ser un sector clave a la hora de alcanzar objetivos en materia de energías renovables y sostenibilidad; al igual que otras energías renovables, permite disminuir la dependencia energética externa, además de ello favorece el mantenimiento y diversificación del sector forestal, contribuyendo al desarrollo de empleo especialmente en el ámbito rural.

El presente proyecto de investigación se realiza con el fin de profundizar en el estudio de los reactores de lecho fluidizado y aportar información valiosa en su diseño, a partir de una experiencia de laboratorio debido a que es una herramienta de aprendizaje, la cual permite comprender de una forma más sencilla el

fenómeno en estudio. Es importante ampliar el conocimiento en este campo ya que es un mecanismo por medio del cual se reducen significativamente los niveles de contaminación ambiental generando energía alternativa; diseñar un micro reactor de lecho fluidizado que trabaje con gas natural, de buen rendimiento termico y buscando una manufactura que permita su fabricación asequible es una alternativa que soluciona el problema base.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio para combustión de biomasa residual, para el laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un micro reactor de lecho fluidizado para la combustión de biomasa que cumpla con las siguientes especificaciones:
  - Flujo másico de biomasa entre 4Kg/h y 8 Kg/h
  - Caudal de gas de reacción entre 0.04 m<sup>3</sup>/s y 0.1 m<sup>3</sup>/s
  - Relación en masa inerte/biomasa entre 5 y 10%
  - Humedad de solido entre 5 y 20%
- Determinar la eficiencia en el diseño y validar el correcto funcionamiento del reactor por medio de su puesta en marcha.
- Crear la práctica de laboratorio para estudio del fenómeno de la combustión por fluidización a través del uso del dispositivo por parte del estudiante.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 MARCO REFERENCIAL

**2.1.1 Antecedentes de la investigación** En esta sección se realizó un análisis y recopilación de información relacionada con investigaciones previas, las cuales son de gran utilidad para realizar este diseño, con el fin de tener una visión más amplia y detallada del contexto en el cual se llevará a cabo esta investigación, a su vez obtener guías que faciliten y sustenten el desarrollo de la presente propuesta. En la última década el avance y la implementación de esta tecnología para creación de energías alternativas ha sido fatal en nuestro país, a pesar de que actualmente los niveles de contaminación son alarmantes y se ve la necesidad de reducir el impacto ambiental.

#### 2.1.1.2 Antecedentes internacionales

- En la Universidad San Francisco de Quito Castellanos<sup>1</sup> realizó el “diseño y construcción de un reactor de lecho fluidizado para el estudio de mezcla y segregación de gases y sólidos”, en el cual se llevó a cabo el diseño del reactor de lecho fluidizado con el software Autodesk Inventor Professional 2015. Los materiales utilizados para los experimentos fueron microesferas de vidrio de 400 a 800 micras de diámetro y cascara de nuez molida con

---

<sup>1</sup>CASTELLANOS JUAN P. Diseño y construcción de un reactor de lecho fluidizado para el estudio de mezcla y segregación de gases y sólidos. San Francisco de Quito : s.n., 2015.

diámetros mayores a 800 micras, con densidades de 2500 y 1440 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Se escogieron tres distintas presiones: 22.5, 30 y 45 psi, para cada presión se trabajó con diferentes porcentajes de volumen de los materiales (microesferas/nuez) en el lecho siendo 25/75, 50/50, 75/25.

Se llevaron a cabo 12 experimentos cambiando las proporciones de mezcla y nuez, en los resultados se observó que el diseño del distribuidor ocasiono la existencia de zonas muertas dentro del reactor lo que ocasiona un bajo contacto entre el material y el gas, lo que puede generar deficiencias en el rendimiento del reactor, a su vez los resultados obtenidos en los experimentos mostraron diferentes comportamientos del lecho en función de la configuración del mismo, se pudo observar mezclas heterogéneas con tendencia a una segregación del lecho, teniendo al final depósitos de micro esferas en las paredes del lecho con pequeños porcentajes de cáscaras de nuez.

- Por otro lado, Caro<sup>2</sup> ejecutó el “diseño y construcción de lecho fluido de laboratorio para una planta piloto” en la Universidad de Sevilla se logró el objetivo principal que era la construcción de dicho reactor, aunque se presentaron varios inconvenientes, uno de ellos fue en los ventiladores los cuales se seleccionaron de forma inadecuada ya que no cumplían con la carga requerida, esto se debe a que las curvas reales no eran similares con las teóricas.

Las tuberías dispuestas al principio se tuvieron que cambiar, al igual que los medidores de flujo de aire, debido a que las tuberías tenían diámetro pequeño y los medidores gran densidad del flotador, introducían una alta

---

<sup>2</sup> CARO JOSÉ RAMÓN. Diseño y construcción de un reactor de lecho fluido para una planta piloto. Sevilla : s.n., 2014.

perdida de carga; la solución fue aumentar el diámetro de las tuberías y cambiar los medidores de flujo.

No se realizaron pruebas experimentales, para trabajos futuros sería útil ejecutar dichas pruebas en las que se estudie la variación del comportamiento del lecho al variar la geometría de la columna, es decir, variando la altura de esta, y ver así que resultado se obtiene con esta nueva disposición.

- Se analizó la investigación de Marrupe<sup>3</sup> quien realizó el “Diseño de un reactor de lecho fluidizado para la transformación termoquímica de biomasa u otros combustibles” en la Universidad Carlos III de Madrid. El proyecto realizado en este apartado tuvo como objetivo conocer la influencia de los patrones de flujo de las burbujas de distintas configuraciones de disposición de agujeros, homogéneamente distribuidos, de un distribuidor de orificios múltiples con una pérdida de carga igual para todas las configuraciones, que actúan bajo las mismas condiciones de operación. El estudio del proyecto se realizó en un reactor bidimensional en el que se hicieron fluidizar microesferas de vidrio mediante aire. Para ello utilizaron señales de presión a través de dos sensores de presión en el plenum y en la columna del reactor. Se tomaron imágenes referentes a los patrones de flujo de burbujas, en las cuales utilizaron MATLAB con el fin de obtener la imagen final promedio en escala de grises para cada una de las condiciones de operación analizadas. Finalmente, se concluyó que no existían diferencias significativas entre las frecuencias características de las distintas configuraciones analizadas bajo las mismas condiciones de operación. A su vez, se concluye que, bajo las mismas condiciones de

---

<sup>3</sup> MARRUPE DANIEL. Diseño de un reactor de lecho fluidizado para la transformación termoquímica de biomasa u otros combustibles. Madrid : s.n., 2014

operación, los patrones de flujo de las burbujas de las distintas configuraciones de agujeros presentan las mismas características generales asemejándose al modelo de ascenso de una columna central. La diferencia principal radica en la altura a la que se produce el tránsito al modelo de una columna: La altura a la que se produce el tránsito es menor cuanto mayor es el número de agujeros juntos en cada terna de agujeros. Es decir, más predominante es el modelo de ascenso de una columna central.

### **2.1.1.3 Antecedentes Nacionales**

- Continuando con la investigación referente al tema a nivel nacional Flórez<sup>4</sup> realizó el “Diseño conceptual de un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales” en la Universidad EAFIT de Medellín. En el proyecto se diseñó un reactor de lecho fluidizado con el objetivo de tratar aguas residuales y eliminar sustancias nocivas para la salud, enfocándose principalmente en el cianuro. Por medio de un algoritmo de diseño para un reactor fluidizado de tres fases donde se supone un diámetro de reactor, se calculan velocidades superficiales de gas y líquido, número de Reynolds, velocidad terminal, entre otras variables físicas necesarias para el diseño, se lograron comparar las diferentes características del reactor pero no ofrecieron una conclusión sólida sobre ventajas claras del tratamiento del agua, debido a esto realizaron el mismo análisis variando el diámetro del reactor encontrando mejores condiciones para la fluidización y resultados finales en la composición del agua. Se realizaron cálculos para diferentes diámetros en un rango de 0.15 a 0.35 metros, se encontró que al aumentar el diámetro del biorreactor y al

---

<sup>4</sup> FLOREZ DIANA y Juliana Posada. Diseño conceptual de un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales. Medellín : s.n., 2007.

mantener constante el caudal de entrada del agua residual y del gas, las velocidades superficiales disminuyen; debido a que el fluido tiene un área transversal mayor por donde pasar.

También se observó que al aumentar el diámetro del biorreactor existe un aumento en el área transversal, lo cual implica una mayor cantidad de partículas cuyo peso debe ser superado por la velocidad mínima de fluidización. Por esto, al aumentar el diámetro es necesario aumentar la velocidad mínima de fluidización. Como conclusión principal se tiene de acuerdo con el aumento del diámetro se ve claramente una tendencia descendente en la altura del lecho y del reactor.

- En la Universidad Autónoma de Occidente en Santiago de Cali Valle<sup>5</sup> realizó el “Diseño de un horno de lecho fluidizado para tratamientos térmicos”. Para el diseño del reactor se establecieron parámetros iniciales tales como el tipo de lecho (Burbujeante), el diámetro de lecho de 1m, partículas inertes de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que facilitan la transferencia de calor y propano como combustible. Las piezas a las que se les realizó el tratamiento tienen medidas inferiores a 1m. En la etapa del diseño encontraron la velocidad mínima de fluidización, el coeficiente aparente de calor, seleccionaron los equipos complementarios para el funcionamiento del horno como lo son el ventilador para el sistema de fluidización y el quemador, finalmente para la representación paramétrica del horno se realizó mediante el software Solid Edge y FEA ALGOR para el análisis de esfuerzos y deflexiones para el plato distribuidor.

---

<sup>5</sup> VALLE MANUEL. Diseño de un horno de lecho fluidizado para tratamientos térmicos. Santiago de Cali : s.n., 2005.

- En la ciudad de Bucaramanga González, Prieto y Mercado<sup>6</sup> en la Universidad Industrial de Santander realizaron la simulación “Large Eddy Simulation (LES) Aplicado a un lecho fluidizado gas – sólido. Parte I: Reactor a escala de laboratorio” En este trabajo se estudió el comportamiento fluido dinámico gas-sólido, usando técnicas computacionales de Dinámica de Fluidos (CFD) en un lecho fluidizado a escala de laboratorio de 1 m de longitud y 5 cm de altura de lecho, se implementó la metodología de Large Eddy simulation (LES) y mallas casi-uniformes construidas previo cálculo de las microescalas turbulentas. Las simulaciones fueron validadas con datos de la literatura, logrando describir el comportamiento de descenso de partículas (annulus), sin necesidad de refinamiento cerca de la pared y mejorando el tiempo de cómputo en comparaciones con simulaciones realizadas usando RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes)

Para llevar a cabo los cálculos, el flujo de aire se consideró a la temperatura y presión ambiente para tres velocidades del gas. La metodología que se utilizó para la construcción de la malla casi uniforme, basada en la relación de escalas, beneficia en gran medida la eficiencia en las simulaciones ya que fue posible disminuir en tiempo computacional.

Se observó que es difícil resolver las microescalas de un sistema de partículas y aún imposible resolver para un sistema gaseoso. Por este motivo, actualmente sólo es posible resolver y describir meso escalas de turbulencia caracterizadas en el caso del flujo de gas-sólido por clúster y strands.

---

<sup>6</sup> GONZÁLEZ GERMAN, Natalia Prieto y MERCADO IVAN. Large Eddy Simulation aplicado a un lecho fluidizado gas-sólido Parte 1. Bucaramanga : s.n., 2018.

## 2.2 MARCO TEÓRICO

Según los autores Daizo Kunii y Octave Levenspiel <sup>7</sup>en su libro Ingeniería de fluidización hablan de las principales teorías y conceptos que abarca el fenómeno de la fluidización, las diferentes aplicaciones en las que se usan los lechos fluidizados, a su vez exponen las ventajas y desventajas de estos. A continuación, se muestra un resumen de los conceptos básicos para realizar este proyecto.

**2.2.1 Lecho fluidizado** La fluidización es el fenómeno en el cual un lecho de partículas sólidas pequeñas se suspende en el seno de un fluido, puede ser gas o líquido de tal forma que su comportamiento sea semejante al de el fluido. Si el fluido se mueve ascendentemente y a baja velocidad pasa por medio de un lecho de partículas finas, dicho fluido se filtra a través de los espacios de las partículas que están estacionarias, este lecho recibe el nombre de lecho fijo. Si se aumenta la velocidad del fluido las partículas se moverán independientemente por medio de pequeñas vibraciones.

Si sigue aumentando la velocidad del fluido, el lecho llega a un punto en el que todas sus partículas están en suspensión debido al flujo ascendente del fluido, en este punto la fuerza de fricción entre las partículas y el fluido se contrarresta con el peso de las partículas; la componente vertical de la fuerza de compresión entre las partículas adyacentes desaparece y la pérdida de carga a través de un volumen determinado de lecho es igual al peso de las partículas existentes en ese volumen por unidad de área. Este tipo de lecho se denomina lecho a mínima fluidización, denota el cambio entre lecho fijo y lecho totalmente fluidizado, en este punto la velocidad recibe el nombre de velocidad mínima de fluidización.

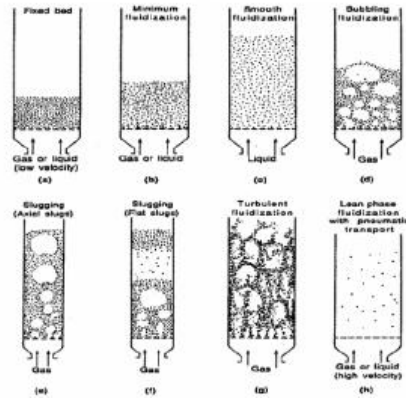
---

<sup>7</sup>KUNII DAIZO y Octave Levenspiel. *Fluidization Engineering*. 2 ed. Boston : s.n., 1923. ISBN 0-409-90233-0.

Los sistemas fluidizados por gas se comportan de manera diferente a los fluidizados por líquido. Con un incremento de la velocidad por encima de la velocidad de mínima fluidización, se observan grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales de aire. A velocidades mayores del gas se producen mayores agitaciones y el movimiento de los sólidos comienza a ser más turbulento, el lecho no se expande considerablemente en comparación a la expansión que se logra con la velocidad mínima de fluidización, este lecho recibe el nombre de lecho burbujeante.

En los sistemas fluidizados por gas, a velocidades mayores de la velocidad de la mínima fluidización, se produce la coalescencia de las burbujas y su crecimiento conforme van subiendo a través del lecho. En lechos largos y de pequeño diámetro, las burbujas llegan a ser tan grandes como para extenderse casi todo el diámetro del reactor. Este fenómeno se conoce como Slugging. Las burbujas cuyo diámetro es próximo al del reactor se denominan slugs. Cuando las partículas son pequeñas, éstas descienden suavemente entre las paredes del reactor y la burbuja. Este comportamiento se conoce como Slugging con slugs axiales. Cuando las partículas tienen mucho grosor, la porción del lecho que se encuentra por encima de la burbuja es empujada hacia arriba como si lo hiciese un pistón. Las partículas en este caso descienden y la slug se desintegra. A partir de ese momento comienza a formarse otra slug, repitiéndose el mismo proceso. Este comportamiento se denomina Slugging con slugs de pared.

Figura 1. Tipos de fluidización



Fuente: KUNII DAIZO y Octave Levenspiel. Fluidization Engineering. 2 ed. Boston : s.n., 1973. p.2 .ISBN 0-409-90233-0.

**2.2.2 Propiedades del lecho fluidizado** Existen propiedades del lecho y a su vez propiedades de las partículas, las cuales son necesarias para llevar a cabo el presente estudio y sus respectivos cálculos:

**2.2.2.2 Densidad de partícula ( $\rho_p$ )** La densidad de partícula es la relación que existe entre la masa de una muestra y el volumen ocupado por la misma.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (2.1)$$

Donde:

$m_p$  , representa la masa de una partícula

$V_p$  , representa el volumen de la partícula

**2.2.2.3 Porosidad del lecho o fracción de vacío ( $\epsilon_m$ )** La porosidad del lecho depende de la relación existente entre el diámetro de partícula, el diámetro del

lecho, la rugosidad de las paredes de la columna, la presión y la temperatura de operación.

**2.2.2.4 Diámetro equivalente ( $d_{eq}$ )** Una esfera cuyo volumen es igual al volumen de un grano se define como una esfera equivalente, el diámetro de la esfera de volumen equivalente se define como el diámetro equivalente del núcleo, se calcula con el volumen unitario de partícula.

$$d_{eq} = \frac{6 * Vu}{\pi} \quad (2.2)$$

**2.2.2.5 Esfericidad de la partícula ( $\Phi$ )** Es un parámetro que se utiliza para determinar la forma de las partículas. Se debe considerar que no todas las partículas son totalmente esféricas, la mayoría de las partículas utilizadas en lechos fluidizados son irregulares, motivo por el cual se establece una definición para obtener la esfericidad, la cual se basa en el área superficial de una esfera con el mismo volumen que el de una partícula.

$$\Phi = \frac{\text{Area superficial de una esfera con el mismo volumen de la partícula}}{\text{Area superficial de la partícula}} \quad (2.3)$$

**2.2.2.6 Tamaño de la partícula ( $d_p$ )** Si la partícula es esférica se emplea su diámetro, para partículas irregulares o no esféricas, el tamaño viene expresado por:

$$d_p = \Phi * d_{eq} \quad (2.4)$$

**2.2.2.7 Porosidad a mínima fluidización ( $\epsilon_{mf}$ )** La porosidad mínima está en función de la forma, tamaño de partículas y generalmente disminuye a medida que

el diámetro se incrementa, para partículas esféricas toma valores entre 0.4 y 0.5. En ausencia de datos se puede estimar la porosidad a mínima fluidización por medio de las siguientes ecuaciones empíricas sugeridas por Wen y Yung:

$$14 = \frac{1}{\Phi \cdot \varepsilon_{mf}^2} \quad (2.5)$$

Experimentalmente se puede medir la altura inicial del lecho ( $L$ ) y la altura en condiciones de mínima fluidización ( $L_{mf}$ ) y usar la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{L \cdot (1 - \varepsilon_m)}{L_{mf}} \quad (2.6)$$

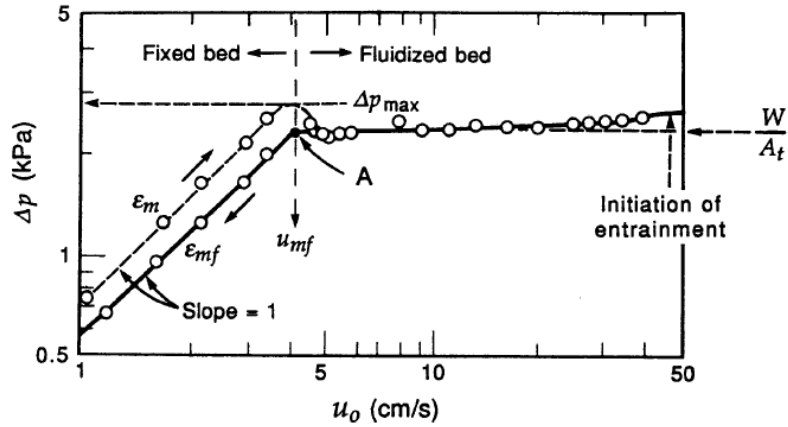
**2.2.2.8 Caída de presión del lecho fluidizado** Cuando un fluido se mueve en sentido ascendente a través de un lecho fijo de partículas experimenta una pérdida de carga gracias a la fricción, en este caso el fluido es un gas; dicha pérdida aumenta con el incremento de su velocidad. Sin embargo, se alcanza un punto donde el empuje que el gas ejerce sobre el lecho se iguala con el peso. En este punto las partículas se encuentran suspendidas por el gas, de modo que la separación entre ellas aumenta y el lecho comienza a fluidizar.

$$\Delta p = (L_{mf} \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_g)) \cdot g \quad (2.7)$$

Como se mencionó anteriormente la pérdida de carga a través del lecho depende de la velocidad superficial del gas, este comportamiento se puede observar en la figura 2 la curva presenta diferente forma según como varíe la velocidad del gas en sentido ascendente o descendente.

En sentido ascendente existe mayor pérdida de carga ya que se deben vencer las fuerzas de atracción entre las partículas del lecho. En sentido descendente no se presenta este comportamiento debido a que se parte del estado de lecho fluidizado, y ya se superaron dichas fuerzas entre las partículas.

Figura 2. Comportamiento de la pérdida de carga en el lecho respecto a la velocidad superficial del gas



Fuente: KUNII DAIZO y Octave Levenspiel. Fluidization Engineering. 2 ed. Boston : s.n., 1923. p.71 .ISBN 0-409-90233-0.

Para los tramos de la curva correspondientes a lecho fijo donde la separación de partículas es constante, la relación entre la pérdida de carga y la velocidad superficial del gas se determina por medio de la ecuación de Ergun, en este caso aplicada en el punto A de la figura 2

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 * \mu_g * U_{mf} * (1 - \epsilon_{mf})^2}{(d_p * \Phi)^2 * \epsilon_{mf}^3} + \frac{1.75 * \rho_g * U_{mf}^2 * (1 - \epsilon_{mf})}{d_p * \Phi * \epsilon_{mf}^3} \quad (2.8)$$

En condiciones de flujo laminar donde el número de Reynolds es menor a 20 domina el primer término de la ecuación lo cual indica que la pérdida de carga aumenta de forma lineal con la velocidad superficial del gas y es independiente de su densidad. Para flujo turbulento donde el número de Reynolds es mayor a 1000 domina el segundo término y la pérdida de carga aumenta con el cuadrado de la velocidad, siendo independiente de la viscosidad del gas.

$$Rep = \frac{U_{mf} * d_p * \rho_g}{\mu_g} \quad (2.9)$$

**2.2.2.9 Velocidad mínima de fluidización ( $U_{mf}$ )** Es la velocidad superficial del gas a la cual el lecho comienza a fluidizar. Experimentalmente se ha observado que depende del tamaño y la densidad de las partículas en el lecho, de las propiedades del gas fluidizante, finalmente de las condiciones de presión y temperatura en las que se lleva a cabo el proceso.

La velocidad mínima de fluidización define el paso del estado de lecho fijo al de lecho fluidizado. Para su cálculo se deben igualar las expresiones de pérdida de carga para lecho fijo y la pérdida de carga en un lecho fluidizado. Es decir, en el punto A de la figura 2 se realiza dicha igualación.

$$((1 - \epsilon_{mf}) * (\rho_p * p_g)) * g = \frac{150 * \mu_g * U_{mf} * (1 - \epsilon_{mf})^2}{(d_p * \Phi)^2 * \epsilon_{mf}^3} + \frac{1.75 * \rho_g * U_{mf}^2 * (1 - \epsilon_{mf})}{d_p * \Phi * \epsilon_{mf}^3} \quad (2.10)$$

Con esta expresión se determina la velocidad de mínima fluidización una vez sean conocidas todas la propiedades de las partículas y del fluido.

**2.2.2.10 Velocidad terminal de partículas ( $U_t$ )** Una vez que se ha alcanzado la velocidad mínima de fluidización, si se sigue incrementando la velocidad llegará un momento en que las partículas sean arrastradas por el fluido, alcanzándose lo que se denomina velocidad terminal. Si se aumenta el flujo por encima de la velocidad terminal, tiene lugar el denominado arrastre o transporte neumático de partículas, dejando de existir el lecho fluidizado. Para una partícula aislada, la velocidad terminal viene dada por la aplicación de un balance de cantidad de movimiento, cuya expresión final es:

$$U_t = \left( \frac{4 * d_p * (\rho_p - \rho_g) * g}{3 * \rho_g * C_D} \right)^{0.5} \quad (2.11)$$

Donde  $C_D$  es un coeficiente de arrastre y viene dado por la ecuación (2.12)

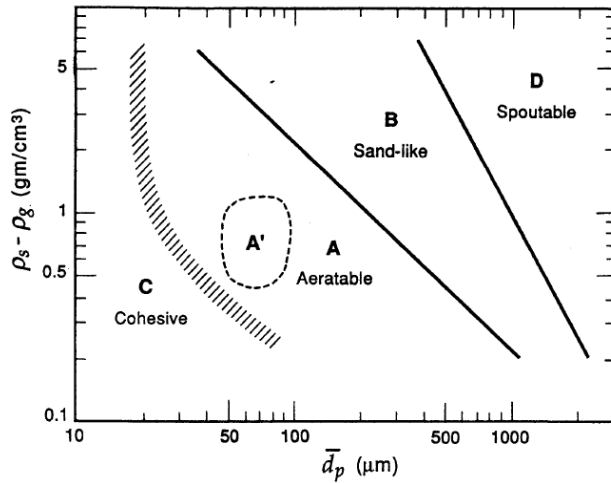
$$CD = \frac{24}{Rep} * (1 + 8.1716 * e^{(-4.0655 * \phi)}) * Rep^{(0.0964 + 0.5565 * \phi)} + \frac{73.69 * Rep * e^{(-5.0748 * \phi)}}{Rep + 5.378 * e^{(-6.2122 * \phi)}}$$

**2.2.3 Clasificación de partículas** Se ha determinado que las partículas no son totalmente esféricas, a partir de experimentos con lechos fluidizados se ha observado que no todos los materiales fluidizan de la misma manera, por esta razón Geldart propuso clasificar las partículas según sus propiedades de fluidización a condiciones ambiente en cuatro categorías, esta clasificación de partículas es en función de la densidad y el tamaño de la partícula.

Las partículas que al ser fluidizadas por aire en condiciones ambiente muestran un estado de fluidización no burbujeante a la velocidad de mínima fluidización, seguido de un estado burbujeante a medida que la velocidad de fluidización aumenta, se clasifican dentro del Grupo A. Las partículas que bajo estas condiciones muestran únicamente fluidización burbujeante forman el Grupo B. El Grupo C lo constituyen partículas muy finas, que son incapaces de fluidizar en sentido estricto. Finalmente, en el Grupo D se incluyen las partículas de gran tamaño que se caracterizan por formar lechos de chorro.

La fluidización burbujeante es la más común, debido al rango de velocidades del gas de fluidización en el que tiene lugar el estado no burbujeante con partículas del grupo A es reducido, la velocidad superficial del gas a la que aparecen las primeras burbujas se conoce como velocidad mínima de burbujeo.

Figura 3. Clasificación de partículas de Geldart



Fuente: KUNII DAIZO y Octave Levenspiel. Fluidization Engineering. 2 ed. Boston : s.n., 1923. p.78 .ISBN 0-409-90233-0.

Grupo A La velocidad mínima de burbujeo es mayor a la velocidad mínima de fluidización, las burbujas se dividen y coleasen continuamente existiendo un tamaño máximo de burbuja, la fluidización es suave y de calidad.

Grupos B y D La velocidad mínima de burbujeo es igual a la velocidad mínima de fluidización, las burbujas crecen de manera continua sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado, solo el que delimita el ancho del lecho. Por ello, la fluidización es de peor calidad y se producen mayores fluctuaciones de presión.

Grupo C Las fuerzas entre las partículas son grandes en comparación con las fuerzas de inercia del gas. Por lo tanto, las partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria y no se produce la fluidización. No aparecen burbujas, por el contrario, se forman canales por los que fluye el gas a través del lecho. Aun así, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o mediante vibración.

Cuadro 1. Clasificación de partículas de Geldart

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización. Muestra un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo en mínima fluidización	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Tamaño elevado
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina, cemento	Graba, granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de des aireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbuja sin tamaño limite	No hay burbujas, solo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño limite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Solo en lechos poco profundos	No	Si, incluso en lechos profundos

Fuente: PINTO, LUIS ARNULFO PINZÓN. 2014. Diseño y construcción de una tostadora de café por lecho fluidizado . Bucaramenga : s.n., 2014.

## 2.3 MARCO CONCEPTUAL

**2.3.1 Biomasa** Según la real academia española<sup>8</sup> la biomasa se define como “Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.” Esta materia puede ser de origen vegetal o

<sup>8</sup>Real academia española. Biomasa [en línea]. Madrid : s.n., 2020. Disponible en: <https://dle.rae.es/biomasa>

animal, incluyendo también los desechos orgánicos que son producidos por una sociedad. Gracias a esta definición se pueden descartar los combustibles fósiles, así como sus derivados. García <sup>9</sup> determina que la biomasa es aquella sustancia originada por el sol a través de la fotosíntesis de los vegetales.

**2.3.2 Combustión** Para Salvi<sup>10</sup> la combustión puede entenderse como toda reacción química, relativamente rápida, de carácter notablemente exotérmico, que se desarrolla en fase gaseosa o heterogénea (líquido-gas, sólido-gas) con o sin manifestación de llamas o de radiaciones visibles.

**2.3.3 Energías alternativas** Factorenergía<sup>11</sup> establece que también son conocidas como energías renovables, las energías alternativas refieren a una forma no contaminante de producir energía, buscan sustituir la energía nuclear o la producida por combustibles fósiles que son actualmente las más usadas.

**2.3.4 Fluidización** La fluidización es la operación mediante la cual las partículas sólidas se transforman en un estado similar a un fluido a través de la suspensión en un gas o líquido <sup>12</sup>.

**2.3.5 Reacción exotérmica** Se denomina reacción exotérmica a cualquier reacción química que desprenda energía, ya sea como luz o calor. <sup>13</sup>

---

<sup>9</sup>GARCIA SANTIAGO. *Centrales termoeléctricas de biomasa*. s.l. : RENOVETEC. 2013. ISBN: 978-84-616-1557-5.

<sup>10</sup> SALVI, GIULIANO. *La combustión: Teoría y aplicaciones*. s.l. : Dossat, 1975. ISBN: 8423704254, 9788423704255.

<sup>11</sup>Factorenergia. Energías alternativas: Qué son y qué tipos existen. [en línea] 2016. Disponible en: <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/que-son-energias-alternativas/>

<sup>12</sup> KUNII, Óp. Cit., p 22

<sup>13</sup> Seese, G William Daub y William. *Química*. México : Pearson educación, 2005.

## 3. MÉTODO

### 3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para esta etapa del diseño se recurrió a distintas fuentes de información tales como: Proyectos de investigación, libros, artículos y revistas científicas. A partir de este análisis bibliográfico se obtuvo una orientación sobre el dimensionamiento y parámetros de diseño del equipo.

En esta fase del diseño se afianzaron los conocimientos teóricos para llevar a cabo el proyecto, se establecieron especificaciones técnicas, se determinó los materiales e insumos requeridos, de igual manera se definió el alcance de trabajo del reactor, y finalmente se analizaron las metodologías pertinentes para elaborar la guía de laboratorio.

### 3.2. METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS

**3.2.1 Objetivo 1** Diseñar un micro reactor de lecho fluidizado para la combustión de biomasa que cumpla con las siguientes especificaciones:

- ✓ Flujo másico de biomasa entre 4 Kg/h y 8 Kg/h
- ✓ Caudal de gas de reacción entre 0.04 m<sup>3</sup>/s y 0.1 m<sup>3</sup>/s
- ✓ Relación de masa inerte/biomasa entre 5% y 10%
- ✓ Humedad del sólido entre 5% y 20 %

Para el cumplimiento del presente objetivo se realizaron todas las etapas del proceso básico de diseño, de la siguiente manera:

- *Actividad 1:* Se realizó la selección de alternativas, de todos los componentes del reactor, para el diseño en detalle se ejecutaron los respectivos cálculos, tales como: velocidad mínima de fluidización, velocidad de burbujeo, velocidad terminal de partícula entre otros, junto con la elaboración de planos y finalmente la construcción del micro reactor.
- *Entregable:* Informe completo con los cálculos tipo, planos y entrega del equipo.
- *Actividad 2:* Toma de datos y mediciones en el laboratorio de combustión
  - ✓ Para garantizar el flujo másico se hará uso de una balanza gramera y un cronometro.
  - ✓ El caudal de gas de reacción será calculado una vez medida la velocidad de los gases con un anemómetro suministrado por el laboratorio y establecido el valor del área de la tubería
  - ✓ En la relación masa inerte/biomasa se realizará la medición de cada compuesto, de tal manera que se obtenga la proporción deseada
  - ✓ Para alcanzar el nivel de humedad deseado se realiza un proceso de secado por convección natural
- *Entregable:* Toma de datos del reactor, Informe con los resultados obtenidos en esta prueba.

**3.2.2 Objetivo 2** Determinar la eficiencia en el diseño y validar el correcto funcionamiento del reactor por medio de su puesta en marcha.

- *Actividad 1:* Inicialmente se propuso poner en marcha el equipo para determinar la eficiencia del diseño, de igual manera realizar una comparación entre el diseño propuesto y el combustor de lecho fijo

disponible en el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica, teniendo en cuenta algunos parámetros como: El tiempo de quema, caudal de gas de reacción producido y potencia de consumo de cada equipo. No fue posible cumplir con este objetivo por dificultades y contratiempos explicados en la sección de pruebas, capítulo 7.

**3.2.3 Objetivo 3** Crear la práctica de laboratorio para estudio del fenómeno de la combustión por fluidización a través del uso del dispositivo por parte del estudiante.

- *Actividad 1:* Se realizó el documento, el cual está conformado por introducción, objetivo general, objetivos específicos, marco teórico, partes del banco, procedimiento a realizar durante la experiencia, y finalmente la guía para cálculos.
- *Entregable:* Guía de laboratorio.

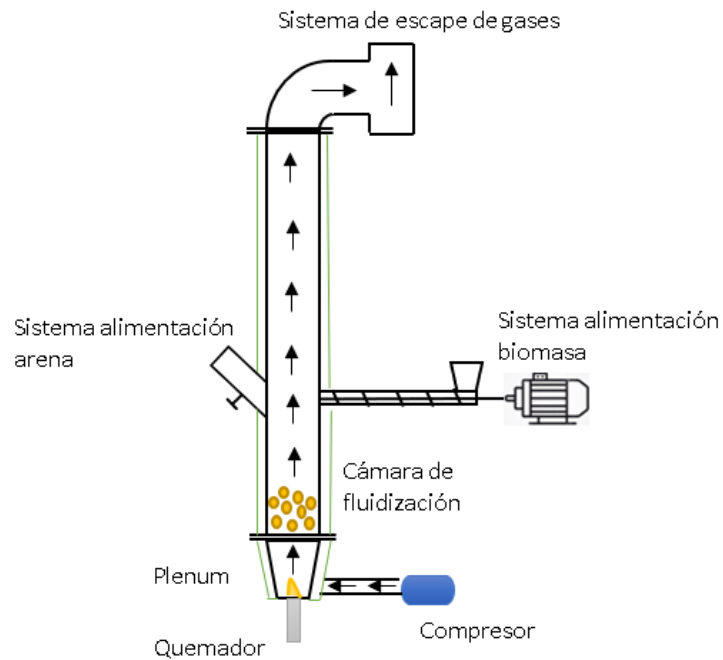
## 4. DISEÑO

### 4.1 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

El presente proyecto tiene como propósito recolectar la mayor información sobre el diseño y construcción de reactores por lecho fluidizado para profundizar y afianzar el conocimiento relacionado con el área en cuestión y de esta manera implementar una nueva alternativa de manejo para desechos orgánicos, por lo tanto, se diseña el micro reactor de lecho fluidizado para combustión de biomasa residual.

Se evaluaron algunos diseños previos y posteriormente se logró el diseño conceptual ilustrado en la figura 4, el cual requiere de los siguientes elementos:

Figura 4. Diseño conceptual del reactor



Fuente: Elaboración propia

**4.1.2 Cámara de fluidización** Es el lugar donde se encuentra el lecho de partículas de arena, se procede a fluidizar el lecho utilizando aire el cual ingresara por la parte inferior del plato distribuidor. Una vez el lecho se encuentre fluidizado se efectúa el ingreso de la biomasa, en este caso cisco de café, para realizar su proceso de combustión, dicho cisco proviene de un sistema de alimentación por medio de un tornillo sin fin.

**4.1.3 Plato distribuidor** Es uno de los principales elementos ya que su función es distribuir uniformemente el fluido en la cámara de fluidización para ello se debe crear una suficiente caída de presión y así lograr fluidizar las partículas de arena.

**4.1.4 Sistema de alimentación de biomasa** Este sistema se encarga de transportar la biomasa hacia la cámara de fluidización, de esta forma se asegura que el flujo masico entrante al reactor es el requerido.

**4.1.5 Sistema de escape de gases y filtración de partículas** En los reactores industriales se utilizan ciclones para realizar la filtración de partículas, en este caso y debido a que el reactor es a escala de laboratorio se usó un filtro sencillo el cual se limita a retener partículas de gran tamaño. En el diseño los gases de combustión deben pasar por el filtro para así garantizar su calidad.

**4.1.6 Compresor** Se requiere de este equipo para suministrar el fluido de trabajo, a su vez incrementar y mantener la velocidad en el lecho; de esta forma garantizar la fluidización de las partículas.

## 4.2 DISEÑO EN DETALLE

En esta etapa del proyecto se realizaron los respectivos cálculos partiendo desde los requerimientos, se propuso un diseño inicial al cual se le aplicaron algunas correcciones y mejoras hasta llegar al diseño final ilustrado en la figura 5.

Figura 5. Diseño final del reactor



Fuente: Elaboración propia

**4.2.1 Determinación de las propiedades del lecho** Para determinar algunas propiedades físicas e hidrodinámicas de las partículas en el lecho, las cuales son fundamentales para este análisis se tomaron del libro engineering fluidization<sup>14</sup>, Algunos parámetros como la fracción de vacío se tomó de la figura 1 pp 64 al igual que la esfericidad de la tabla 1 pp 62, para obtener este diámetro de partícula la arena debe pasar por un tamiz de este tamaño previamente.

---

<sup>14</sup>KUNII, Óp. Cit., p 22

Cuadro 2. Propiedades físicas e hidrodinámicas de la arena

Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$	2659
Diámetro de partícula [m]	$d_p$	0,00056
Esfericidad	$\Phi$	0,86
Fracción de vacío	$\epsilon_m$	0,38
Fracción de vacío en mínima fluidización	$\epsilon_{mf}$	0,44

Fuente: Elaboración propia

Según la información presentada en el cuadro 2, las partículas de arena son tipo B conforme la clasificación de partículas de Geldart.

**4.2.2 Diseño cámara de fluidización** La cámara de fluidización es el subsistema en el cual se lleva a cabo el proceso de fluidización de las partículas en el lecho y a su vez la combustión del cisco de café, por lo tanto, se debe fabricar con materiales resistentes a elevadas temperaturas. La cámara de fluidización se elabora en acero inoxidable AISI 304 ya que es un material austenítico, es decir que sus propiedades no se modifican a altas temperaturas y es económico.

El acero AISI 304 posee las siguientes propiedades mecánicas:

Cuadro 3. Propiedades mecánicas del AISI 304

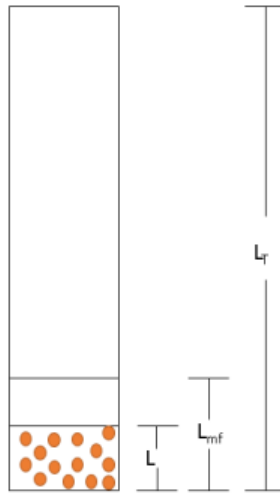
Módulo de elasticidad	189 GPa
Resistencia ultima	568 MPa
Límite de fluencia	235 MPa

Fuente: Acero inoxidable [en línea] Imporinox S.A.S. Disponible en:

<https://imporinox.com/acero-inoxidable/calidades-y-acabados/>

Basados en la literatura y en las investigaciones previas se establecen las dimensiones principales de la cámara de fluidización.

Figura 6. Principales dimensiones de la cámara de fluidización



Fuente: Elaboración propia

**4.2.3 Esfuerzos mecánicos en la cámara de fluidización** Es necesario calcular este parámetro de diseño debido a que la cámara de fluidización debe soportar la presión máxima del sistema, teniendo presente que dicha cámara es un tubo de 4" calibre 14, espesor 1.9 mm lo cual indica que el lecho tiene un diámetro de 0.0976 m.

Se procede a calcular el esfuerzo circunferencial, haciendo la aproximación de que la cámara es un cilindro de pared delgada <sup>15</sup>

$$\delta_c = \frac{\Delta P_{total} * D}{2 * t} \quad (4.1)$$

Reemplazando en la ecuación (4.1) se tiene un esfuerzo circunferencial de: 32,95027 [Kpa]

El esfuerzo longitudinal corresponde a la mitad del esfuerzo circunferencial, teniendo en cuenta las propiedades del material es posible afirmar que la cámara de fluidización cumple con los requerimientos de diseño.

<sup>15</sup> PINTO, LUIS ARNULFO PINZÓN. Diseño y construcción de una tostadora de café por lecho fluidizado . Bucaramanga : s.n., 2014.

**4.2.4 Esfuerzos térmicos en la cámara de fluidización** Debido a la diferencia de temperaturas que se producen en las paredes internas y externas de la cámara de fluidización se producen esfuerzos térmicos, los cuales se establecen por medio de la siguiente expresión <sup>16</sup>

$$\delta_T = E * \alpha * \Delta Temp \quad (4.2)$$

Donde:

$\Delta Temp$  = La diferencia de temperatura es de 255°C, se determina en el análisis de transferencia de calor

$\alpha$  = Coeficiente de dilatación térmica para el acero AISI 304 es de  $17.3 \times 10^{-6}$  [°C<sup>-1</sup>] a 100°C

E = Modulo de elasticidad del AISI 304

Reemplazando en la ecuación (4.2) se tiene un esfuerzo termico de 833,77 [Kpa], el cual está presente en la dirección radial y es inferior al esfuerzo de fluencia, por lo tanto, no existe riesgo de falla por dilatación térmica.

**4.2.5 Cálculos para velocidad mínima de fluidización ( $U_{mf}$ )** Se realizaron los respectivos cálculos, y se asumió un flujo laminar debido a que la cantidad de aire es pequeña con la expresión (2.10) se calculó la velocidad mínima de fluidización y con la expresión (2.9) se comprobó que el flujo si era laminar (ver los resultados en el cuadro 9)

Para este estudio se tomaron los siguientes parámetros de diseño: la presión atmosférica de la ciudad de Bucaramanga y la temperatura de ignición del cisco de 280°C la cual es la temperatura del lecho<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> Ibid., p40

<sup>17</sup> WALDO, JOHANNA MANRIQUE. Estudio de la combustión de pélet de cisco de café . Medellin : s.n., 2018.

Posteriormente se realizó el mismo análisis de fluidización para el cisco de café, con el fin de establecer cuál es la velocidad optima de trabajo, es decir a qué velocidad fluidiza la arena sin que se presente arrastre de partículas tanto de arena como de biomasa.

Cuadro 4. Propiedades físicas e hidrodinámicas del cisco de café

Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$	1323
Diámetro de partícula [m]	$d_p$	0,000362
Esfericidad	$\Phi$	0,4
Fracción de vacío	$\epsilon_m$	0,9184
Fracción de vacío en mínima fluidización	$\epsilon_{mf}$	0,5631

Fuente: Elaboración propia

La densidad se obtuvo de Pacheco<sup>18</sup>, la fracción de vacío se obtuvo por medio de la expresión (2.5) por falta de información, los demás datos son una aproximación ya que fueron obtenidos experimentalmente.

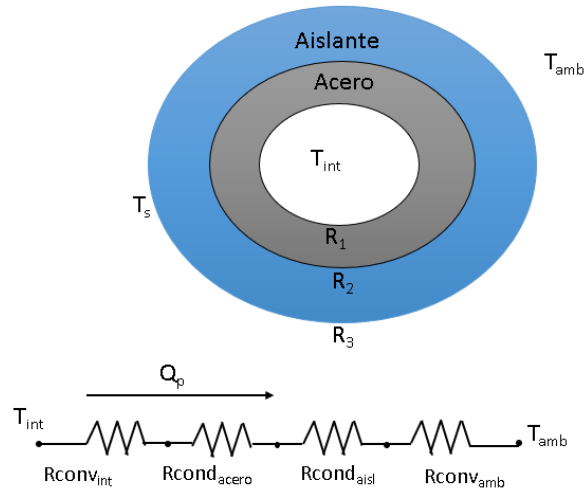
La velocidad de diseño ( $U_0$ ) es de 0.2339 [m/s] para cumplir con la fluidización de la arena sin arrastre de partículas de esta o de biomasa.

**4.2.6 Cálculos para la transferencia de calor** Es necesario conocer cuál es el espesor del aislamiento que se requiere para llevar a cabo este proyecto y garantizar la combustión dentro de la cámara de fluidización, por lo tanto, se realizó el siguiente análisis de transferencia de calor.

---

<sup>18</sup> PACHECO, LAURA BARÓN. Evaluación de la cascarilla de café como material adsorbente para la remoción de iones de Plomo presentes en soluciones acuosas. Bogotá : s.n., 2014.

Figura 7. Análisis de resistencias térmicas



Fuente: Elaboración propia

El análisis de transferencia de calor fue tomado de Cengel<sup>19</sup>, el calor total transferido del interior de la cámara de fluidización hacia el exterior se define así:

$$Q_p = \frac{T_{int} - T_{amb}}{R_{total}} \quad (4.3)$$

Donde \$R\_{total}\$ representa la resistencia total y esta expresada de la siguiente manera:

$$R_{total} = R_{conv_{int}} + R_{cond_{acero}} + R_{cond_{aisl}} + R_{conv_{amb}} \quad (4.4)$$

$$R_{conv_{int}} = \frac{1}{h_{int} * A_1} \quad (4.5)$$

$$R_{cond_{acero}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * K_{acero} * L_T} \quad (4.6)$$

<sup>19</sup>CENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor y masa .2 ed s.l.* : Mc Graw Hill. ISBN-10: 0072458933

$$R_{cond_{aisl}} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2 * \pi * K_{aisl} * L_T} \quad (4.7)$$

$$R_{conv_{amb}} = \frac{1}{h_{amb} * A_3} \quad (4.8)$$

La temperatura superficial  $T_s$  se determina por medio de:

$$Q_p = \frac{T_{int} - T_s}{R_{13}} \quad (4.9)$$

$$R_{13} = R_{conv_{int}} + R_{cond_{acero}} + R_{cond_{aisl}} \quad (4.10)$$

El AISI 304 a una temperatura de 280°C presenta una conductividad térmica de  $K_{acero}=19,03$  [W/m\*°K]<sup>20</sup> ; para determinar la conductividad del aislamiento se utilizó lana de fibra de vidrio, el cual posee una conductividad térmica de 0.04 [W/m\*°K] según la página Erica aislamiento-estanqueidad<sup>21</sup>

Dentro de la cámara de fluidización se analizó el comportamiento del flujo por medio del número de Reynolds, se obtuvo un número de Reynolds de 451,5 lo cual indica flujo laminar

$$Re_{ef} = \frac{D_t * U_0 * \rho_g}{\mu_g} \quad (4.11)$$

Para determinar el coeficiente de convección interna se tomó como referencia a Kunii<sup>22</sup> quien establece este coeficiente de manera experimental, en este caso se analizaron tubos verticales de diámetro interno 1[m] con lechos de partículas finas y se obtuvieron valores de  $h$  entre 300 y 400 [W/m<sup>2</sup>\*°K] en un rango de

---

<sup>20</sup> Ibid., p43

<sup>21</sup> Aislamiento térmico [en línea]. Barcelona, 2019. Disponible en:  
<http://www.eric.es/web/aislamiento-termico/>

<sup>22</sup> KUNII, Óp. Cit., p 22

velocidades entre 0.2 y 0.4 [m/s]. Por lo tanto, se tomó el valor de 300 [W/m<sup>2</sup>\*°K] ya que la velocidad de diseño está dentro del rango.

En el exterior de la cámara de fluidización se presenta convección natural en un cilindro vertical, por ello se calculó el coeficiente de convección externa de la siguiente manera:

Se calcularon las propiedades del aire con la temperatura de película  $T_f$

$$T_f = \frac{T_s + T_{amb}}{2} \quad (4.12)$$

Para calcular el número de Nusselt de la cámara de fluidización que es un cilindro vertical se analizó como placa vertical y se determinó por medio de la expresión:

$$Nu_{amb} = \left( 0.825 + \frac{0.387 * Ra_a^{1/6}}{\left( 1 + \frac{0.492^{9/16}}{Pr_{amb}} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (4.13)$$

Debe cumplir la siguiente condición para aplicar el caso de placa vertical, en caso de no cumplir con la condición el número de Nusselt se debe multiplicar por un factor de corrección  $f_c$

$$D_3 \geq \frac{35 * L_T}{Gr^{1/4}} \quad (4.14)$$

$$f_c = 1.3 * \left( \frac{L}{D_3 * Gr} \right)^{1/4} + 1 \quad (4.15)$$

Donde  $G_r$  representa el número de Grashof y  $L_T$  la altura total de la cámara de fluidización

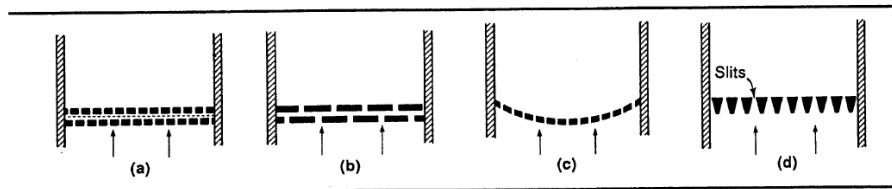
$$G_r = \frac{g * \beta * (T_s - T_{amb}) * L_T^3}{\nu^2} \quad (4.16)$$

Se halla el coeficiente de convección externa  $h_{amb}$  por medio de la expresión

$$Nu_{amb} = \frac{h_{amb} * D_3}{K_{amb}} \quad (4.17)$$

**4.2.7 Cálculos para el diseño del plato distribuidor** A continuación, se definen los conceptos y ecuaciones necesarias para determinar y calcular las dimensiones que requiere el plato distribuidor. En un lecho fluidizado el plato distribuidor es uno de los componentes principales, existe variedad de diseños como se muestra en la figura 8, según el tipo de aplicación se selecciona el diseño más adecuado, los distribuidores de placa perforada que son el tipo más sencillo y utilizado debido a que ofrecen una buena uniformidad en el lecho, producen pocas burbujas, fáciles de construir, económicos y no crean zonas muertas.

Figura 8. Distribuidores de placa



Fuente: KUNII DAIZO y Octave Levenspiel. Fluidization Engineering. 2 ed. Boston : s.n., 1923. p.96 .ISBN 0-409-90233-0.

Los distribuidores deben tener una caída de presión suficiente para lograr flujos iguales en toda la sección transversal del lecho, la caída de presión en el lecho se obtuvo de la ecuación (2.7), también se requiere conocer los siguientes variables según Kunii<sup>23</sup>, la caída de presión en el distribuidor por medio de la siguiente expresión:

$$\Delta p_d = 0.3 * \Delta p_b \quad (4.18)$$

<sup>23</sup> Ibid., p44

La velocidad del aire a través de los orificios del distribuidor se determina por:

$$U_{or} = CD_{or} * \left( \frac{2 * \Delta p_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (4.19)$$

Se debe calcular el número de Reynolds en el interior del recipiente ( $Re_{cf}$ ) para el flujo total que se acerca al distribuidor y así seleccionar el valor correspondiente de  $CD_{or}$  el cual representa un coeficiente de orificio.

Cuadro 5. Coeficiente de orificio

Re	100	300	500	1000	2000	>3000
$CD_{or}$	0,68	0,7	0,68	0,64	0,61	0,6

Fuente: KUNII DAIZO y Octave Levenspiel. *Fluidization Engineering*. 2 ed. Boston : s.n., 1923. p.105 .ISBN 0-409-90233-0.

La relación entre el número y tamaño de orificios viene dada por:

$$U_0 = \frac{\pi}{4} * d_{or}^2 * U_{or} * N_{or} \quad (4.20)$$

Donde:

$N_{or}$  Representa el número de orificios

$d_{or}$  Representa el diámetro de orificios

La longitud de penetración del chorro  $L_j$  es la distancia entre la placa y el centro de la burbuja en el instante en que se desprende el chorro, este parámetro es importante ya que en los distribuidores con orificios pequeños se producen chorros cortos pero la caída de presión aumenta, por lo tanto, se determina el valor de este parámetro así:

$$\frac{L_j}{d_{or}} = 21.2 * \left( \frac{U_{or}^2}{g * d_p} \right)^{0.37} * \left( \frac{d_{or} + U_{or} + \rho_g}{\mu} \right)^{0.05} * \left( \frac{\rho_g}{\rho_p} \right)^{0.68} * \left( \frac{d_p}{d_{or}} \right)^{0.24} \quad (4.21)$$

Una vez que se obtuvo la velocidad del aire a través de los orificios, se realizó un proceso iterativo entre el diámetro de los orificios y la cantidad de estos, es importante resaltar que se debe mantener una relación de velocidades ( $U_0/U_{or}$ ) de 1 a 10% al realizar este proceso iterativo. Además, la ecuación (4.20) viene dada para un área de 1 [m<sup>2</sup>] En este caso el área del distribuidor es más pequeña con respecto a esta referencia, se realizó el cálculo del número de orificios necesarios para el área del micro reactor de la siguiente forma:

Se determina el número de orificios por fila en 1 [m<sup>2</sup>]

$$N_{fil} = \sqrt{N_{or}} \quad (4.22)$$

Distancia entre centros de los orificios

$$X_{orL} = \frac{1}{N_{fil}} \quad (4.23)$$

Numero de orificios del distribuidor

$$N_{orD} = N_{or} * \pi * r^2 \quad (4.24)$$

El plato distribuidor está en contacto con el aire caliente y el lecho por esta razón se construye en acero inoxidable AISI 304. Se realizó un análisis del plato distribuidor por elementos finitos, el cual se encuentra en el anexo A.

**4.2.8 Pérdidas en tuberías y accesorios** En la figura 5 se observa el diseño final del reactor por lecho fluidizado desarrollado en el software SolidWorks, por medio de este se obtiene una visión más clara de los accesorios y tuberías auxiliares requeridas.

**4.2.8.2 Pérdidas en la cámara de fluidización** Para calcular las pérdidas en las tuberías se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach (4.25) La cámara de fluidización es un tubo con diámetro nominal de 4" y longitud  $L_T = 1.06$  [m]

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{u^2}{2 * g} \quad (4.25)$$

f es el factor de fricción y es una función del número de Reynolds en este caso, se presenta flujo laminar y por lo tanto se tiene:

$$f = \frac{64}{Re_{cf}} \quad (4.26)$$

Las propiedades y el cálculo de pérdidas se realizó con la temperatura de diseño, los cuales se encuentran en el cuadro 13

**4.2.8.3 Pérdidas en accesorios** Las pérdidas en los accesorios se establecen por medio de la ecuación (4.27)<sup>24</sup> y el coeficiente  $\zeta$  de pérdidas en accesorios se establece con la figura 9.

$$\Delta P_{\text{accesorios}} = \zeta_i * \frac{1}{2} * \rho_{\text{aire}} * u_0^2 \quad (4.27)$$

El compresor tiene una válvula reguladora de caudal tipo globo, para establecer el coeficiente  $\zeta$  de pérdidas se usa el cuadro 6.

---

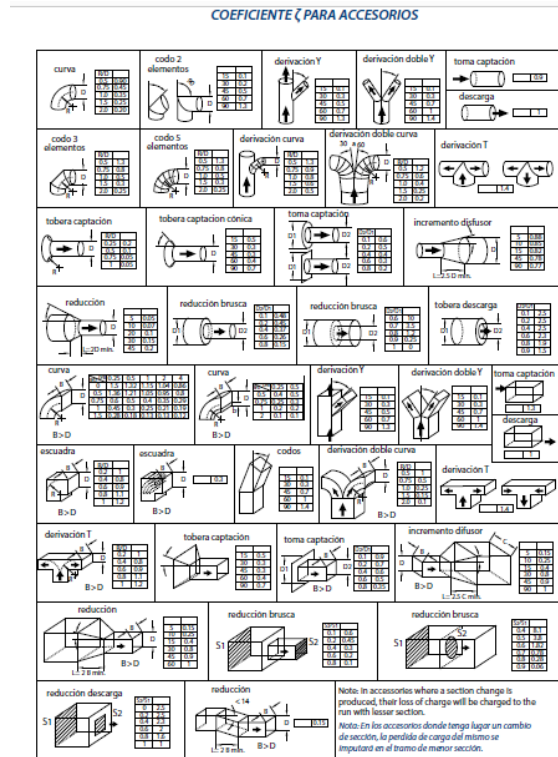
<sup>24</sup> Cálculo de pérdida de carga en accesorios. Casals [en línea]. Disponible en: [https://www.casals.com/assets/uploads/herramientas\\_pagina/perdidas%20de%20carga%20accesorios\\_accessories-load-loss.pdf](https://www.casals.com/assets/uploads/herramientas_pagina/perdidas%20de%20carga%20accesorios_accessories-load-loss.pdf)

Cuadro 6. Coeficiente de pérdidas para la válvula

Fitting	Nominal pipe size			
	3/8"	1/2"	3/4"	1"
Gate valve (fully open)	0,3	0,35	0,44	0,56
Globe valve (fully open)	14	18,6	29,1	29,4
Tee (through run)	0,5	0,7	1,1	1,5
Tee (through branch)	2,5	3,3	4,2	5,3

Fuente: Pneumatic air pressure losses in pipes and fittings [en línea]. 22 Noviembre 2017. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=31z\\_U-lhX2M&ab\\_channel=TheOpenEducator](https://www.youtube.com/watch?v=31z_U-lhX2M&ab_channel=TheOpenEducator)

Figura 9. Coeficiente de pérdidas en accesorios



Fuente: Cálculo de pérdida de carga en accesorios. Casals [en línea]. Disponible en: [https://www.casals.com/assets/uploads/herramientas\\_pagina/perdidas%20de%20carga%20accesorios\\_accessories-load-loss.pdf](https://www.casals.com/assets/uploads/herramientas_pagina/perdidas%20de%20carga%20accesorios_accessories-load-loss.pdf)

Teniendo en cuenta las pérdidas totales presentes en el equipo se seleccionó el compresor marca BauKer modelo EURO 6 con 1 HP de potencia, tamaño del tanque 25 litros, capacidad del estanque 6 litros, caudal 5 cfm, presión máxima 116 psi; debido a que cumple con todos los requerimientos.

#### 4.2.9 Estequiometría de la combustión

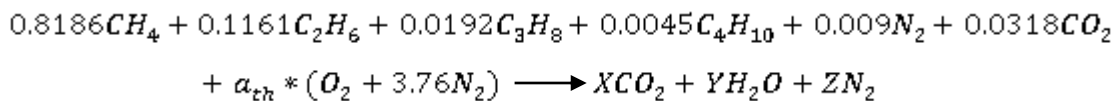
- ✓ Se analiza la combustión del gas natural, cuya composición volumétrica es:

Cuadro 7. Composición volumétrica del gas natural

Constituyente	Fórmula química	Composición por volumen (%)
Metano	CH <sub>4</sub>	81,86
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	11,61
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,92
I-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,23
N-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,22
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,9
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	3,18

Fuente: Composición típica del gas natural [en línea]. Bogotá. Vanti. Disponible en: <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>

Análisis estequiométrico



Realizando los respectivos balances de masa de cada componente se obtiene:

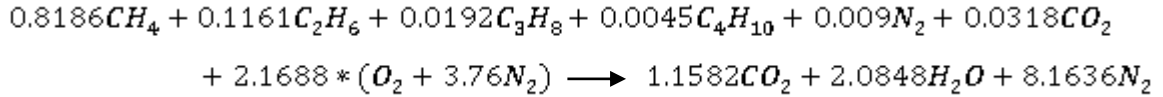
$$X=1.1582$$

$$Y=2.0848$$

$$a_{\text{th}}=2.1688$$

$$Z=8.1636$$

Reemplazando estos valores en la ecuación estequiométrica se tiene:



La relación aire-combustible se define por:

$$A/C = \text{Relacion aire combustible}$$

$$A/C = \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{comb}}} = \frac{[N * M]_{\text{aire}}}{\sum [N * M]_{\text{comb}}}$$

Donde N es el número de moles y M es la masa molar de cada componente

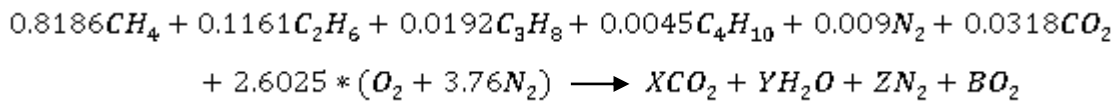
Para la ecuación estequiométrica se tiene:

$$m_{\text{aire}} = 299.35 \text{ Kg}$$

$$m_{\text{comb}} = 19.719 \text{ Kg}$$

$$A/C = 15.18 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb}}$$

Para la combustión real se toma un exceso de aire del 20%, ya que los quemadores pequeños normalmente operan con un exceso de 10 y 35%



Realizando los respectivos balances de masa en cada componente se tiene:

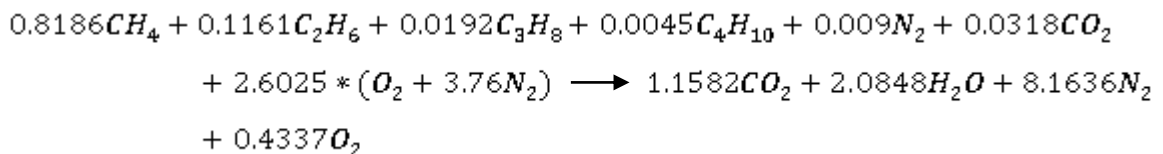
$$X=1.1582$$

$$Y=2.0848$$

$$B=0.4337$$

$$Z=8.1636$$

Reemplazando estos valores en la ecuación real



La relación aire combustible de la ecuación real da como resultado:

$$m_{aire} = 359.26 \text{ Kg}$$

$$m_{comb} = 19.719 \text{ Kg}$$

$$A/C = 18.32 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb}}$$

- ✓ Se analiza la combustión del cisco de café tomando el siguiente análisis último y próximo con la composición de la biomasa en estudio:

Cuadro 8. Análisis último y próximo del cisco de café

Análisis último [%]				Análisis próximo [%]				Poder calorífico [MJ/Kg]	
C <sub>waf</sub>	H <sub>waf</sub>	N <sub>waf</sub>	O <sub>waf</sub>	w	F	Cf	a	Ho	Hs
50,3	5,3	≤1	43,8	10,1	72,7	16	1,2	18,7	17,5

Fuente: ARNUZA GOMEZ Alvaro Jose; GARCIA GAMBOA Kevin Fernando,. 2019. Modelamiento matemático de un gasificador de cisco de café de lecho fijo Downdraft. Bucaramanga : s.n., 2019.

Donde:

C<sub>waf</sub> = Contenido de Carbono

H<sub>waf</sub> = Contenido de Hidrogeno

N<sub>waf</sub> = Contenido de Nitrógeno

O<sub>waf</sub> = Contenido de Oxigeno

w = Contenido de humedad

F = Materia volátil

Cf= Carbón fijo

a= Cenizas

Ho= Poder calorífico superior

Hi= Poder calorífico inferior

Inicialmente se procede a encontrar las fracciones másicas de cada elemento, asumiendo una mezcla de 100 Kg

$$mf_c = 50.3 \text{ Para el carbono}$$

$$mf_{H_2} = 5.3 \text{ Para el hidrogeno}$$

$$mf_{O_2} = 43.8 \text{ Para el oxigeno}$$

$$mf_{N_2} = 0.6 \text{ Para el Nitrógeno}$$

Se calcula el número de moles de cada elemento

$$N_C = \frac{m_C}{M_C} = \frac{50.3 \text{ Kg}}{12 \text{ Kg/Kmol}} = 4.1916 \text{ Kmol para el carbono}$$

$$N_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} = \frac{5.3 \text{ Kg}}{2 \text{ Kg/Kmol}} = 2.65 \text{ Kmol para el hidrogeno}$$

$$N_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} = \frac{43.8 \text{ Kg}}{32 \text{ Kg/Kmol}} = 1.3687 \text{ Kmol para el oxigeno}$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{M_{N_2}} = \frac{0.6 \text{ Kg}}{28 \text{ Kg/Kmol}} = 0.0214 \text{ Kmol para el oxigeno}$$

Es necesario conocer las fracciones molares de cada elemento, por lo tanto:

$$N_{tot} = N_C + N_{H_2} + N_{O_2} + N_{N_2}$$

$$N_{tot} = 8.2317 \text{ Kmol}$$

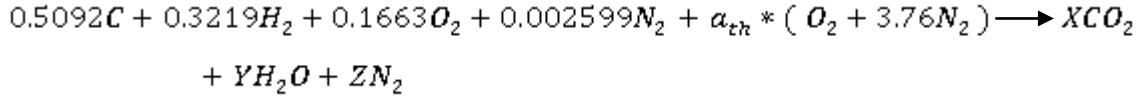
$$Y_C = \frac{N_C}{N_{tot}} = \frac{4.1916}{8.2317} = 0.5092 \text{ para el carbono}$$

$$Y_{H_2} = \frac{N_{H_2}}{N_{tot}} = \frac{2.65}{8.2317} = 0.3219 \text{ para el hidrogeno}$$

$$Y_{O_2} = \frac{N_{O_2}}{N_{tot}} = \frac{1.3687}{8.2317} = 0.1663 \text{ para el oxigeno}$$

$$Y_{N_2} = \frac{N_{N_2}}{N_{tot}} = \frac{0.0214}{8.2317} = 0.002599 \text{ para el nitrogeno}$$

De esta manera se establece la ecuación estequiométrica para la combustión del cisco de café:



Realizando los respectivos balances de masa de cada elemento se obtiene:

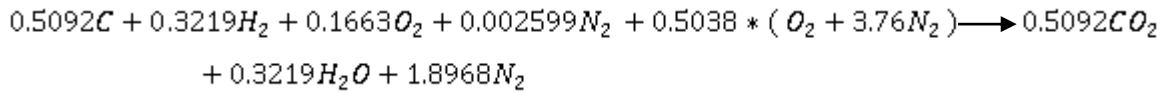
$$X=0.5092$$

$$Y=0.3219$$

$$a_{th}=0.5038$$

$$Z= 1.8968$$

Reemplazando en la ecuación estequiométrica se tiene:



Para la ecuación estequiométrica se tiene la siguiente relación aire/combustible:

$$A/C = \text{Relacion aire combustible}$$

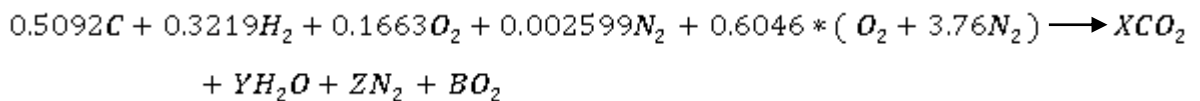
$$A/C = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = \frac{[N * M]_{aire}}{\sum [N * M]_{comb}}$$

$$m_{aire} = 69.5445 \text{ Kg}$$

$$m_{comb} = 12.1486 \text{ Kg}$$

$$A/C = 5.72 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb}}$$

Para el análisis de la combustión real se tomó un exceso de aire de 20%, la ecuación real toma la siguiente forma:



Realizando los respectivos balances de masa de cada elemento se obtiene:

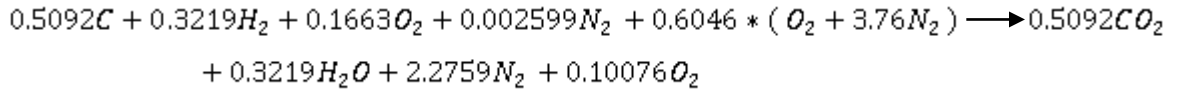
$$X=0.5092$$

$$Y=0.3219$$

$$B=0.10076$$

$$Z=2.2759$$

Finalmente, se tiene la ecuación real:



Para la ecuación real se tiene la siguiente relación aire/combustible:

$$A/C = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = \frac{[N * M]_{aire}}{\sum [N * M]_{bio}}$$

$$m_{aire} = 83.46 \text{ Kg}$$

$$m_{bio} = 12.1486 \text{ Kg}$$

$$A/C = 6.87 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg bio}}$$

Se requiere conocer la cantidad de energía liberada por el cisco de café, de la siguiente manera:

$$Q_{bio} = m_{bio} * PC_{bio}$$

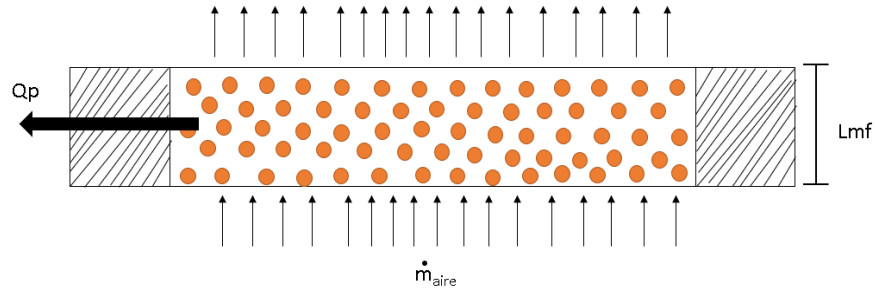
$$Q_{bio} = 12.1486 [\text{Kg}] * 17.5 [\text{MJ/Kg}]$$

$$Q_{bio} = 212600 [\text{KJ}]$$

Es importante resaltar que este valor se obtuvo al suponer 100 kg de biomasa en la estequiometría.

**4.2.10 Cálculos para la termodinámica** A continuación, se muestra en la figura 10 una representación del lecho, con la cual se lleva a cabo el estudio termodinámico del lecho en el estado transitorio, es decir, durante el calentamiento de las partículas de arena.

Figura 10. Lecho fluidizado



Fuente: Elaboración propia

- Balance de energía para el lecho:

$$\Delta E_{\text{energía}_{\text{ent}}} - \Delta E_{\text{energía}_{\text{sal}}} = \Delta E_{\text{energía}_{\text{lecho}}} \quad (4.28)$$

$$\Delta E_{\text{energía}_{\text{lecho}}} = \dot{m}_1 * (hb_1 - hb_2) - Q_p \quad (4.29)$$

El cambio de energía del lecho equivale a la energía que entra con el fluido menos la energía que sale con este junto con las pérdidas de calor.

El cambio de energía en el lecho es producido por las partículas de arena y es utilizada para aumentar la temperatura hasta llegar a la temperatura de operación, durante este proceso las partículas liberan un pequeño porcentaje de agua en este caso 10%, la cual es evaporada por el lecho.

- Balance de energía para las partículas de arena:

$$\Delta E_{\text{energía}_{\text{lecho}}} = \frac{m_{\text{arena}} * C_{p_{\text{arena}}} * (T_f - T_{\text{amb}}) + (m_w * h_{fg})}{\Delta t} \quad (4.30)$$

- Balance de energía para la cámara de combustión

La energía liberada por la combustión del gas natural es:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{\text{comb}} * PC \quad (4.31)$$

Haciendo un balance de masa, se tiene:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{\text{comb}} + \dot{m}_{\text{aire}} \quad (4.32)$$

Teniendo en cuenta la relación aire combustible, el flujo de aire se expresa:

$$\dot{m}_{aire} = AC * \dot{m}_{comb} \quad (4.33)$$

Como el poder calorífico del gas natural ( $PC$ ) en la ciudad de Bucaramanga según la empresa distribuidora tiene un valor de 41,45 [MJ/m<sup>3</sup>], es necesario establecer su densidad para un mejor manejo de unidades. Se puede determinar por medio de la ecuación de estado de un gas ideal, tomando las propiedades a las condiciones ambientales

$$\rho_{comb} = \frac{M_{comb} * P}{R_u * T_{amb}} \quad (4.34)$$

Donde la masa molar del gas natural es  $M_{comb} = 18,2$  [Kg/Kmol], la presión atmosférica en Bucaramanga es  $P = 90,7$  [Kpa], la temperatura ambiente promedio es  $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$  y la constante universal de los gases  $R_u = 8,3143$  [KJ/(Kmol\*°K)]

Una vez que se alcance el estado estable, es decir las partículas de arena se encuentren a la temperatura de diseño 280°C, se realiza el siguiente análisis:

- Balance de energía para el aire:

$$\Delta \dot{E}b_2 = \Delta \dot{E}_{bio} - \dot{Q}_p \quad (4.35)$$

La energía liberada por la combustión del cisco de café depende de su poder calorífico y del flujo másico el cual esta expresado por:

$$\dot{m}_{bio} = \frac{\Delta \dot{E}_{bio}}{PC_{bio} * 3600} \quad (4.36)$$

El cambio de energía en el aire suministrado por el compresor, también se puede determinar de la siguiente forma:

$$\Delta \dot{E}b_2 = \dot{m}_{mf} * (h_{b4} - h_{b3}) \quad (4.37)$$

$$\dot{m}_{mf} = U_{mf} * \frac{D^2}{4} * \pi * \frac{1000}{60} \quad (4.38)$$

**4.2.11 Cálculos para el diseño del tornillo sin fin** Para cumplir con el requerimiento de alimentación de biomasa al reactor se diseñó un tornillo sin fin de paso estándar ya que solo es para el transporte de sólidos.<sup>25</sup>

Se clasifica el material según la tabla 1-1 del catálogo lo cual indica que el cisco de café es de tamaño fino malla N° 6 (0,132" y menor) código B6.

Con la tabla 1-2 características de los materiales se lee el código del material, en este caso el cisco presenta un peso de 20[lb/ft<sup>3</sup>], código de material B6-25MY, selección del rodamiento intermedio L-S, series de componentes 1, factor de material Fm=1, Carga de artesa 45

Para establecer la capacidad se utilizó la tabla 1-6 proporciona la capacidad en [ft<sup>3</sup>/h] a una rpm para diferentes tamaños de transportadores y cargas de artesa, de aquí se establece que la capacidad es de 0,01[ft<sup>3</sup>/h] a una rpm

Para transportadores helicoidales de paso estándar la velocidad viene dada por:

$$N = \frac{\text{Capacidad requerida [ft}^3/\text{h]}}{\text{Capacidad a 1 rpm [ft}^3/\text{h]}} \quad (4.39)$$

También es necesario conocer la potencia total requerida en [HP]

$$HP_{\text{total}} = \frac{(HP_f + HP_m) * Fo}{e} \quad (4.40)$$

Donde:

e= Eficiencia del moto reductor con transmisión por cadena

Fo= Factor de sobrecarga

HP<sub>f</sub> = Potencia necesaria para vencer la fricción

HP<sub>m</sub> = Potencia necesaria para mover el material

La potencia HP<sub>f</sub> se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$HP_f = \frac{L * N * F_d * F_b}{1000000} \quad (4.41)$$

---

<sup>25</sup> Componentes para transportadores helicoidales, sección H, Manual Martin sprocket & gear, inc el gran catalogo [en línea]. Disponible en: <http://www.moher.mx/catalogos/13.pdf>

Donde:

L= Longitud total del transportador

N= Velocidad de operación

F<sub>d</sub>= Factor de diámetro

F<sub>b</sub>= Factor del buje

La potencia HP<sub>m</sub> se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$HP_m = \frac{Cap_{req} * L * W * F_f * F_m * F_p}{1000000} \quad (4.42)$$

Donde:

Cap<sub>req</sub>= Capacidad requerida

W= Densidad del material

F<sub>f</sub>= Factor de helicoidal

F<sub>m</sub>= Factor de material

F<sub>p</sub>= Factor de paletas (en caso de ser necesario)

A continuación, se establecen las principales dimensiones del transportador

$$D_T = D_{eje} + D_{helice} \quad (4.43)$$

Donde:

D<sub>T</sub>= Diámetro total

D<sub>eje</sub> = Diámetro del eje

D<sub>helice</sub> = Diámetro de la hélice del tornillo

Se determina el diámetro del canalón por medio de la siguiente expresión:

$$D_{can} = D_T + 0.011 \quad (4.44)$$

## 5. RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS PARA VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Cuadro 9. Resultados cálculo a mínima fluidización para arena

T [°C]	280
P <sub>atm</sub> [Kpa]	90,7
U <sub>mf</sub> [m/s]	0,2028
U <sub>t</sub> [m/s]	1,276
L <sub>b</sub> [m]	0,05
L <sub>mf</sub> [m]	0,05536
ρ <sub>g</sub> [Kg/m <sup>3</sup> ]	0,5709
μ <sub>g</sub> [Kg/m-s]	0,00002908

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 10. Resultados cálculo a mínima fluidización para las partículas de cisco de café

T [°C]	280
P <sub>atm</sub> [Kpa]	90,7
U <sub>mf</sub> [m/s]	0,02543
U <sub>t</sub> [m/s]	0.2339
ρ <sub>g</sub> [Kg/m <sup>3</sup> ]	0,5709
μ <sub>g</sub> [Kg/m-s]	0,00002908

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 RESULTADOS PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Cuadro 11. Resultados cálculo para la transferencia de calor

Parámetro	Unidad	Sigla	Resultado
Reynolds interno cámara de fluidización	X	Rec <sub>f</sub>	415,5
Coefficiente de transferencia de calor interno	[W/m <sup>2</sup> *°C]	h <sub>int</sub>	300
Conductividad térmica AISI 304	[W/m*°C]	K <sub>acero</sub>	19,03
Conductividad térmica aislante	[W/m*°C]	K <sub>aisl</sub>	0,04
Temperatura interna en la cámara de fluidización	[°C]	T <sub>int</sub>	280
Temperatura superficial	[°C]	T <sub>s</sub>	32,79
Temperatura ambiente	[°C]	T <sub>amb</sub>	20
Longitud total de la cámara de fluidización	[m]	L <sub>T</sub>	1,06
Diámetro de la cámara de fluidización	[m]	D <sub>1</sub>	0,1
Espesor de aislamiento	[m]	e	0,03
Temperatura de película	[°C]	T <sub>f</sub>	26,4
Coefficiente de expansión volumétrica	[1/°K]	β	0,00334
Viscosidad cinemática del fluido ambiente	[m <sup>2</sup> /s]	ν	0,00001755
Conductividad térmica del ambiente	[W/m*°C]	K <sub>amb</sub>	0,02635
Gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]	g	9,81
Numero de Grashof	X	G <sub>r</sub>	1,621*10 <sup>9</sup>
Numero de Prandtl	X	Pr <sub>amb</sub>	0,7072
Numero de Rayleigh	X	Ra	1,146*10 <sup>9</sup>
Numero de Nusselt externo	X	NU <sub>amb</sub>	128,1
Coefficiente de transferencia de calor externo	[W/m <sup>2</sup> *°C]	h <sub>amb</sub>	20,57
Resistencia térmica por convección interna	[°C/W]	R <sub>convint</sub>	0,01001
Resistencia térmica por conducción en el acero	[°C/W]	R <sub>condacero</sub>	0,0003095
Resistencia térmica por conducción en el aislante	[°C/W]	R <sub>condasil</sub>	1,71
Resistencia térmica por convección externa	[°C/W]	R <sub>convamb</sub>	0,089
Resistencia térmica total	[°C/W]	R <sub>total</sub>	1,809
Resistencia térmica 13	[°C/W]	R <sub>13</sub>	1,72
Calor perdido entre el lecho y el ambiente	[W]	Q <sub>p</sub>	143,7
Temperatura interna del tubo	[°C]	T <sub>1</sub>	278,1
Temperatura externa del tubo	[°C]	T <sub>2</sub>	278,032

Fuente: Elaboración propia

### 5.3 RESULTADOS PARA EL DISEÑO DEL PLATO DISTRIBUIDOR

Cuadro 12. Resultados para el diseño del plato distribuidor

Parámetro	Unidad	Sigla	Valor
Caída de presión en el distribuidor	[Pa]	$\Delta P_d$	242,6
Caída de presión en el lecho fluidizado	[Pa]	$\Delta P_b$	808,5
Coefficiente de orificio	X	$C_{d_{or}}$	0,679
Velocidad a través del orificio	[m/s]	$U_{or}$	19,79
Relación de velocidades	%	Rel	1,16
Número de orificios	X	$N_{or}$	32
Diámetro de orificio	[m]	$d_{or}$	0,002
Distancia entre centros de orificios	[m]	$X_{orL}$	0,01644
Longitud de chorro	[m]	$L_j$	0,00872

Fuente: Elaboración propia

### 5.4 RESULTADOS PARA EL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS

Cuadro 13. Resultados de pérdidas en la cámara de fluidización

Parámetro	Unidad	Sigla	Valor
Velocidad de diseño	[m/s]	$U_0$	0,2339
Aspereza	[m]	e	0,000002
Número de Reynolds interno	X	$Re_{cf}$	451,5
Factor de fricción	X	f	0,0002902
Pérdidas por metro	[m]	$h_f$	0,00000857
Pérdidas en la cámara de fluidización	[Pa]	$h_{f_{cf}}$	0,03221
Densidad el aire	[Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$	0,5709

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 14. Resultados de pérdidas en accesorios

Accesorios	Coefficiente de pérdidas [ $\zeta$ ]	Pérdidas [Pa]
Plenum	0,81	8,479
Reducción brusca	0,17	1,78
Codo	0,9	9,422
TEE	1,3	13,61

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 15. Cuantificación de pérdidas

Componente	Pérdidas [Pa]
Lecho fluidizado	808,5
Plato distribuidor	242,6
Plenum	8,479
Cámara de fluidización	0,03321
Reducción brusca	1,78
Codo	9,422
TEE	13,61
Válvula	194,7
Manguera	3,768
Total	1282,9

Fuente: Elaboración propia

## 5.5 RESULTADOS PARA EL ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Cuadro 16. Resultados para el análisis termodinámico

Parámetro	Unidad	Sigla	Resultado
Temperatura inicial arena	[°C]	$T_{amb}$	25
Temperatura final arena	[°C]	$T_{salida}$	280
Flujo másico de aire que entra en el lecho	[Kg/s]	$m_1$	0,02669
Entalpia del aire a la entrada del lecho transitorio	[KJ/Kg]	$hb_1$	699,1
Entalpia del aire a la salida del lecho transitorio	[KJ/Kg]	$hb_2$	558,5
Calor perdido entre el lecho y el ambiente	[KW]	$Q_p$	0,1437
Masa de arena	[Kg]	$m_{arena}$	1,044
Cp de la arena	[KJ/Kg*°C]	$Cp_{arena}$	8,368
Humedad en la arena	[Kg]	$m_w$	0,1044
Entalpia de vaporización	[KJ/Kg]	$h_{fg}$	2257
Tiempo de calentamiento arena	[s]	$\Delta t$	240
Calor liberado por el gas natural	[KW]	$Q_c$	79,73
Poder calorífico del gas natural	[MJ/m3]	$PC$	41,45
Flujo másico de gas natural	[Kg/s]	$m_{comb}$	0,001389
Poder calorífico del cisco de café	[MJ/Kg]	$PC_{bio}$	17,5
Flujo másico de biomasa	[Kg/h]	$m_{bio}$	0,0782
Flujo másico de aire	[Kg/s]	$m_{aire}$	0,0253
Densidad del gas natural	[Kg/m3]	$\rho_{comb}$	0,7221
Energía liberada por la combustión de biomasa	[KW]	$\Delta E_{bio}$	0,3801
Cambio de energía del aire en el estado estable	[KW]	$\Delta E_{b2}$	0,2364
Calor liberado por la biomasa (100Kg)	[KJ]	$Q_{bio}$	212600
Entalpia del aire a la entrada del lecho estable	[KJ/Kg]	$hb_3$	298,5
Entalpia del aire a la salida del lecho estable	[KJ/Kg]	$hb_4$	558,5
Flujo de aire a mínima fluidización	[Kg/s]	$m_{mf}$	0,0009093
Flujo volumétrico de aire a mínima fluidización	[Lpm]	$V_{mf}$	95,57

Fuente: Elaboración propia

## 5.6 RESULTADOS PARA EL DISEÑO DEL TORNILLO SIN FIN

Cuadro 17. Resultados para el diseño del tornillo sin fin

Parámetro	Unidad	Sigla	Resultado
Diámetro el eje	[m]	D <sub>eje</sub>	0,018
Diámetro de la hélice	[m]	D <sub>hélice</sub>	0,024
Diámetro total	[m]	D <sub>T</sub>	0,042
Diámetro del canalón	[m]	D <sub>can</sub>	0,053
Capacidad requerida	[ft <sup>3</sup> /h]	Cap <sub>req</sub>	0,002087
Capacidad a 1 rpm	[ft <sup>3</sup> /h]	Cap <sub>1</sub>	0,01
Velocidad de giro	[rpm]	N	0,2087
Potencia para vencer la fricción	[HP]	HP <sub>f</sub>	6,137*10 <sup>-7</sup>
Potencia para mover el material	[HP]	HP <sub>m</sub>	8,44*10 <sup>-8</sup>
Potencia total	[HP]	HP <sub>total</sub>	8,025*10 <sup>-7</sup>
Eficiencia del moto reductor	[%]	e	87
Factor de sobrecarga	[X]	F <sub>o</sub>	1
Longitud del transportador	[ft]	L	0,49
Factor de diámetro	[X]	F <sub>d</sub>	6
Factor de buje	[X]	F <sub>b</sub>	1
Densidad del material	[lb/ft <sup>3</sup> ]	W	82,59
Factor de helicoidal	[X]	F <sub>f</sub>	1
Factor de material	[X]	F <sub>m</sub>	1

Fuente: Elaboración propia

## 6. PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO

Para iniciar la prueba es necesario que cada estudiante tenga el equipo de seguridad como: bata manga larga, guantes de seguridad, gafas de seguridad, topones para oídos, zapatos cerrados y pantalón largo.

Fotografía 1. Reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio



Fuente: Elaboración propia

## 6.1 INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN

- 1) Realizar las conexiones entre la termocupla, el módulo MAX 6675, el Arduino y el equipo de cómputo portátil.
- 2) Ubicar una taza debajo del plenum, retirar la tapa inferior y el plato distribuidor. para desocupar cualquier residuo dentro del reactor.
- 3) Situar el plato distribuidor, la tapa superior de escape de gases.
- 4) Conectar la manguera del compresor al reactor.
- 5) Revisar que el botón de encendido este abajo.
- 6) Verificar el nivel de aceite.
- 7) Suministrar la cantidad de arena requerida para la prueba.
- 8) Cerrar la compuerta de alimentación de arena.
- 9) Introducir el quemador en la base inferior del plenum, encenderlo y cronometrar el tiempo de calentamiento de la arena 240 segundos.
- 10) Apagar y retirar el quemador, ubicando nuevamente la tapa inferior del plenum.
- 11) Encender el compresor.
- 12) Cerrar la válvula reguladora de caudal a 45° y presionar el botón de encendido del compresor.
- 13) Suministrar la biomasa en la tolva de alimentación del tornillo.
- 14) Energizar y encender el sistema de alimentación de biomasa durante el tiempo de operación que garantice el flujo másico requerido.
- 15) Una vez transcurrido el tiempo de prueba, apagar y des energizar el compresor y el sistema de alimentación de biomasa.
- 16) Retirar los residuos.

## 7. PRUEBAS

### 7.1 PRUEBA DE FLUJO MÁSICO DE BIOMASA

Se realizo esta prueba para garantizar el requerimiento de flujo másico de cisco de café obtenido en el estudio termodinámico del proceso 1.3 g/min. Debido a que el motorreductor del tornillo sin fin tiene una velocidad mínima de 4 revoluciones por minuto, tiene la capacidad mínima para garantizar un flujo másico de 21g/min en promedio, cuando la tolva se encuentra a tope y el tornillo funciona en continuo.

Cuadro 18. Flujos másicos de biomasa

Masa [g]	Tiempo [min]
21,5	1
21	1
19	1
22,5	1

Fuente: Elaboración propia

Para asegurar el flujo másico requerido se obtiene el tiempo en el que el tornillo suministra 1,303 gramos de biomasa. El resultado fue 3,72 segundos de operación y 56,28 segundos de inactividad bajo las mismas condiciones de velocidad y carga.

### 7.2 PRUEBAS DE FLUIDIZACIÓN

Se realizaron diferentes pruebas para llegar al estado de fluidización variando el ángulo de apertura de la válvula reguladora del compresor y la cantidad de masa.

Cuadro 19. Pruebas de fluidización

Masa arena [g]	Ángulo apertura válvula	Resultado
800	45°	No fluidizo
800	90°	No fluidizo
400	45°	No fluidizo
400	90°	No fluidizo
200	10°	No fluidizo
200	20°	No fluidizo
200	30°	No fluidizo
200	45°	Sí fluidizo
200	90°	Sí fluidizo

Fuente: Elaboración propia

En esta etapa se observó que con una masa de arena de 200 gramos se alcanza el estado de mínima fluidización a partir del ángulo de apertura de 45° cuando el manómetro a la salida del compresor marca el valor de 40 psi y se mantiene constante a mayor ángulo. Esta presión es la necesaria para vencer las pérdidas de la válvula reguladora, la manguera del compresor, el plenum, el plato distribuidor y la caída de presión del lecho.

### 7.3 PRUEBAS DE COMBUSTIÓN

En esta etapa se realizaron dos pruebas de quemado para el cisco de café de la misma calidad en contacto directo con la llama de un soplete a gas natural, el tiempo registrado es para el caso en que se quema totalmente la muestra.

Fotografía 2. Cisco de café



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 20. Resultados para la quema de cisco de café

Prueba	Masa inicial [g]	Volumen inicial [m <sup>3</sup> ]	Tiempo [seg]	Masa final [g]	Volumen final [m <sup>3</sup> ]
1	7,6	$5,243 \cdot 10^{-5}$	36,88	1,1	$1,982 \cdot 10^{-5}$
2	8	$7,876 \cdot 10^{-5}$	31,55	2,6	$2,287 \cdot 10^{-5}$

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 3. Prueba de combustión llama directa



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4. Muestras después de la prueba de combustión



Fuente: Elaboración propia

Respecto a las pruebas de combustión en el reactor no fue posible llevarlas a cabo debido a que se presentaron diferentes circunstancias externas que se ven reflejadas en contratiempos principalmente dos, entre ellos las medidas tomadas por la Universidad Industrial de Santander respecto a la emergencia sanitaria y los inconvenientes que se presentaron con el compresor.

En consideración con las medidas tomadas por la UIS como el acuerdo N° 063 2021 09 Marzo indica que la Universidad entra en una cuarentena preventiva para el inicio de la presencialidad híbrida establecida para el 19 de Abril, acuerdo N° 105 establece que la presencialidad híbrida se aplaza para el 03 de Mayo, la resolución N° 0459 de 2021 Abril 28 por la cual se adopta de manera transitoria la modalidad de trabajo en casa para todo el personal administrativo y contratistas de apoyo a la gestión administrativa, acuerdo N°138 de 2021 Abril 29 el cual establece que la Universidad permanece cerrada hasta el 12 de Mayo

Por estos motivos no fue posible realizar las pruebas dentro del laboratorio, se llevaron a cabo en el patio de ropas de una vivienda urbana, cabe resaltar que es

de vital importancia realizar esta fase de pruebas dentro del laboratorio con los equipos adecuados para garantizar una investigación de mejor calidad.

En cuanto a el equipo de suministro de aire se seleccionó un compresor, ya que este fue brindado por el director del proyecto como una ayuda económica para la realización de este, al momento de ejecutar las pruebas se observó que el equipo no se encontraba en condiciones óptimas para operar y por ello se recurrió a un técnico de mantenimiento en la Universidad.

Como el compresor se encontraba en mantenimiento dentro de la UIS se acudió al alquiler de otro compresor con el cual se realizaron las pruebas de fluidización, no fue posible continuar porque este compresor fallo después de estar en pruebas de fluidización durante tres días, se fracturo por completo la manivela del pistón y se doblaron dos hélices del ventilador.

Fotografía 5. Hélices dobladas



Fuente: Elaboración propia

*Fotografía 6. Manivela del pistón fracturada*



Fuente: Elaboración propia

## 8. CONCLUSIONES

- La elaboración del diseño y construcción del reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio para combustión de biomasa residual permite plantear este modelo a nivel industrial supliendo la obtención de energía eléctrica tradicional, lo cual implica una reducción en los niveles de contaminación ambiental.
- El diseño y selección de los elementos de máquina: Cámara de fluidización, plato distribuidor, plenum, compresor, tornillo sin fin, motorreductor con regulación de velocidad, malla, sensores de temperatura; fueron apropiados y lograron cumplir con el fenómeno de fluidización, el cual se da con una masa de arena de 200 gramos con un ángulo de apertura de 45° de la válvula reguladora de caudal y a una presión de 40 psi.
- El proceso de combustión no se llevó a cabo debido a contratiempos y dificultades económicas presentadas en el capítulo 7.
- No se determinó la eficiencia del reactor por los motivos anteriormente mencionados.
- La guía para la práctica de laboratorio se diseñó con el fin de profundizar el conocimiento en el área de estudio, a su vez implementar y mejorar este proceso.

## 9. RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos se recomienda diseñar un sprocket en el sistema de alimentación de biomasa de tal forma que el tornillo opere en continuo y cumpla con el requerimiento de flujo másico, teniendo en cuenta que la distancia entre centros del motor y el sprocket es de 15 cm.
- Modificar el diseño de la tapa inferior en la cual se conecta el quemador de manera que sea más sencillo realizar dicha conexión y que siga cumpliendo la condición de ser hermético para evitar posibles fugas.
- Utilizar un anemómetro para medir el caudal de aire suministrado al equipo, de igual forma para los gases de salida; por razones económicas no fue posible adquirir uno.
- Realizar las pruebas de combustión de la biomasa.

## BIBLIOGRAFÍA

Acero inoxidable [en línea] Imporinox S.A.S. Disponible en:  
<https://imporinox.com/acero-inoxidable/calidades-y-acabados/>

Aislamiento térmico [en línea]. Barcelona, 2019. Disponible en:  
<http://www.ERICA.es/web/aislamiento-termico/>

ARNUZA GOMEZ Alvaro Jose; GARCIA GAMBOA Kevin Fernando,. 2019. Modelamiento matematico de un gasificador de cisco de café de lecho fijo Downdraft. Bucaramanga : s.n., 2019.

Cálculo de pérdida de carga en accesorios. Casals [en línea]. Disponible en:  
[https://www.casals.com/assets/uploads/herramientas\\_pagina/perdidas%20de%20carga%20accesorios\\_accessories-load-loss.pdf](https://www.casals.com/assets/uploads/herramientas_pagina/perdidas%20de%20carga%20accesorios_accessories-load-loss.pdf)

CARO JOSÉ RAMÓN. Diseño y construcción de un reactor de lecho fluido para una planta piloto. Sevilla : s.n., 2014.

CASTELLANOS JUAN P. Diseño y construcción de un reactor de lecho fluidizado para el estudio de mezcla y segregación de gases y sólidos. San Francisco de Quito : s.n., 2015.

CENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor y masa .2 ed* s.l. : Mc Graw Hill. ISBN-10: 0072458933

Componentes para transportadores helicoidales, sección H, Manual Martin sprocket & gear, inc el gran catalogo [en linea]. Disponible en: <http://www.moher.mx/catalogos/13.pdf>

Composición típica del gas natural [en linea]. Bogotá. Vanti. Disponible en: <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>

Factorenergia. Energias alternativas: Qué son y qué tipos existen. [en linea] 2016. Disponible en: <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/que-son-energias-alternativas/>

FLOREZ DIANA y Juliana Posada. Diseño conceptual de un reactor de lecho fluidizadoa escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales. Medellin : s.n., 2007.

GARCIA SANTIAGO. *Centrales termoeléctricas de biomasa*. s.l. : RENOVETEC. 2013. ISBN: 978-84-616-1557-5.

GONZÁLEZ GERMAN, Natalia Prieto y MERCADO IVAN. Large Eddy Simulation aplicado a un lecho fluidizado gas-solido Parte 1. Bucaramanga : s.n., 2018.

KUNII DAIZO y Octave Levenspiel. *Fluidization Engineering*. 2 ed. Boston : s.n., 1923. ISBN 0-409-90233-0.

MARRUPE DANIEL. Diseño de un reactor de lecho fluidizado para la transformación termoquímica de biomasa u otros combustibles. Madrid : s.n., 2014

PACHECO, LAURA BARÓN. Evaluación de la cascarilla de café como material adsorbente para la remoción de iones de Plomo presentes en soluciones acuosas. Bogotá : s.n., 2014.

PINTO, LUIS ARNULFO PINZÓN. Diseño y construcción de una tostadora de café por lecho fluidizado . Bucaramenga : s.n., 2014.

SALVI, GIULIANO. *La combustión: Teoría y aplicaciones*. s.l. : Dossat, 1975. ISBN: 8423704254, 9788423704255.

Seese, G William Daub y William. *Química*. México : Pearson educación, 2005.

Real academia española. Biomasa [en línea]. Madrid : s.n., 2020. Disponible en: <https://dle.rae.es/biomasa>

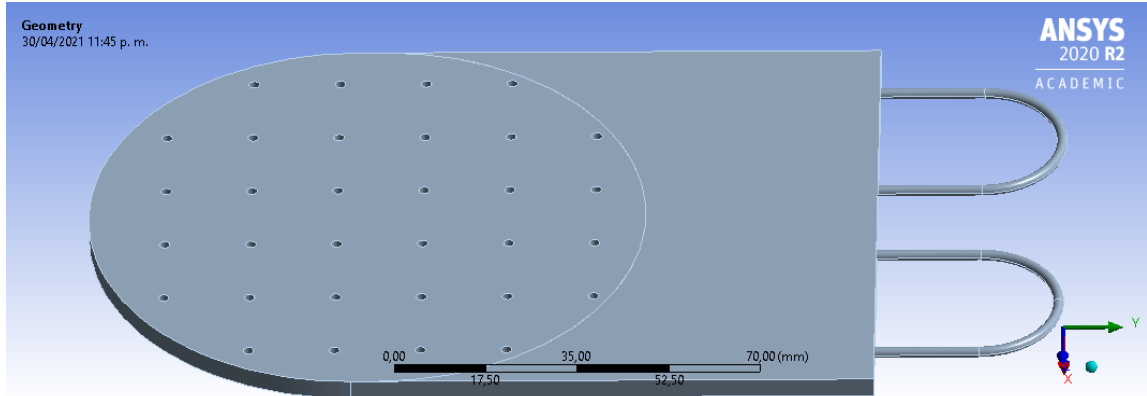
VALLE MANUEL. Diseño de un horno de lecho fluidizado para tratamientos térmicos. Santiago de Cali : s.n., 2005.

WALDO, JOHANNA MANRIQUE. Estudio de la combustión de pélet de cisco de café . Medellín : s.n., 2018.

## ANEXOS

### Anexo A. Análisis del plato distribuidor por elementos finitos

#### Análisis CAE Plato distribuidor



#### Unidades

Unidad de sistema	Métrico (mm, kg, N, s, mV, mA) Grados rad / s Celsius
Ángulo	Grados
Velocidad rotacional	rad / s
Temperatura	Celsius

#### Modelo (A4)

##### Geometría

Nombre del objeto	<i>Platón distribuidor</i>
<b>Material</b>	
Asignación	Acero inoxidable
Efectos no lineales	sí
Efectos de la deformación térmica	sí
<b>Propiedades</b>	
Volumen	56988 mm <sup>3</sup>
Masa	0,4559 kilogramos
Centroide X	2.0002 mm

Centroide Y	25.683 milímetros
Centroide Z	-2,1728e-005 milímetro
Momento de inercia Ip1	1163,4 kg · mm <sup>2</sup>
Momento de inercia Ip2	364,68 kg · mm <sup>2</sup>
Momento de inercia Ip3	799,91 kg · mm <sup>2</sup>
<b>Estadísticas</b>	
Nodos	25106
Elementos	13394
Métrica de malla	Ninguno

## Malla

Nombre del objeto	<i>Malla</i>
	<b>Defaults</b>
Preferencia de física	Mecánico
Orden de elementos	Programa controlado
Tamaño del elemento	Defecto
	<b>Dimensionamiento</b>
Usar tamaño adaptable	sí
Resolución	1
Derrota de malla	sí
Transición	Rápido
Centro de ángulo de extensión	Grueso
Semilla de tamaño inicial	Montaje
Cuadro delimitador Diagonal	212,68 mm
Superficie media	358,77 mm <sup>2</sup>
Longitud mínima del borde	1, e-003 mm
	<b>Estadísticas</b>
Nodos	25106
Elementos	13394

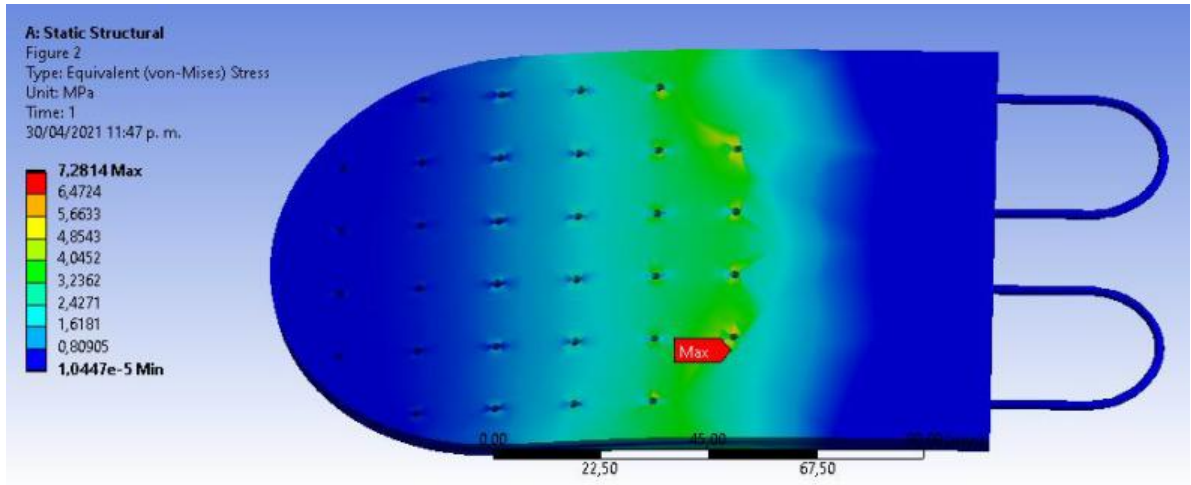
Definición	
Suprimido	No
Método	Tetraedros
Algoritmo	Conforme al parche
Orden de elementos	Usar configuración global

### Estructura estática (A5)

Nombre del objeto	<i>Soporte fijo</i>	<i>Fuerza</i>
Expresar	Totalmente definido	
Alcance		
Método de determinación del alcance	Selección de geometría	
Geometría	1 cara	
Definición		
Tipo	Soporte fijo	Fuerza
Suprimido	No	
Definir por		Componentes
Aplicado por		Efecto de superficie
Sistema coordinado		Sistema de coordenadas global
Componente X		30, N (en rampa)
Componente Y		0, N (en rampa)
Componente Z		0, N (en rampa)

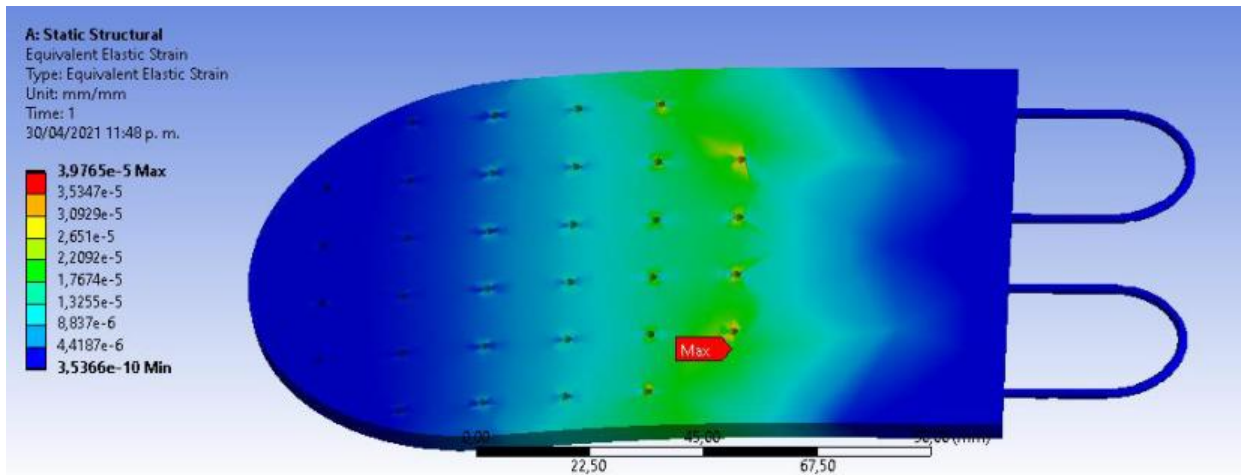
### Solución (A6)

Esfuerzo equivalente			
Hora [s]	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Promedio [MPa]
1,	1,0447e-005	7,2814	1.0776



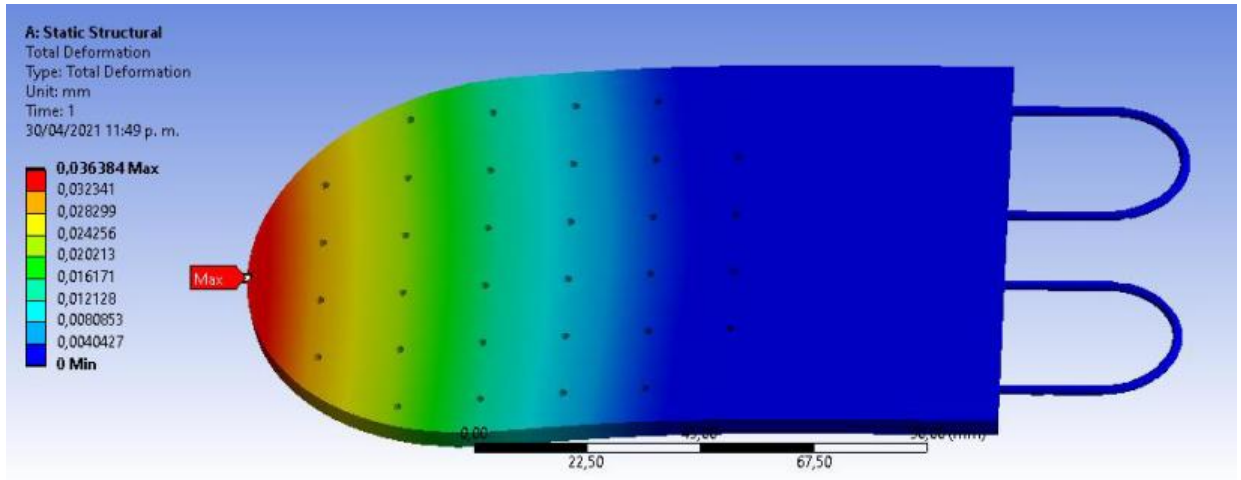
**Deformación elástica equivalente**

Hora [s]	Mínimo [mm / mm]	Máximo [mm / mm]	Promedio [mm / mm]
1,	3,5366e-010	3,9765e-005	6,4132e-006



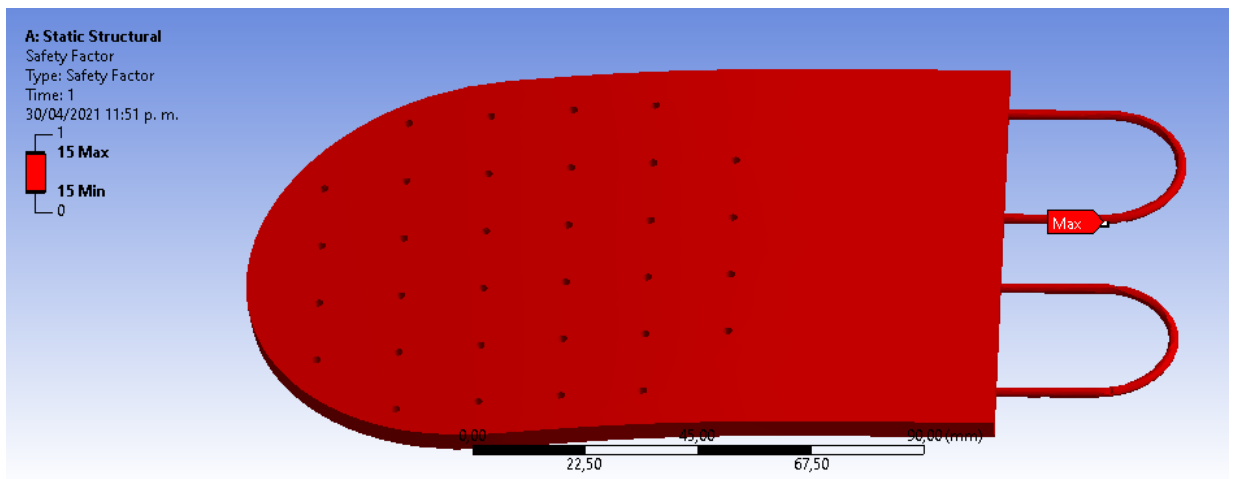
**Deformación total**

Hora [s]	Mínimo [mm]	Máximo [mm]	Promedio [mm]
1,	0,	3,6384e-002	1,1972e-002



**Factor de seguridad**

Hora [s]	Mínimo	Máximo	Promedio
1,	15,	15,	15,



**Datos de material**

**Acero inoxidable**

Densidad	8, e-006 kg mm <sup>-3</sup>
Coefficiente de expansión termal	1,2e-005 C <sup>-1</sup>
Calor específico	4,34e + 005 mJ kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>

Conductividad térmica	6,05e-002 Ancho mm <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
Resistividad	1,7e-004 ohmios mm

**Resistencia a la deformación por compresión**

Resistencia a la compresión MPa
235,

**Resistencia a la tracción**

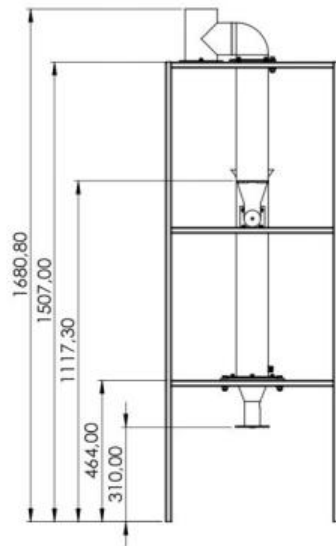
Resistencia a la tracción MPa
235,

**Resistencia máxima a la tracción**

Resistencia máxima a la tracción MPa
568,

Anexo B. Planos del reactor





**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TITULO:

ESCALA: 1:13

VISTA FRONTAL

UNIDADES: mm

AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

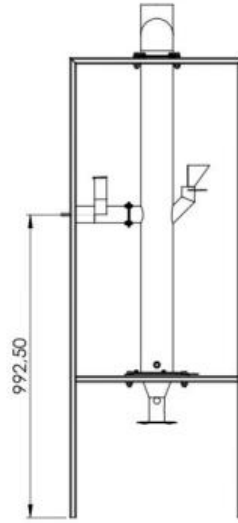
A4



REVISAR

Director Yesid Rueda

HOJA 2/41



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TITULO:

ESCALA: 1:13

VISTA LATERAL DERECHA

UNIDADES: mm

AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

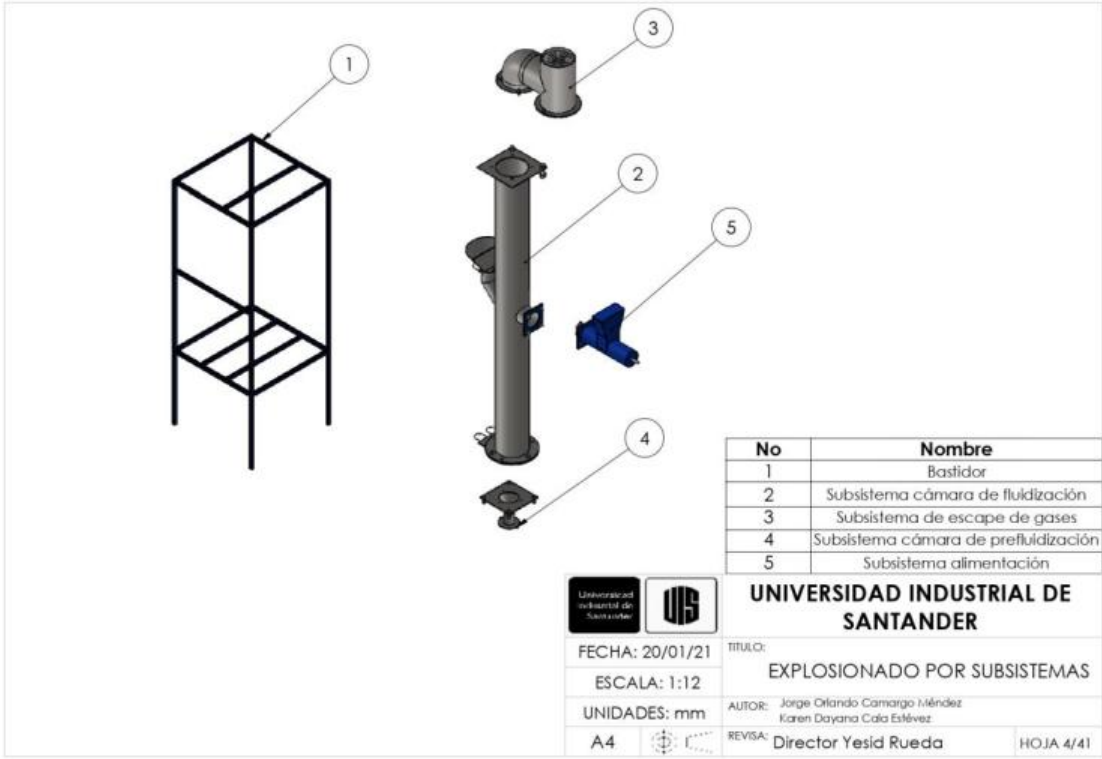
A4

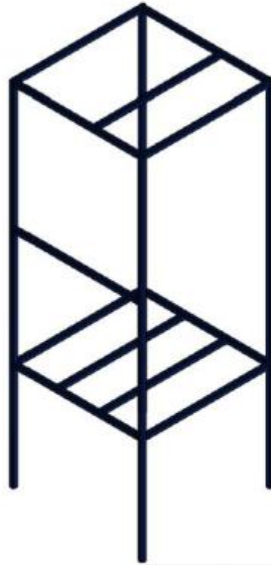


REVISAR:

Director Yesid Rueda

HOJA 3/41





Material: Hierro



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TITULO:

ISOMÉTRICA BASTIDOR

ESCALA: 1:12

UNIDADES: mm

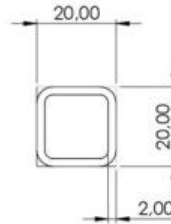
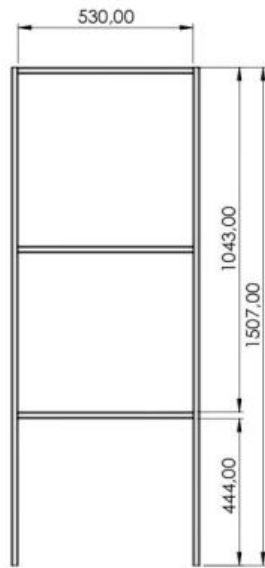
AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

A4



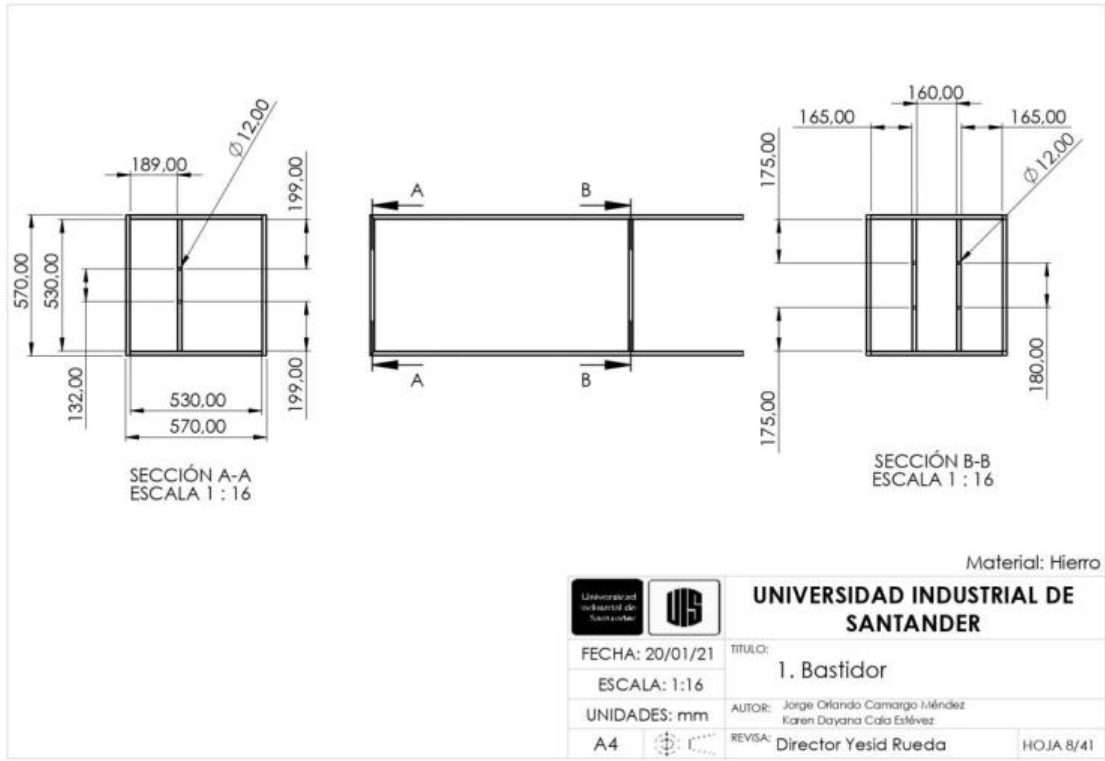
REVISÓ: Director Yesid Rueda

HOJA 5/41



Material: Hierro

 		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/01/21		TITULO:	1. Bastidor
ESCALA: 1:12		AUTOR:	Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez
UNIDADES: mm		REVISAR:	Director Yesid Rueda
A4			HOJA 6/41





**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TÍTULO: ISOMÉTRICO SUBSISTEMA CÁMARA DE FLUIDIZACIÓN

ESCALA: 1:8

UNIDADES: mm

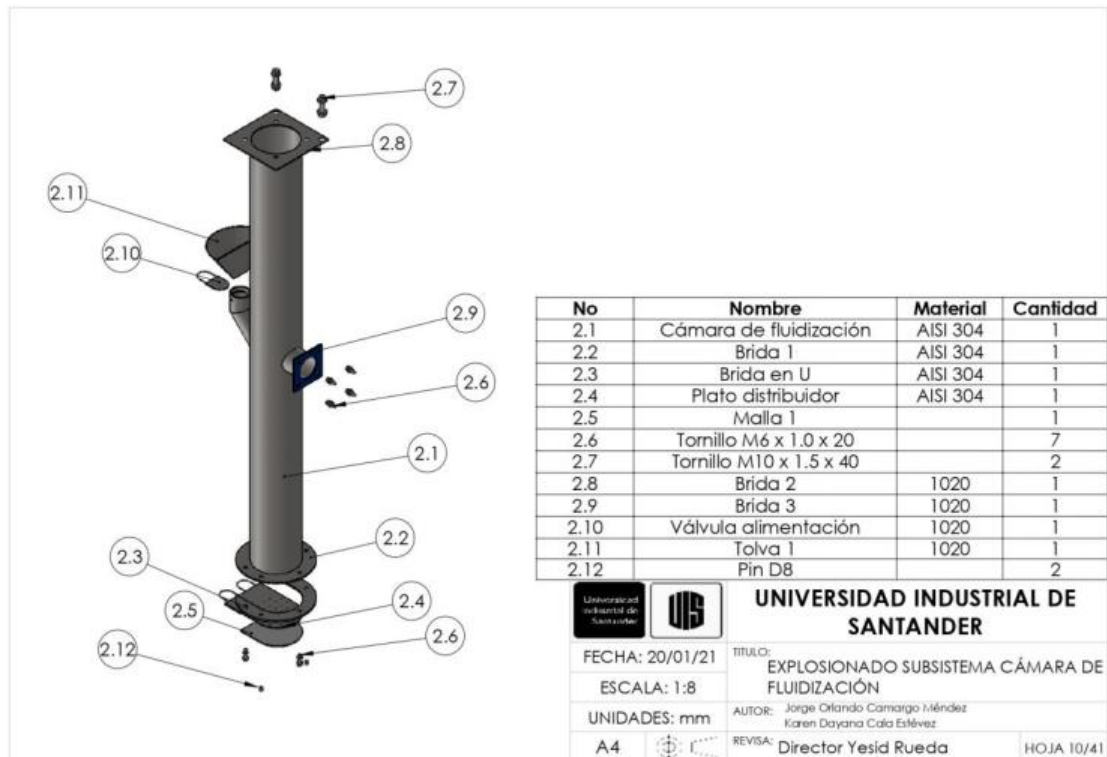
AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

A4



REVISÓ: Director Yesid Rueda

HOJA 8/41



No	Nombre	Material	Cantidad
2.1	Cámara de fluidización	AISI 304	1
2.2	Brida 1	AISI 304	1
2.3	Brida en U	AISI 304	1
2.4	Plato distribuidor	AISI 304	1
2.5	Malla 1		1
2.6	Tornillo M6 x 1.0 x 20		7
2.7	Tornillo M10 x 1.5 x 40		2
2.8	Brida 2	1020	1
2.9	Brida 3	1020	1
2.10	Válvula alimentación	1020	1
2.11	Tolva 1	1020	1
2.12	Pin D8		2



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TÍTULO: EXPLOSIONADO SUBSISTEMA CÁMARA DE FLUIDIZACIÓN

ESCALA: 1:8

AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

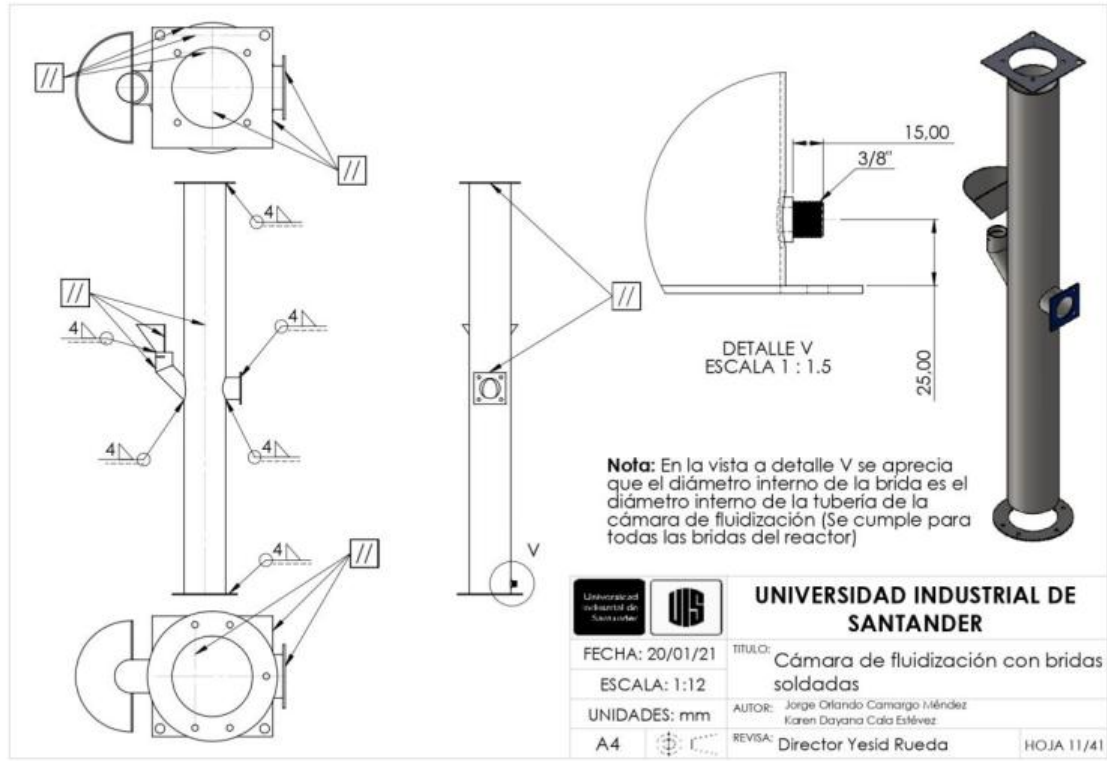
UNIDADES: mm

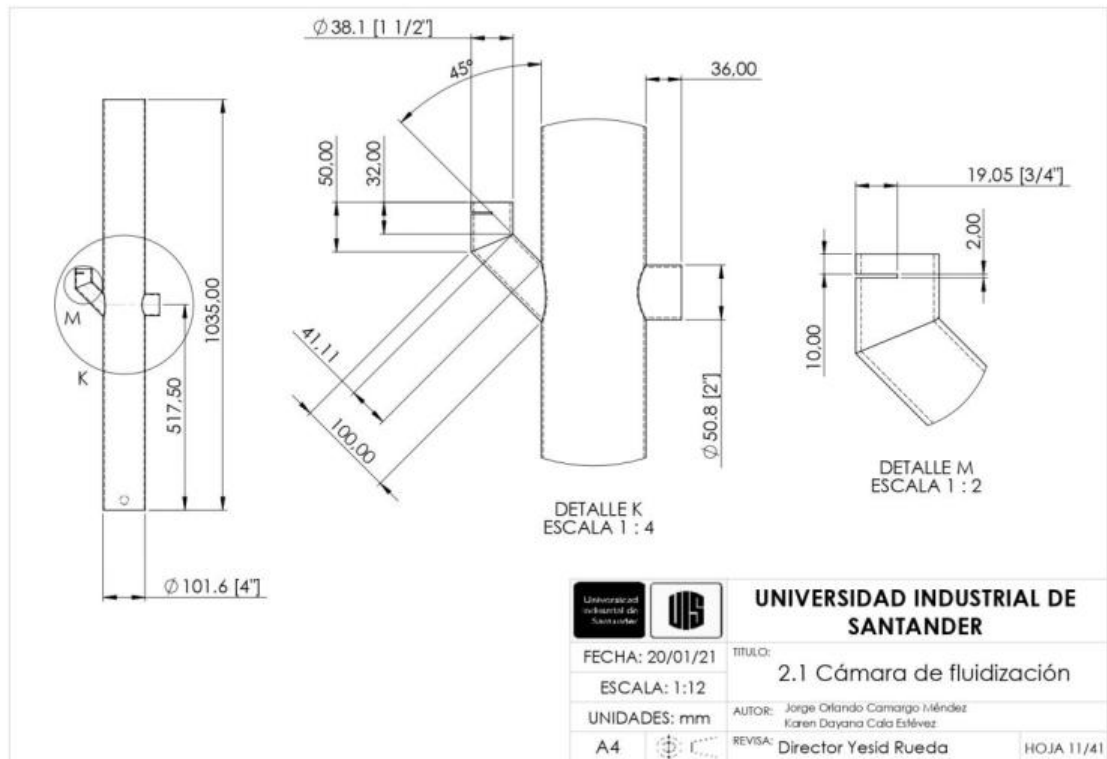
REVISÓ: Director Yesid Rueda

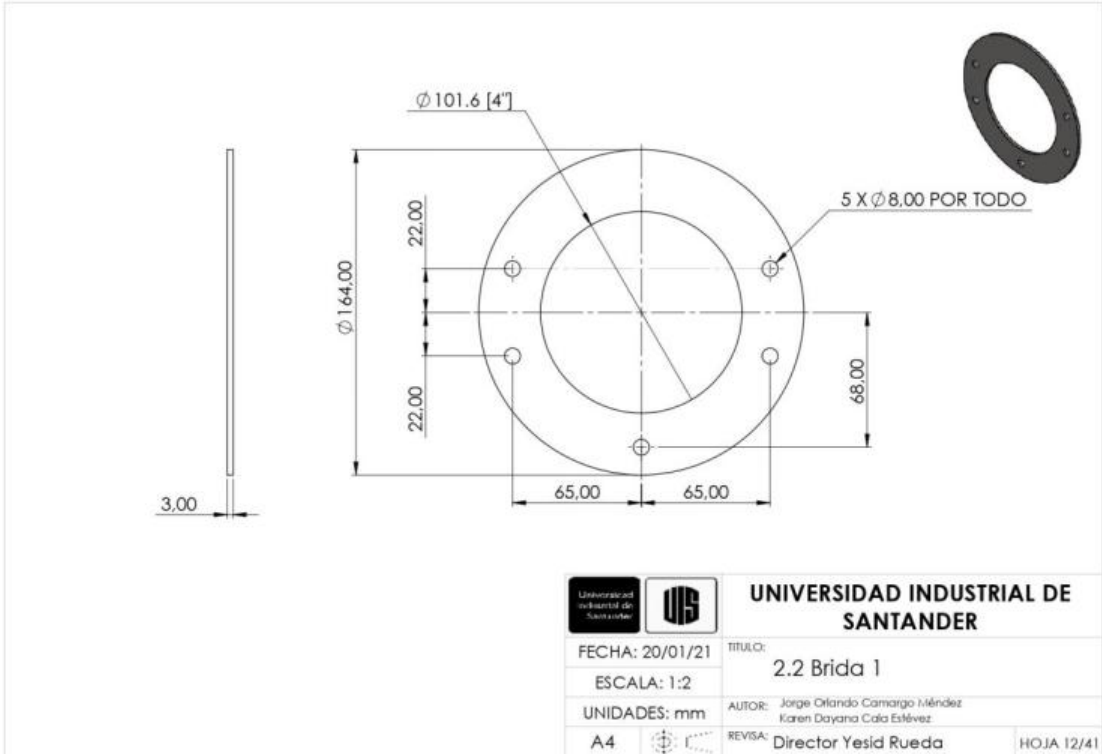
A4



HOJA 10/41

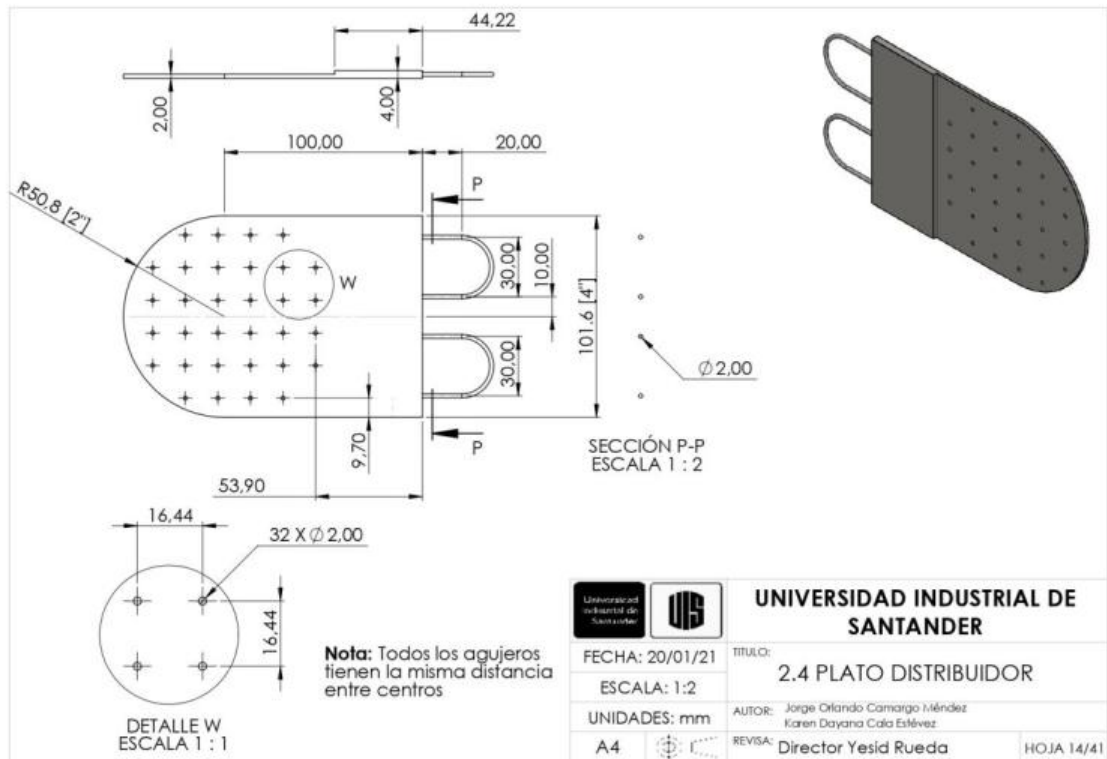


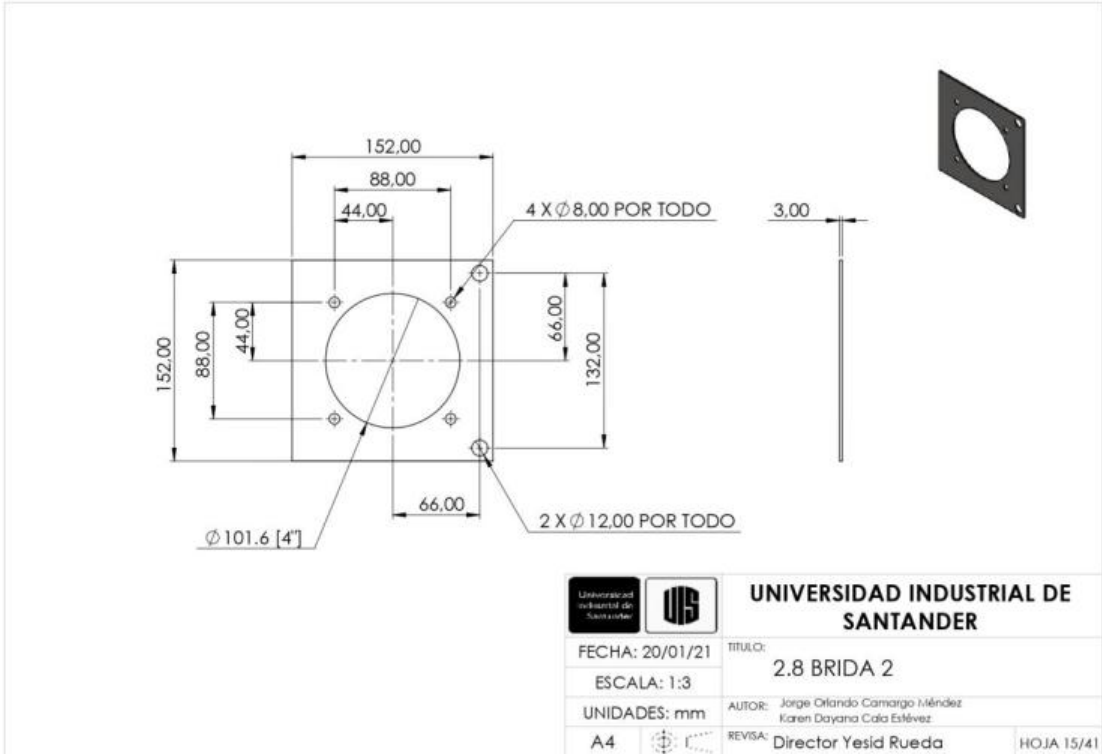




		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/01/21	TITULO:	2.2 Brida 1	
ESCALA: 1:2	AUTOR:	Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez	
UNIDADES: mm	REVISAR:	Director Yesid Rueda	HOJA 12/41
A4			







**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TITULO:

2.8 BRIDA 2

ESCALA: 1:3

AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

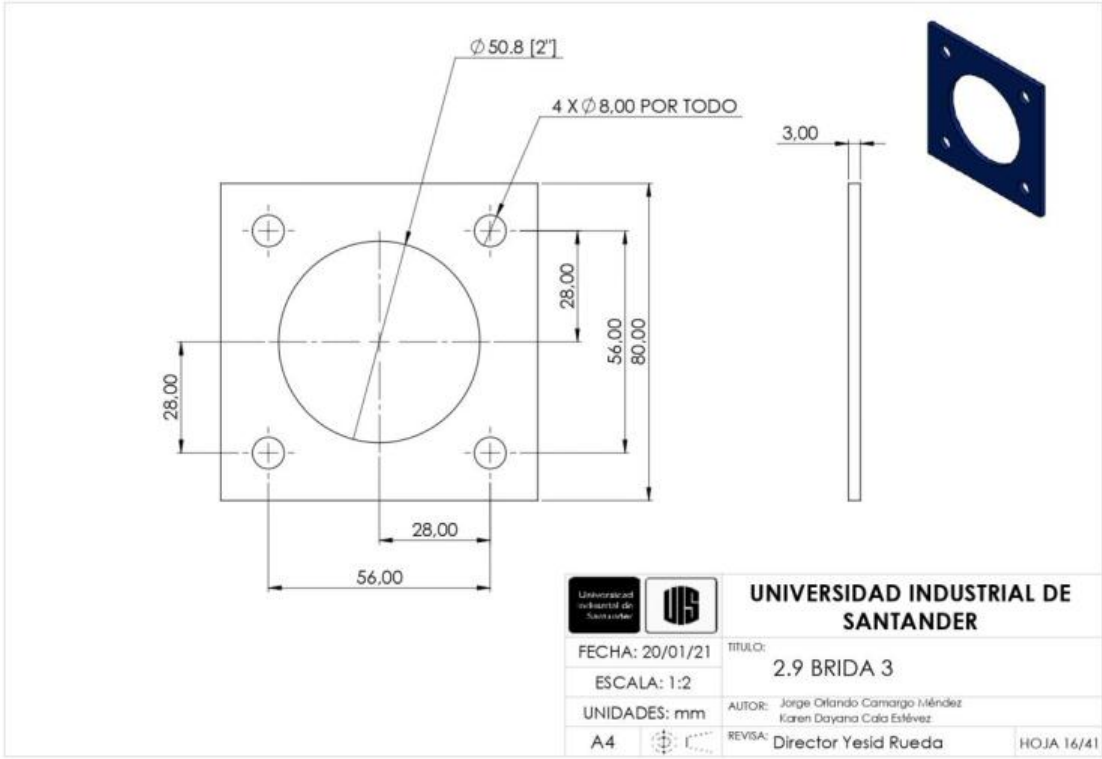
UNIDADES: mm

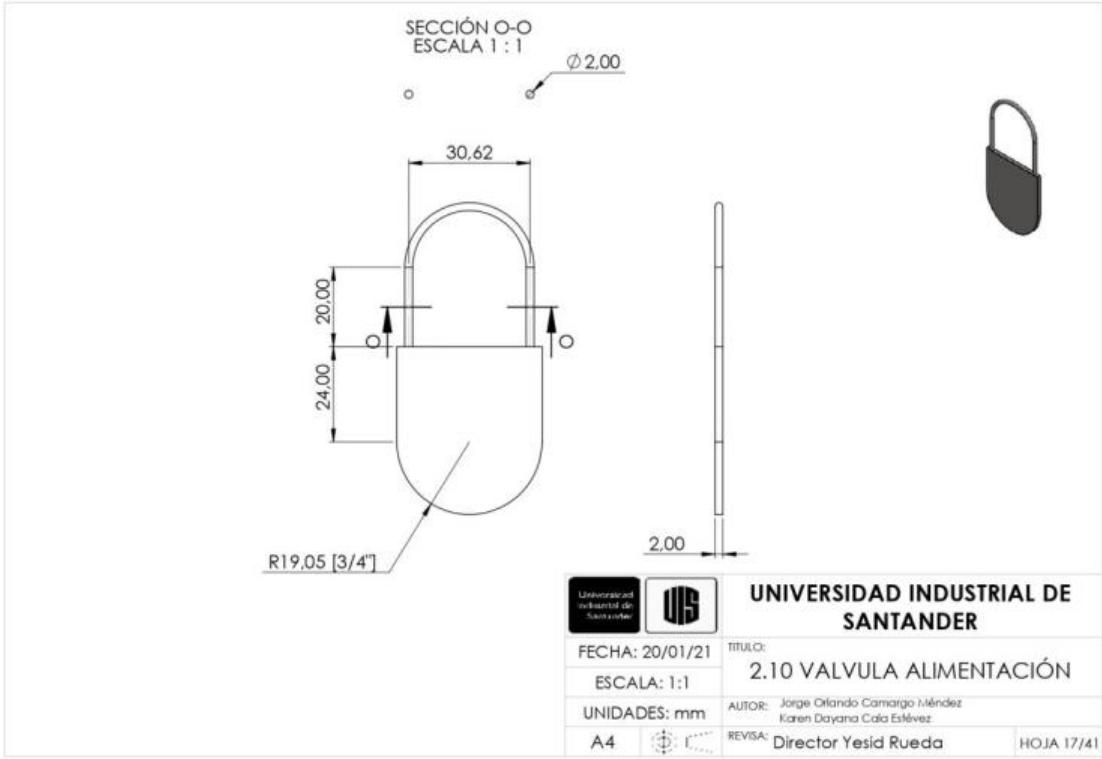
REVISAR: Director Yesid Rueda

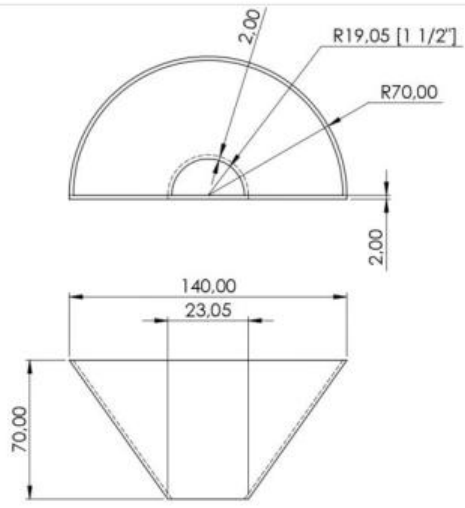
A4



HOJA 15/41





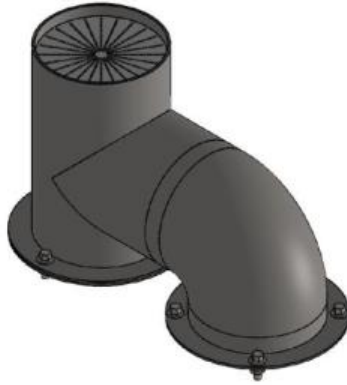


 		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/01/21		TITULO:	
ESCALA: 1:12		2.11 Tolva 1	
UNIDADES: mm		AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez	
A4		REVISAR: Director Yesid Rueda	HOJA 18/41



Cantidad: 2

 		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/01/21		TITULO: 2.12 Pin D8	
ESCALA: 4:1		AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez	
UNIDADES: mm		REVISAR: Director Yesid Rueda	
A4			HOJA 19/41



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TITULO:

ISOMÉTRICO SUBSISTEMA ESCAPE DE GASES

ESCALA: 1:3

UNIDADES: mm

AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

A4

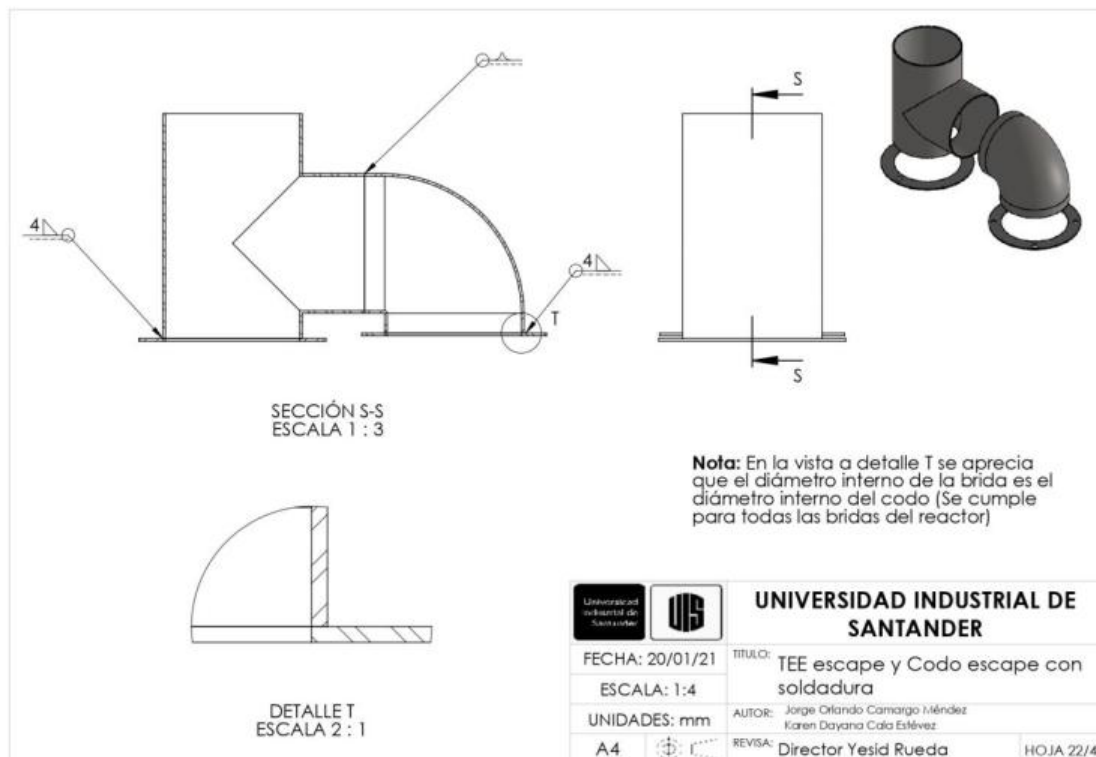


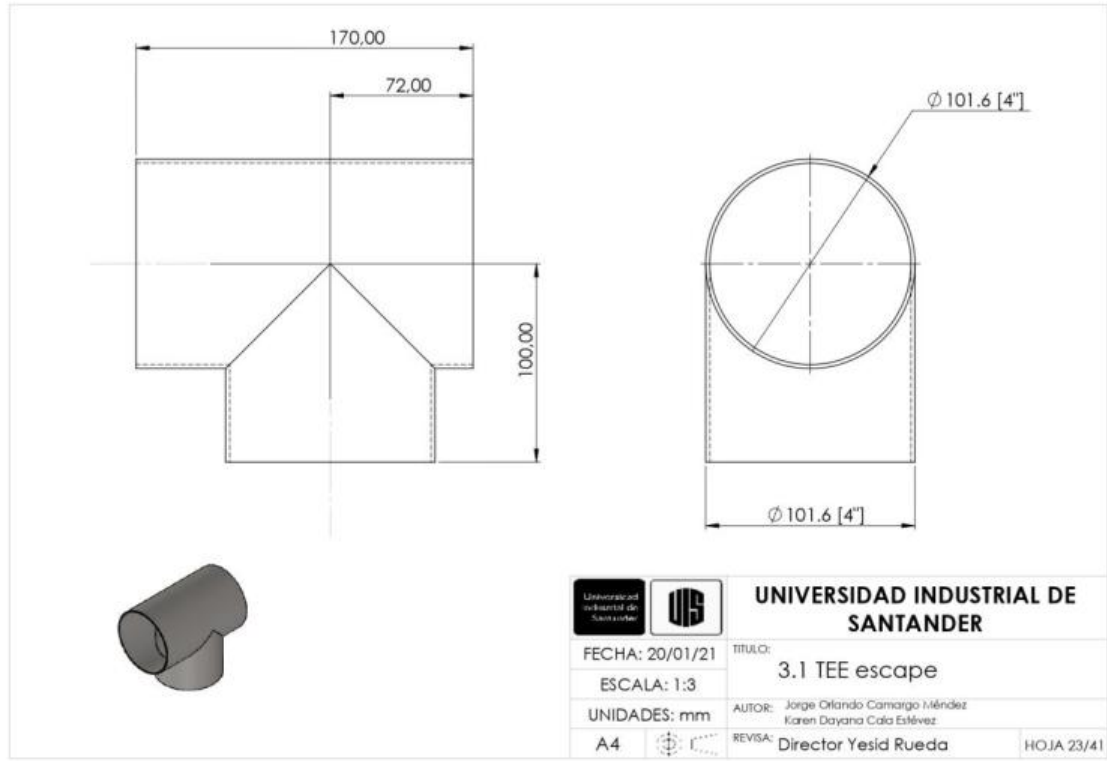
REVISÓ: Director Yesid Rueda

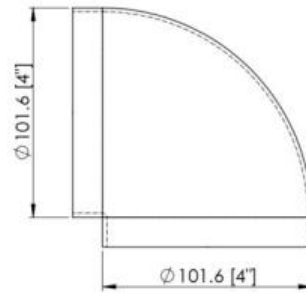
HOJA 20/41

No	Nombre	Material	Cantidad
3.1	TEE Escape	1020	1
3.2	Codo escape	1020	1
3.3	Brida 4	1020	1
3.4	Brida 5	1020	1
3.5	Tapa 1	1020	1
3.6	Tornillo M6 x 1.0 x 20		6
3.7	Malla 2		1

		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/01/21	TITULO: EXPLOSIONADO SUBSISTEMA ESCAPE DE GASES		
ESCALA: 1:5	AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez		
UNIDADES: mm	REVISOR: Director Yesid Rueda		HOJA 21/41
A4			







**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE  
SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TITULO:

ESCALA: 1:3

**3.2 Codo escape**

UNIDADES: mm

AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

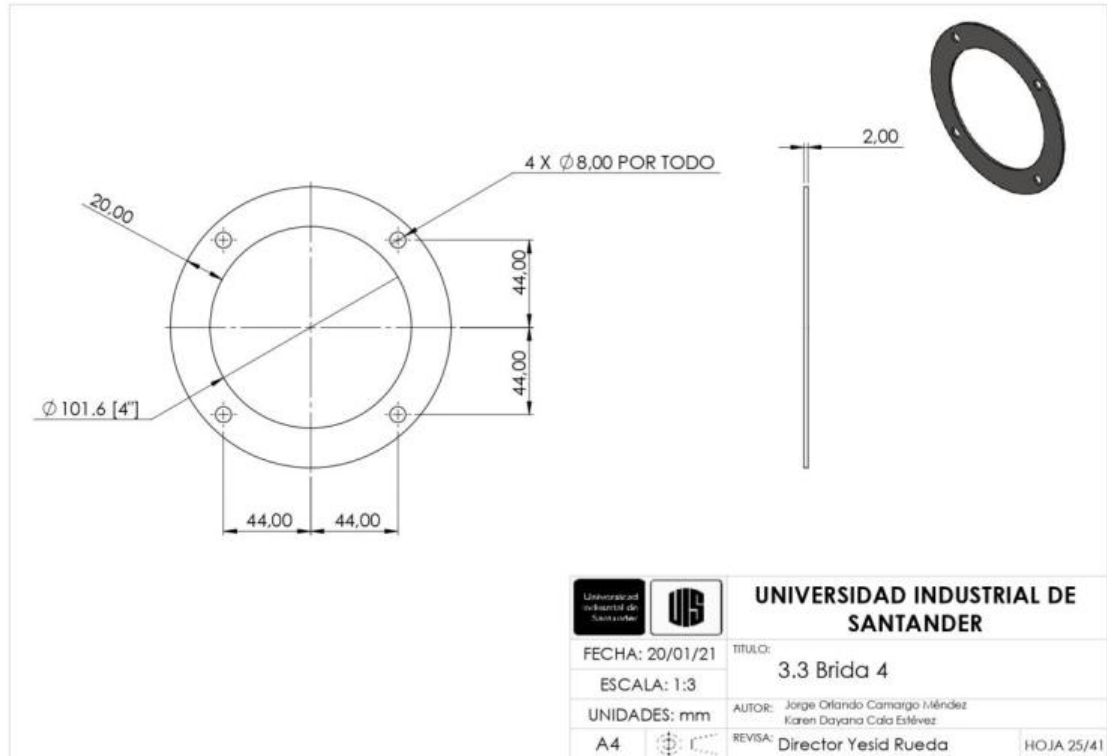
A4

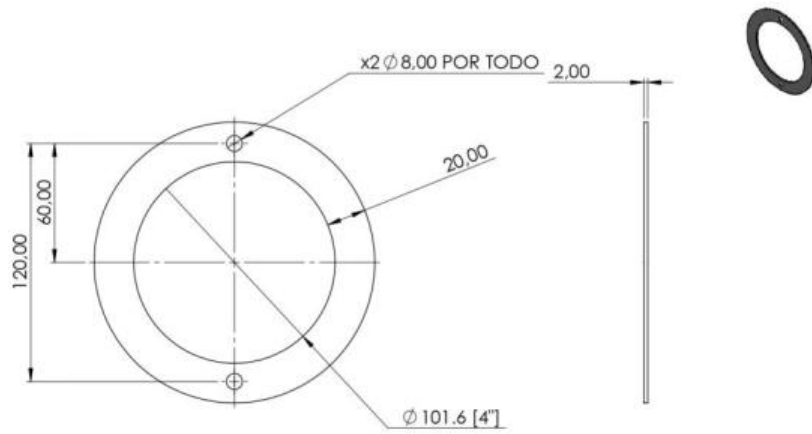


REVISAR

Director Yesid Rueda

HOJA 24/41





**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TITULO:

3.5 Breda 5

ESCALA: 1:3

UNIDADES: mm

AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

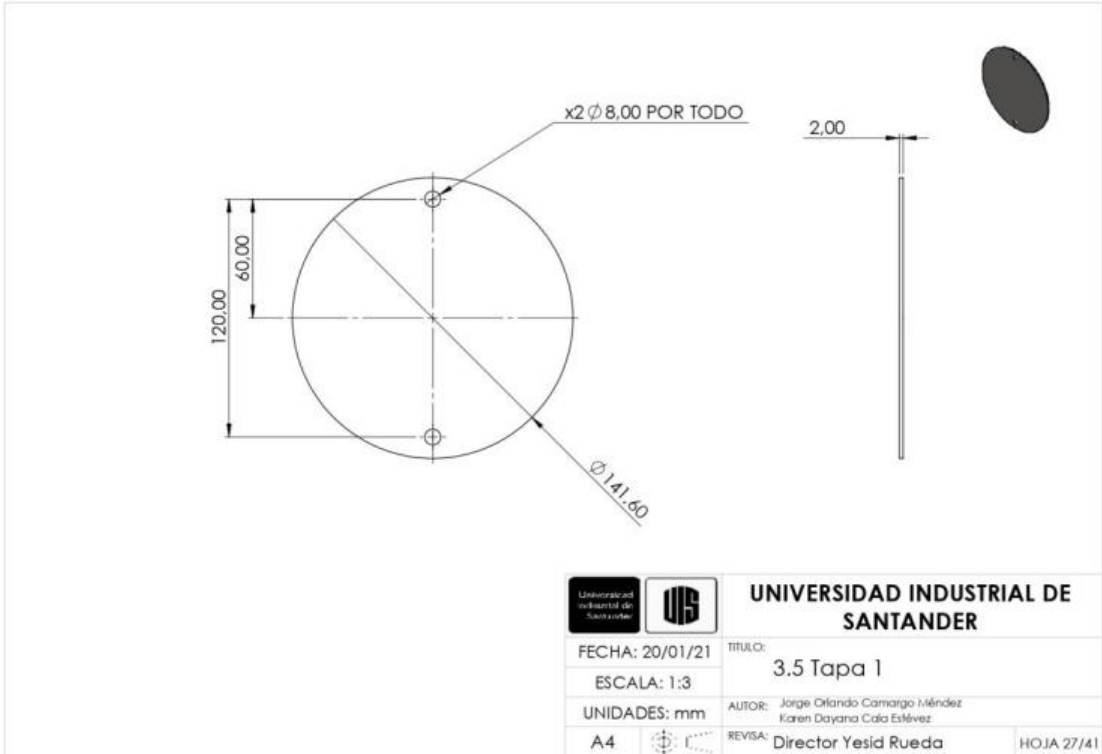
A4

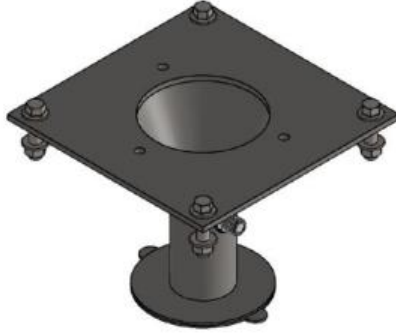


REVISAR

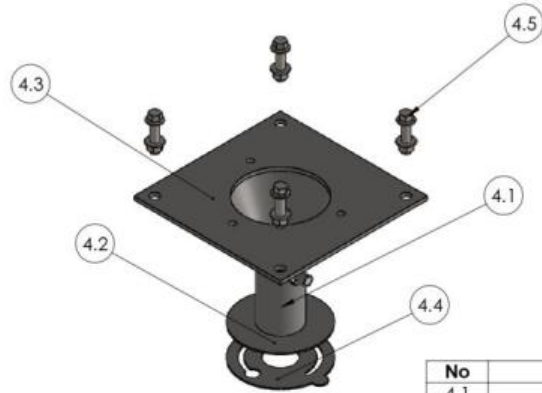
Director Yesid Rueda

HOJA 26/41



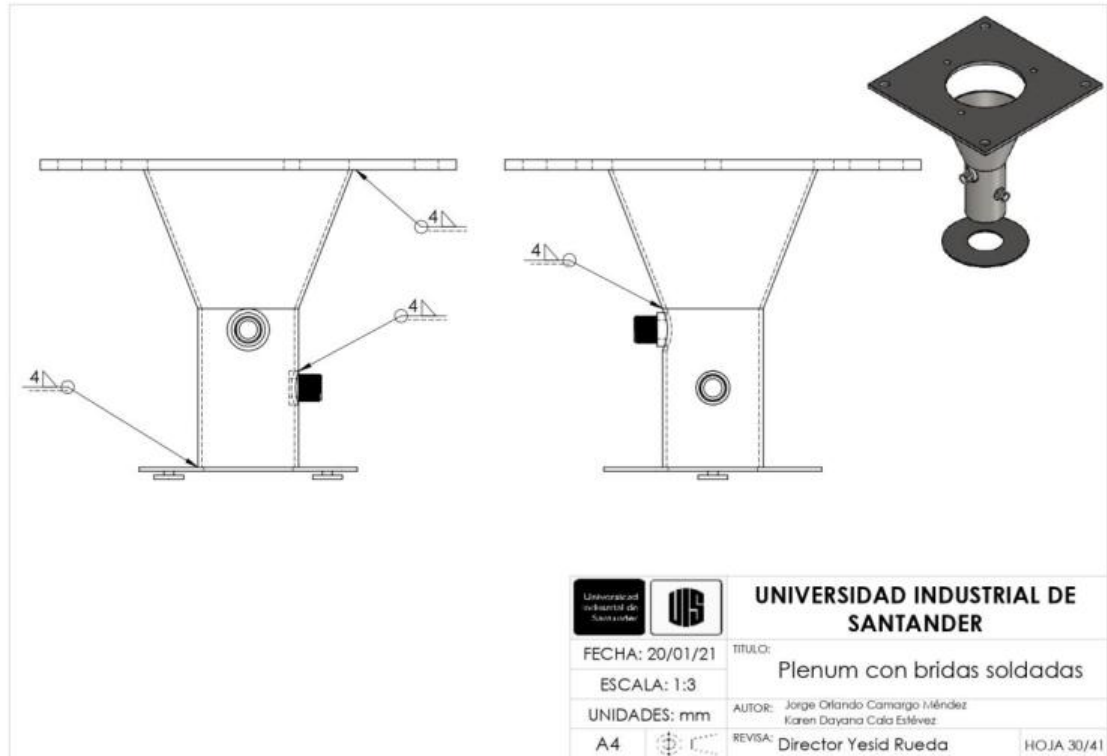


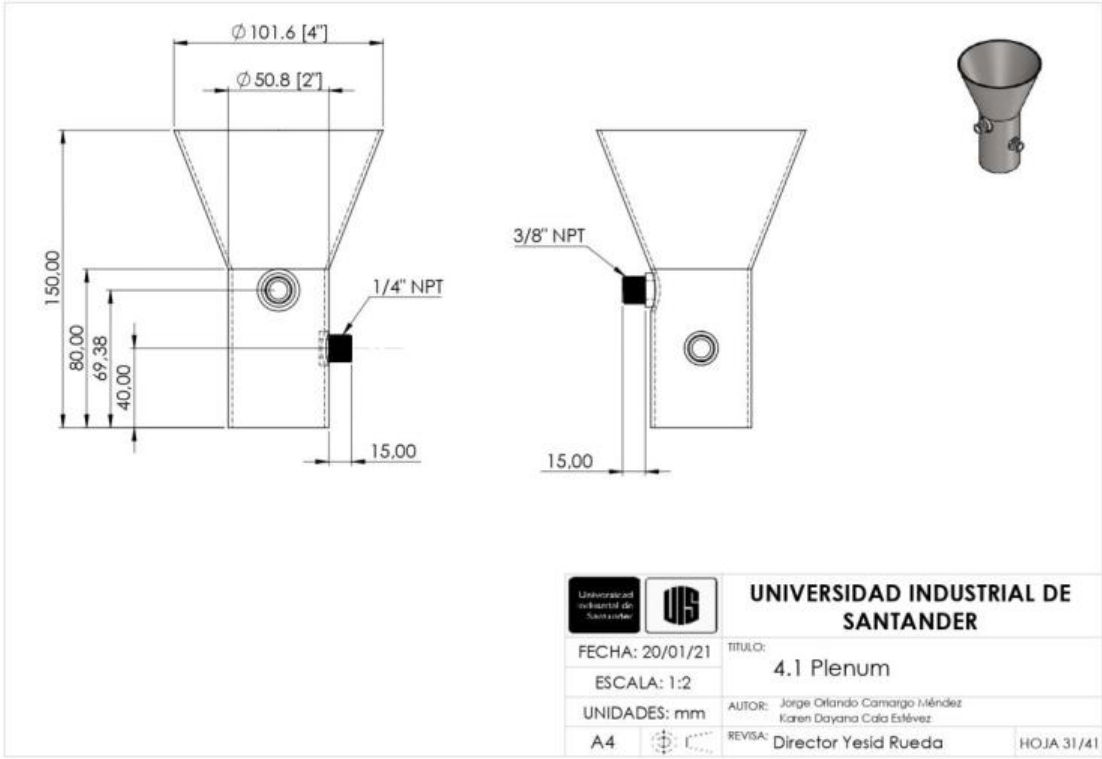
		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
FECHA: 20/01/21	TÍTULO: ISOMÉTRICO SUBSISTEMA CÁMARA DE PREFLUIDIZACIÓN	
ESCALA: 1:12	AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez	
UNIDADES: mm	REVISOR: Director Yesid Rueda	HOJA 28/41
A4		

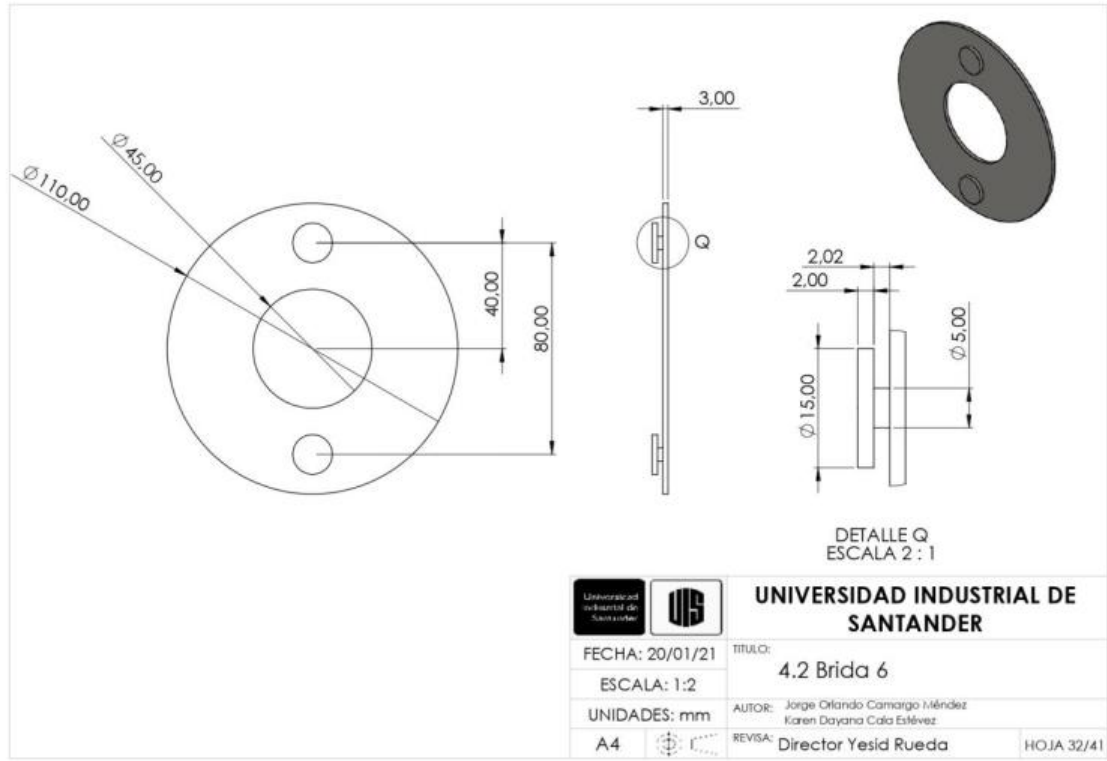


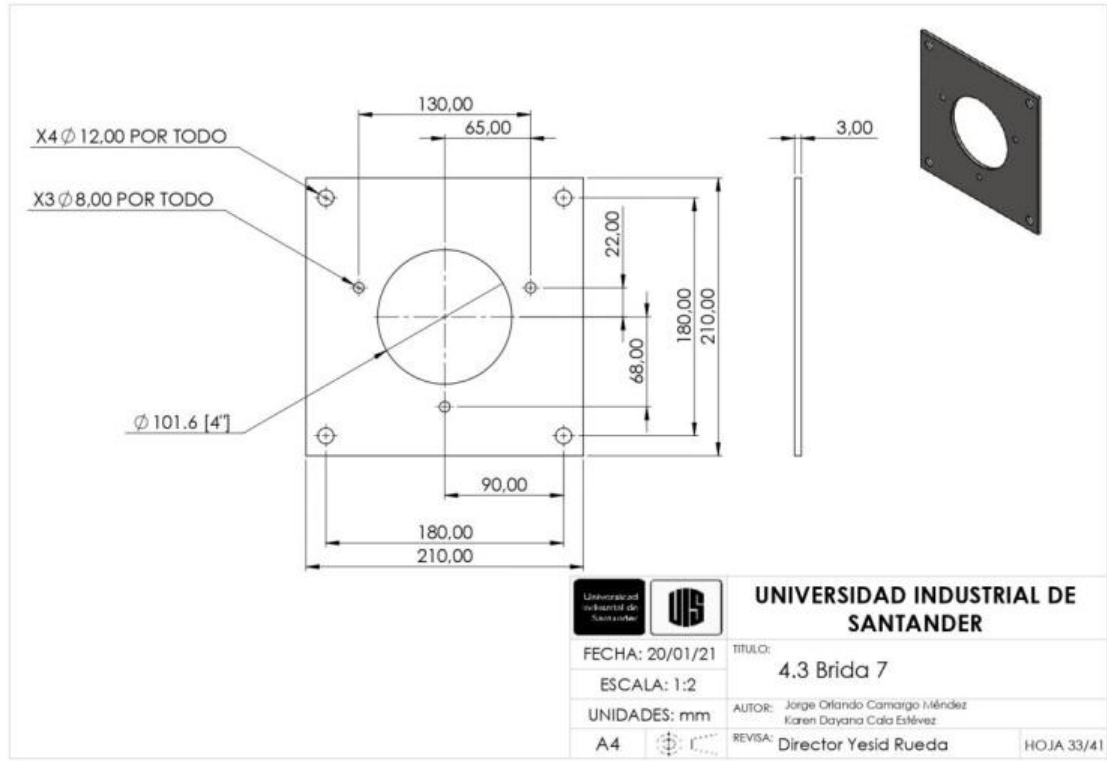
No	Nombre	Material	Cantidad
4.1	Plenum	AISI 304	1
4.2	Brida 6	AISI 304	1
4.3	Brida 7	AISI 304	1
4.4	Tapa 2	AISI 304	1
4.5	Tornillo M10 x 1.5 x 40		4

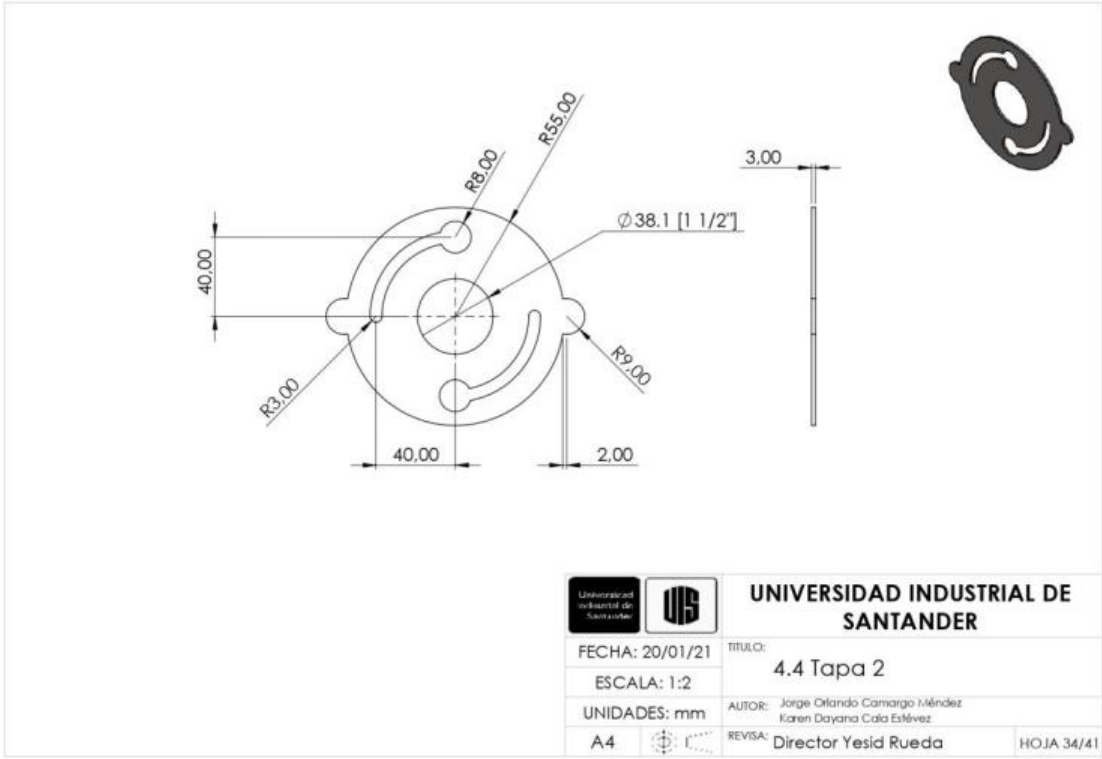
		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
		TITULO: EXPLOSIONADO SUBSISTEMA CÁMARA DE PREFLUIDIZACIÓN	
FECHA: 20/01/21	AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez		
ESCALA: 1:4	REVISOR: Director Yesid Rueda		
UNIDADES: mm	A4		HOJA 29/41

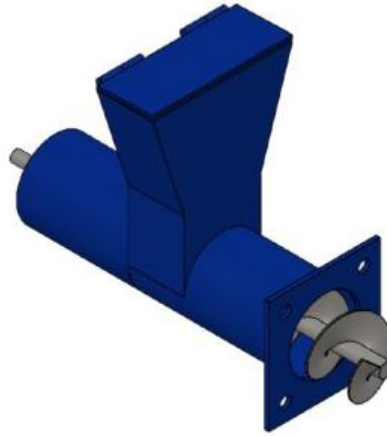












**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TÍTULO: ISOMÉTRICO SUBSISTEMA ALIMENTACIÓN

ESCALA: 1:2

UNIDADES: mm

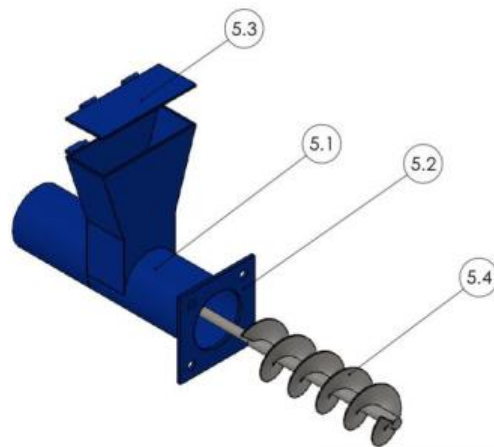
AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

A4



REVISÓ: Director Yesid Rueda

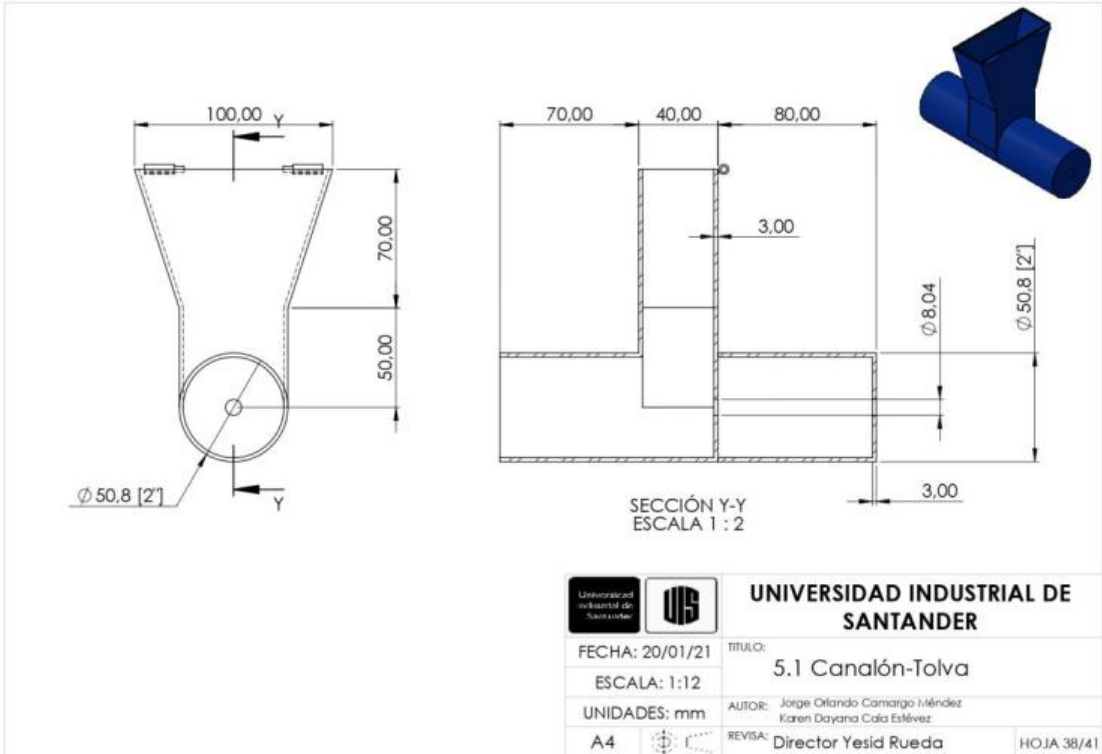
HOJA 35/41

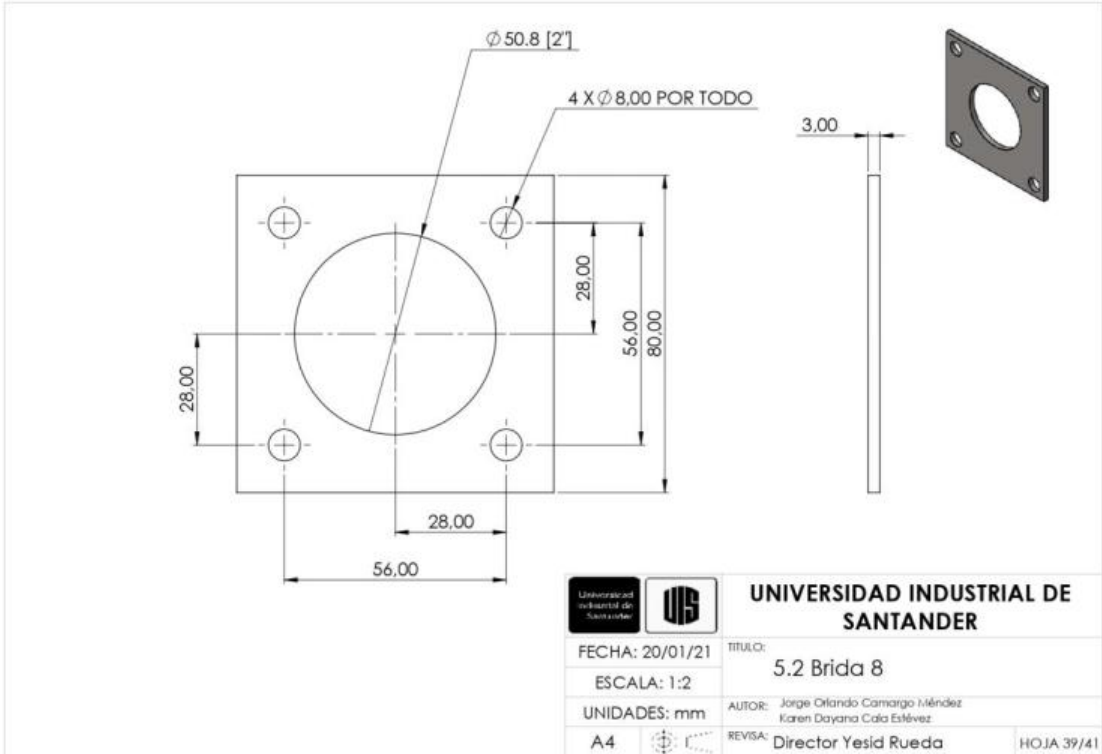


No	Nombre	Material	Cantidad
5.1	Canalón-Tolva	1020	1
5.2	Brida 8	1020	1
5.3	Tapa 3	1020	1
5.4	Tornillo sf	1020	1

		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/01/21	TITULO:	EXPLOSIONADO SUBSISTEMA ALIMENTACIÓN	
ESCALA: 1:2	AUTOR:	Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez	
UNIDADES: mm	REVISAR:	Director Yesid Rueda	HOJA 36/41
A4			

		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/01/21	TITULO:	Canalón-Tolva con bridas soldadas	
ESCALA: 1:12	AUTOR:	Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez	
UNIDADES: mm	REVISOR:	Director Yesid Rueda	HOJA 37/41
A4			





**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

FECHA: 20/01/21

TITULO:

5.2 Brida 8

ESCALA: 1:2

AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez  
Karen Dayana Cala Estévez

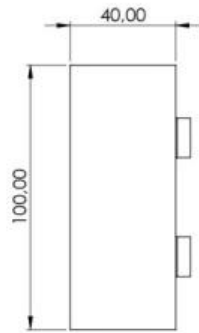
UNIDADES: mm

REVISAR: Director Yesid Rueda

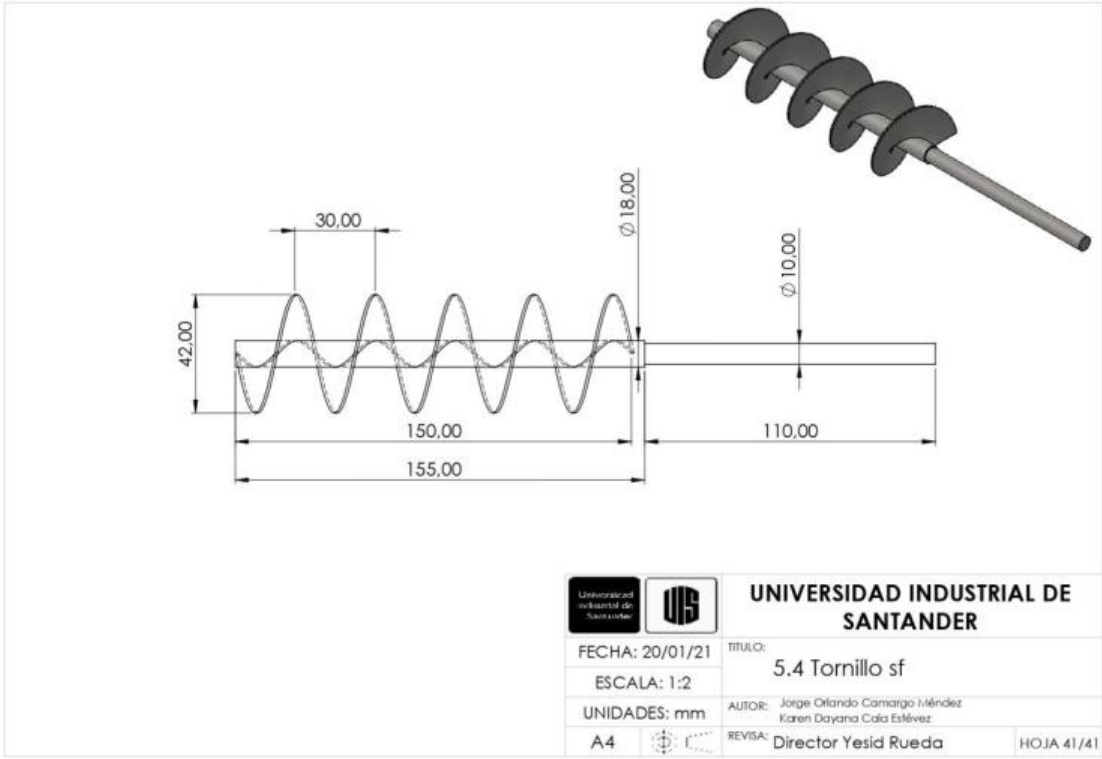
A4



HOJA 39/41



 		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/01/21		TITULO: 5.3 Tapa 3	
ESCALA: 1:2		AUTOR: Jorge Orlando Camargo Méndez Karen Dayana Cala Estévez	
UNIDADES: mm		REVISOR: Director Yesid Rueda	
A4			HOJA 40/41



# Anexo C. Guía de laboratorio



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
LABORATORIO DE COMBUSTIÓN INDUSTRIAL GRUPO XX  
01 DE MAYO DEL 2021, I SEMESTRE ACADÉMICO DE 2021

## COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL POR LECHO FLUIDIZADO

ESTUDIANTE 1  
Código

ESTUDIANTE 2  
Código

ESTUDIANTE 3  
Código

### INTRODUCCIÓN

Actualmente el campo de biocombustibles y energías alternativas es un tema de interés para la investigación, debido a los altos niveles de contaminación presentes, los biocombustibles son derivados de la biomasa y a su vez sustitutos alternativos de los combustibles fósiles, utilizados en aplicaciones tales como: calderas, hornos, motores de combustión interna y turbinas de gas; son fáciles de almacenar, manipular, además su transporte es más sencillo que el de la materia prima natural.

Diversos equipos y aparatos se han diseñado para la obtención de estos biocombustibles destacándose los reactores de lecho fluidizado ya que presentan las siguientes ventajas: estructura simple y escalado, diferentes diámetros de partícula, fácil operación, buena transferencia de calor y masa.

El fenómeno de la fluidización se presenta cuando un lecho de partículas sólidas se mantiene en suspensión debido a una corriente de un fluido, en este caso un gas que pasa a través de ellas, el comportamiento de dichas partículas guarda ciertas similitudes con el comportamiento de un fluido, de ahí el nombre “lecho fluidizado”

### OBJETIVOS

#### Objetivo general

Estudiar el fenómeno de fluidización de un lecho mediante el uso del micro reactor

#### Objetivos específicos

- Comprender y complementar los conceptos teóricos sobre el fenómeno de la fluidización
- Identificar los parámetros característicos que afectan el fenómeno de fluidización
- Analizar la combustión teórica y real del cisco de café

### MARCO TEÓRICO

Temas de consulta

- Lecho fluidizado

- Velocidad de mínima fluidización
- Velocidad de burbujeo
- Velocidad terminal de partículas
- Clasificación de partículas de Geldart
- Poder calorífico
- Esfericidad
- Diámetro de partícula
- Fracción de vacío o porosidad

### PARTES DEL BANCO

1. Cámara de fluidización: Es el lugar donde se encuentra el lecho de partículas, una vez el lecho se encuentre fluidizado debido al aire que entra por la parte inferior, se realiza el ingreso de la biomasa para realizar su proceso de combustión.
2. Plato distribuidor: Es uno de los principales elementos ya que su función principal es distribuir uniformemente el aire antes de entrar en la cámara de fluidización.
3. Sistema de alimentación de biomasa: Este sistema se encarga de transportar la biomasa hacia la cámara de fluidización.
4. Sistema de alimentación de arena: Este es un sistema muy sencillo, se realizó aparte de la alimentación de biomasa para evitar que queden residuos y así garantizar que lleguen los flujos masicos requeridos a la cámara de fluidización.
5. Sistema de escape de gases y filtración de partículas: En los reactores industriales se utilizan ciclones para la filtración de partículas, en este caso el filtro es sencillo se limita a retener partículas de gran tamaño, debido a que es un micro reactor. Los gases de reacción o gases de combustión deben pasar por este filtro para garantizar su calidad.

Figura 1. Principales partes del reactor



## EQUIPO Y MATERIALES

Materiales suministrados por el laboratorio:

- Cisco de café
- Arena fina de construcción
- Anemómetro
- Gramera

Materiales de cada grupo:

- Equipo de cómputo portátil
- Cronómetro
- Gafas de seguridad
- Bata manga larga
- Guantes de seguridad
- Zapatos cerrados
- Pantalón largo

## PROEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DATOS

1. Descargar e instalar los programas de Arduino y CoolTerm para hacer el registro de la temperatura del proceso
2. Descargar el código de Arduino para la termocupla tipo K
3. Realizar las conexiones de la termocupla al módulo MAX 6675 y al Arduino
4. Ubicar una taza debajo del plenum, retirar la tapa inferior y el plato distribuidor para desocupar cualquier residuo dentro del reactor.

5. Situar el plato distribuidor, la tapa superior de escape de gases.
6. Conectar la manguera del compresor al reactor
7. Revisar que el botón de encendido este abajo
8. Verificar el nivel de aceite
9. Suministrar 200g de arena al reactor.
10. Cerrar la compuerta de alimentación de arena
11. Introducir el quemador en la base inferior del plenum, encenderlo y cronometrar el tiempo de calentamiento de la arena 240 segundos.
12. Apagar y retirar el quemador, ubicando nuevamente la tapa inferior del plenum.
13. Encender el compresor con la válvula completamente cerrada, pasados 10 segundos abrir la válvula los grados indicados en la tabla 2 y tomar los valores de la caída de presión (Entre el plenum y el lecho) del manómetro de agua. Al finalizar la prueba, se debe medir el caudal del compresor en la apertura de la válvula en la cual fluidizó el lecho desconectando la manguera del reactor y utilizando el anemómetro. Finalmente, con el área transversal de la cámara de fluidización calcular la velocidad del fluido.
14. Suministrar la biomasa en la tolva de alimentación del tornillo
15. Energizar y encender el sistema de alimentación de biomasa a 4 rpm durante 3,72 segundos para garantizar el flujo másico de 1,3 g/min.
16. Tomar los datos de temperatura y tiempo a la salida del reactor en la tabla 2.
17. Una vez transcurrido el tiempo de prueba, apagar y desenergizar el compresor y el sistema de alimentación de biomasa.

## CÁLCULO DE TIPO

Datos de interés para la realización de la prueba:

Tabla 1. Datos

General		
Calor de pérdidas [W]	$Q_p$	143,7
Diámetro cámara de fluidización [m]	$D_c$	0,1
Velocidad mínima del tornillo [rpm]	$V_{min}$	4
Flujo másico combustible [kg/h]	$m_{comb}$	5
Flujo másico biomasa [g/min]	$m_{bio}$	1,3
Arena		
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$	2659
Diámetro de partícula [m]	$d_p$	0,00056
Esfericidad	$\Phi$	0,86
Fracción de vacío	$\epsilon_m$	0,38
Fracción de vacío en mínima fluidización	$\epsilon_{mf}$	0,44
Altura del lecho [m]	$L_b$	0,05
Cisico		
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$	1323
Diámetro de partícula [m]	$d_p$	0,000362
Esfericidad	$\Phi$	0,4
Fracción de vacío	$\epsilon_m$	0,9184
Fracción de vacío en mínima fluidización	$\epsilon_{mf}$	0,5631
Poder calorífico [MJ/Kg]	$P_{cbio}$	17,5
Aire a 280°C		
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_g$	0,5709
Viscosidad [Kg/m-s]	$\mu_g$	0,00002908

Se deben realizar los siguientes cálculos y llenar la siguiente tabla:

Tabla 2. Toma de datos [m/s]

Toma	Apertura de válvula [°]	$\Delta P$ [mca]	¿Fluidizó ?	Umf [m/s]	Temperatura de salida
1	10				
2	20				
3	30				
3	45				
4	60				
5	70				
6	80				
7	90				

1. Calcular la velocidad mínima de fluidización de forma experimental (gráfica Umf vs  $\Delta P$ ) y teórica (fórmula), comparar estos valores y determinar el porcentaje de error. La velocidad mínima de fluidización experimental se obtiene en el momento en el que la apertura de la válvula deja de incrementar la caída de presión y la teórica se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\frac{150 * \mu_g * Umf * (1 - \epsilon_{mf})^2}{(dp * \Phi)^2 * \epsilon_{mf}^3} + \frac{1,75 * \rho_g * Umf^2 * (1 - \epsilon_{mf})}{dp * \Phi * \epsilon_{mf}^3} = ((1 - \epsilon_{mf}) * (\rho_p * \rho_g)) * g =$$

2. Determinar la velocidad terminal de partículas

$$U_t = \left( \frac{4 * dp * (\rho_p - \rho_g) * g}{3 * \rho_g * CD} \right)^{0,5}$$

Donde CD es un coeficiente de arrastre determinado experimentalmente

$$CD = \frac{24}{Rep} * (1 + 8,1716 * e^{(-4,0655 * \Phi)}) * Rep^{(0,0964 + 0,5565 * \Phi)} + \frac{73,69 * Rep * e^{(-5,0748 * \Phi)}}{Rep + 5,378 * e^{(-6,2122 * \Phi)}}$$

3. Determinar el número de Reynolds:

$$Rep = \frac{U_{mf} * dp * \rho_g}{\mu_g}$$

4. Calcular el calor generado por el reactor aplicando la primera ley de la termodinámica con los datos de temperatura hallados. Importante tener en cuenta el calor de pérdida por transferencia de calor  $Q_p$ , el flujo

másico del combustible  $m_{comb}$  y el flujo másico de biomasa  $m_{bio}$ .

5. Determinar la eficiencia térmica del proceso aplicando la segunda ley de la termodinámica. Tener en cuenta el consumo de potencia del compresor y el consumo energético del combustible.

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{ent}}$$

#### ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES

Análisis:

1. Realizar gráfica de temperatura vs tiempo con su respectivo análisis.
2. Realizar gráfica de caída de presión vs velocidad del flujo con su respectivo análisis.

Realizar 5 conclusiones

#### REFERENCIAS

[1] KUNII DAIZO y Octave Levenspiel. Fluidization Engineering. 2 ed. Boston : s.n., 1923. ISBN 0-409-90233-0.

[2] CENGEL, YUNUS A. Termodinámica. 6 ed. s.l.: Mc Graw Hill

[3] CALA ESTÉVEZ, Karen Dayana y CAMARGO MENDEZ, Jorge Orlando. Diseño y construcción de un reactor de lecho fluidizado para combustión de biomasa residual a escala de laboratorio, Bucaramanga, 2021.

## Anexo D. Tutorial para los programas de Arduino y CoolTerm

Descargar e instalar el programa da Arduino

Descargar e instalar el programa CoolTerm

Conectar la tarjeta al dispositivo de cómputo portátil

Abrir el programa de Arduino

Ingresar el código:

```
//Se llaman las librerías necesarias para controlar la termocupla
#include <Thermocouple.h>
#include <MAX6675_Thermocouple.h>

//Se asignan los puertos de entrada para los pines de información del módulo
MAX6675
#define SCK_PIN 13
#define CS_PIN 12
#define SO_PIN 11
Thermocouple* termocoupla;

// Define el canal de comunicación con el computador mediante el cable USB y
crea una variable en la que se guardaran los datos de la termocupla
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  termocoupla = new MAX6675_Thermocouple(SCK_PIN, CS_PIN, SO_PIN);
}

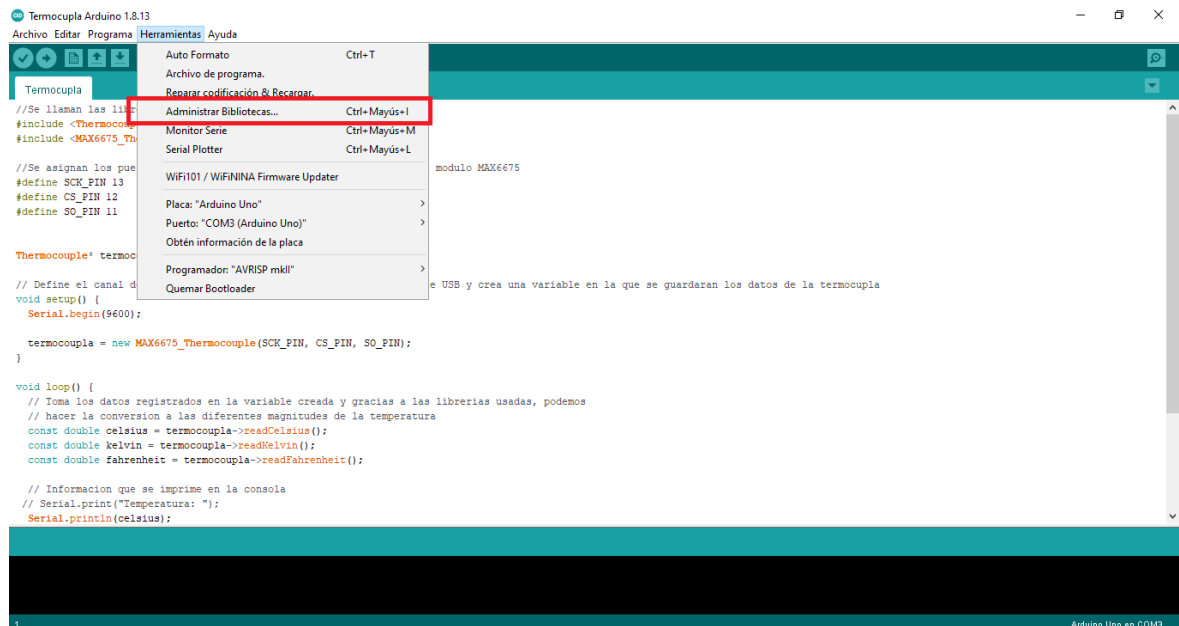
void loop() {
  // Toma los datos registrados en la variable creada y gracias a las librerías usadas,
podemos
  // hacer la conversión a las diferentes magnitudes de la temperatura
  const double celsius = termocoupla->readCelsius();
  const double kelvin = termocoupla->readKelvin();
  const double fahrenheit = termocoupla->readFahrenheit();
```

```

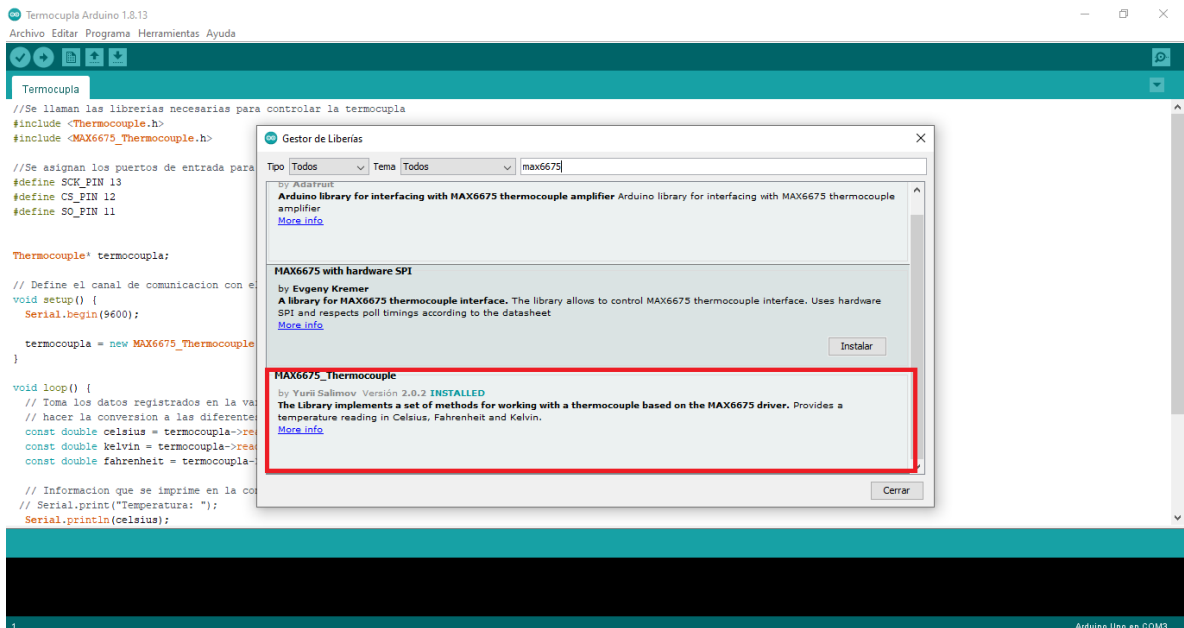
// Información que se imprime en la consola
// Serial.print("Temperatura: ");
Serial.println(celsius);
/*
Serial.print(" C, ");
Serial.print(kelvin);
Serial.print(" K, ");
Serial.print(fahrenheit);
Serial.println(" F");
*/
delay(500); // Tiempo de retraso entre cada medicion tomadada
}

```

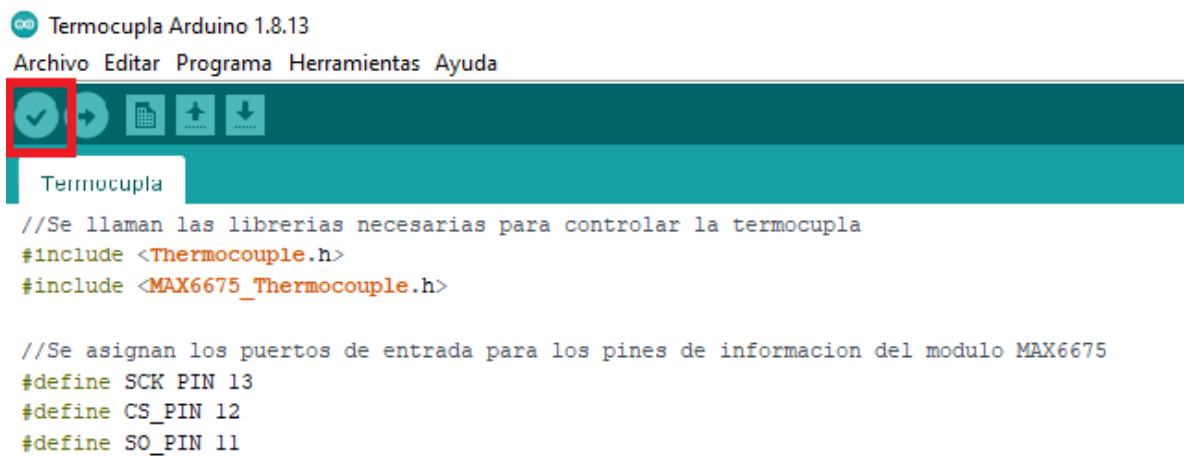
Seleccionar la opción de herramientas y hacer clic en administrar bibliotecas



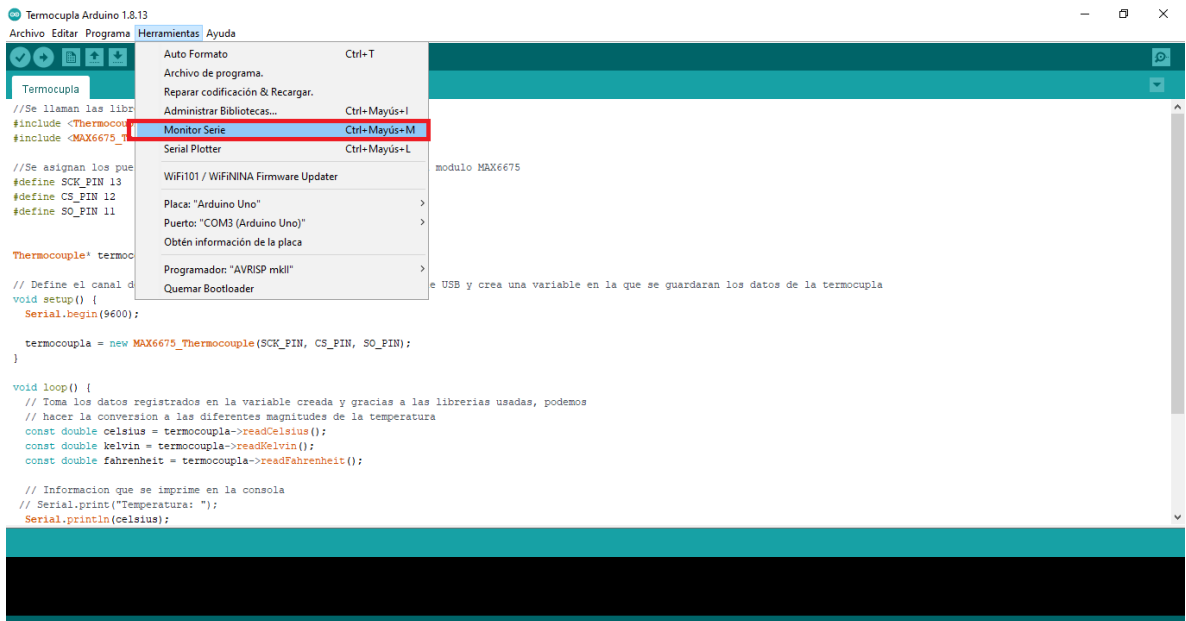
En la barra superior derecha de color blanco escribir max6675, luego oprimir enter, seleccionar MAX6675\_Thermocouple y dar clic en instalar



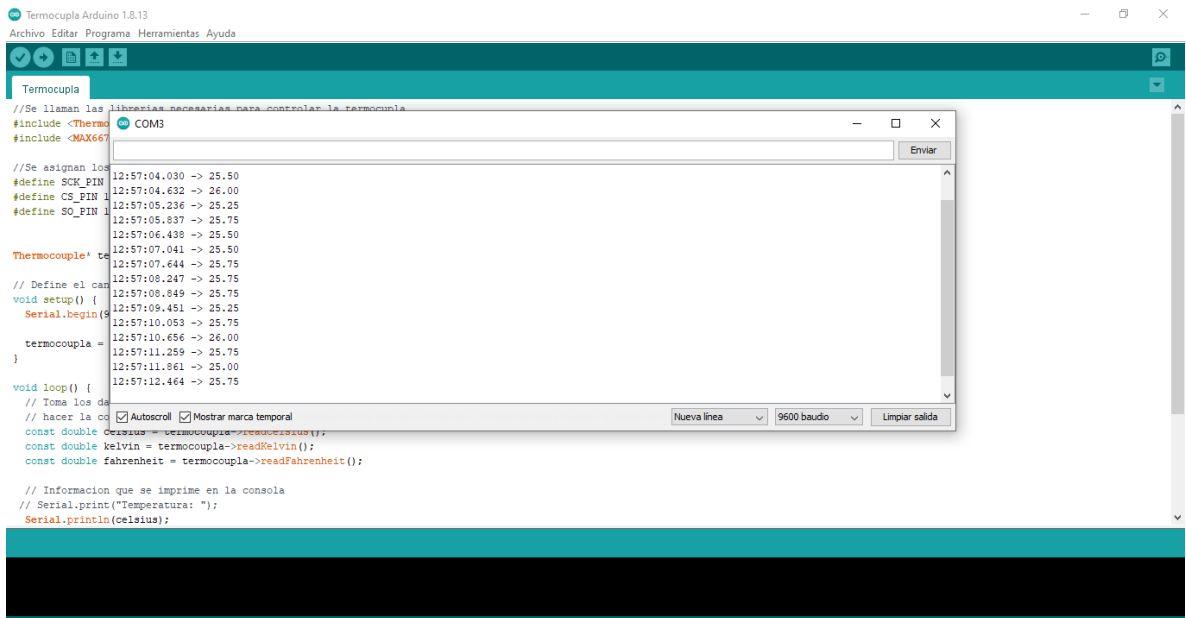
Clic en el chulo (✓) para verificar que el código este correcto



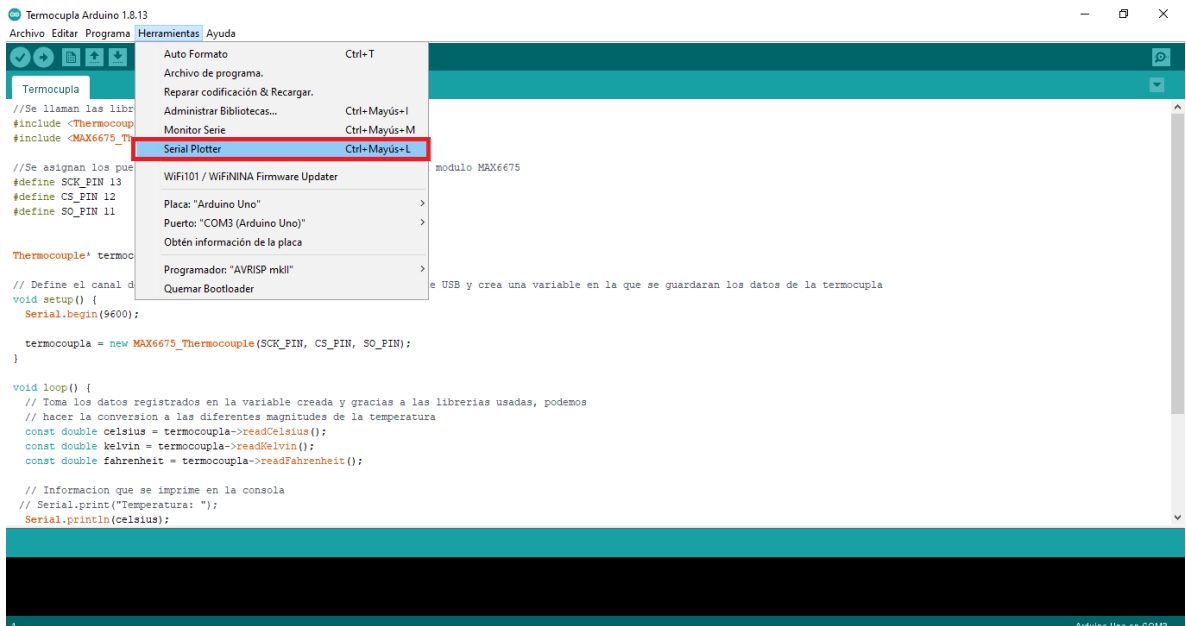
Dar clic en herramientas y seleccionar la opción monitor serie



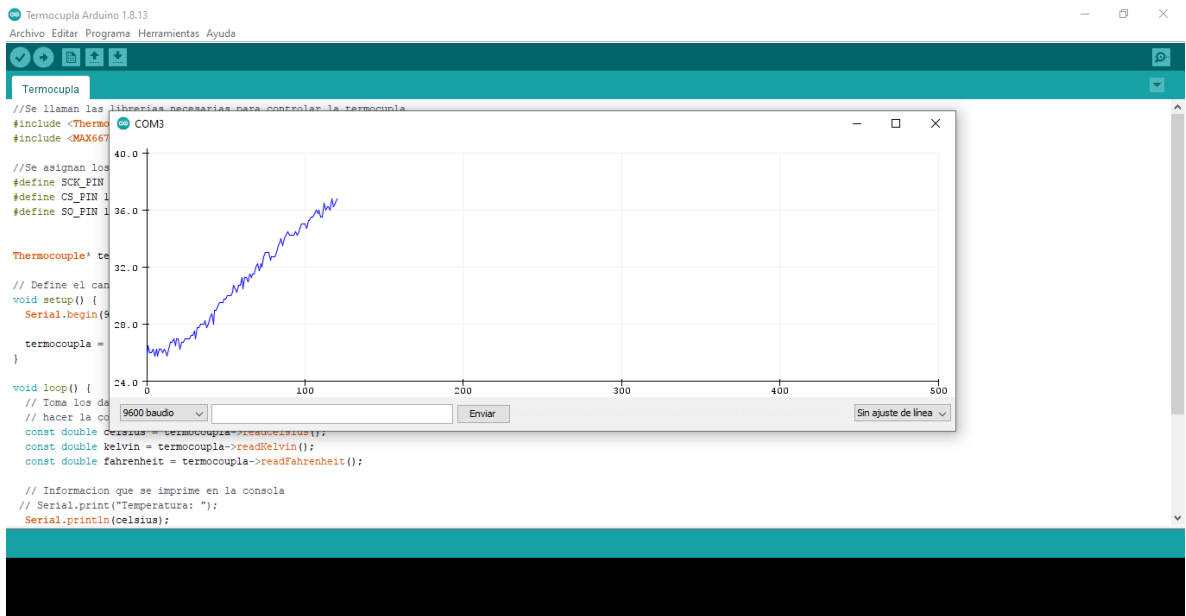
Se muestra una ventana llamada COM3 que muestra los valores de temperatura en tiempo real registrados por la termocupla



Para ver la gráfica de temperatura vs tiempo del proceso, pulsar herramientas y seleccionar serial plóter



Aparece una ventana en donde se ve la gráfica de temperatura vs tiempo del proceso

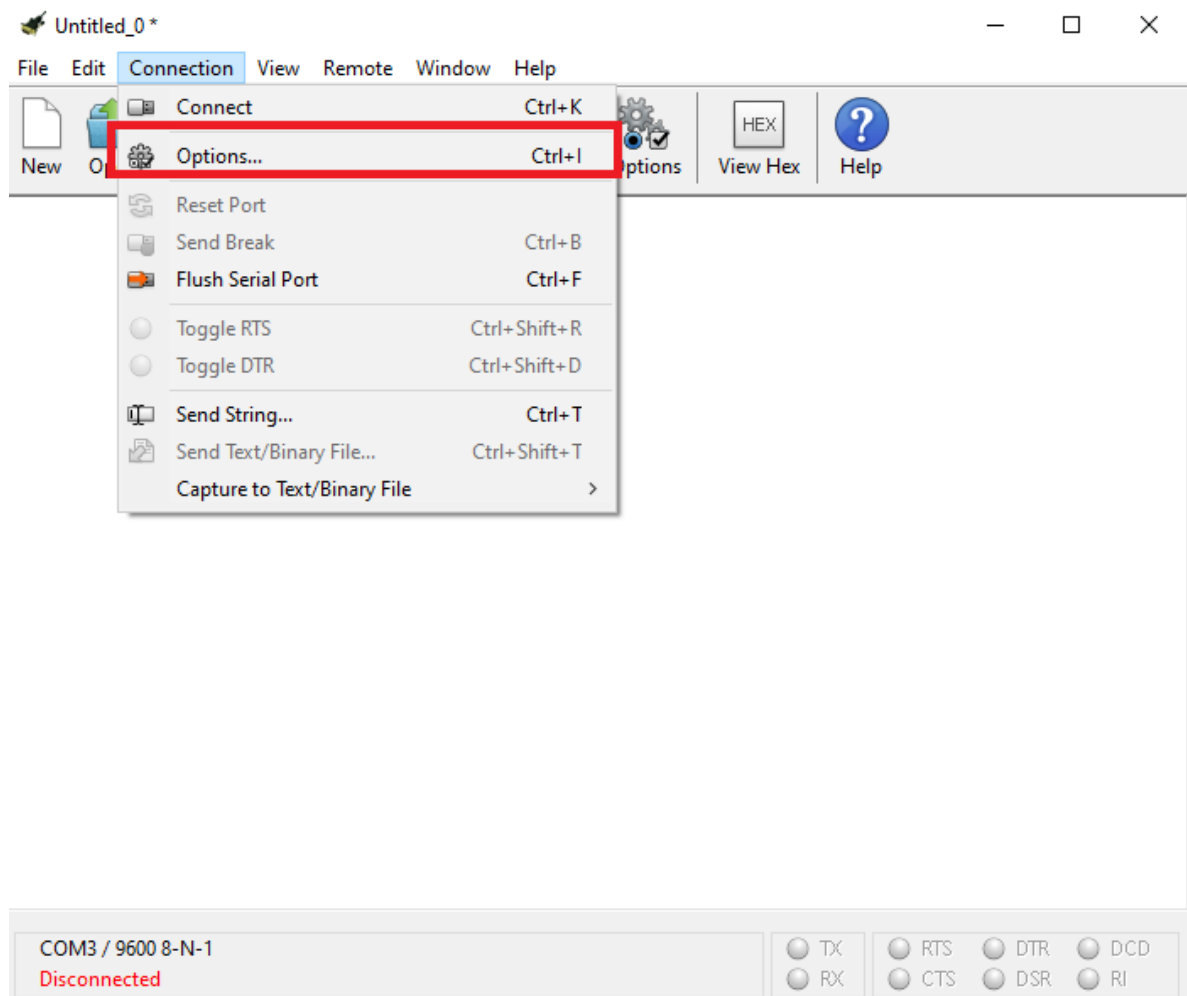


Cerrar esas pestañas

Para guardar los valores registrados por la termocupla se debe abrir el programa CoolTerm

Dar clic en use defaults

Dar clic en connection, options



Llenar los siguientes cuadros con la información correspondiente

Connection Options (Untitled\_0)

Serial Port Options

Port: COM3

Baudrate: 9600

Data Bits: 8

Parity: None

Stop Bits: 1

Flow Control:  CTS  
 DTR  
 XON

Software Supported Flow Control

Block Keystrokes while flow is halted

Initial Line States when Port opens:

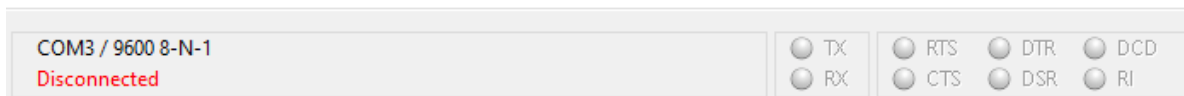
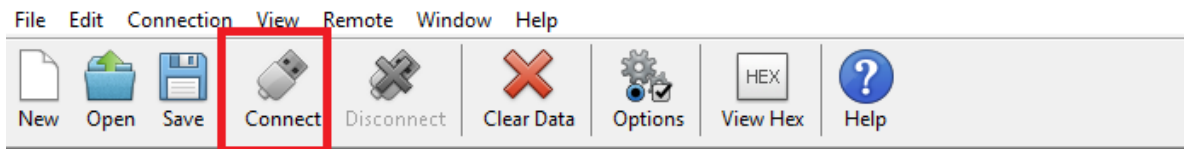
DTR On     DTR Off

RTS On     RTS Off

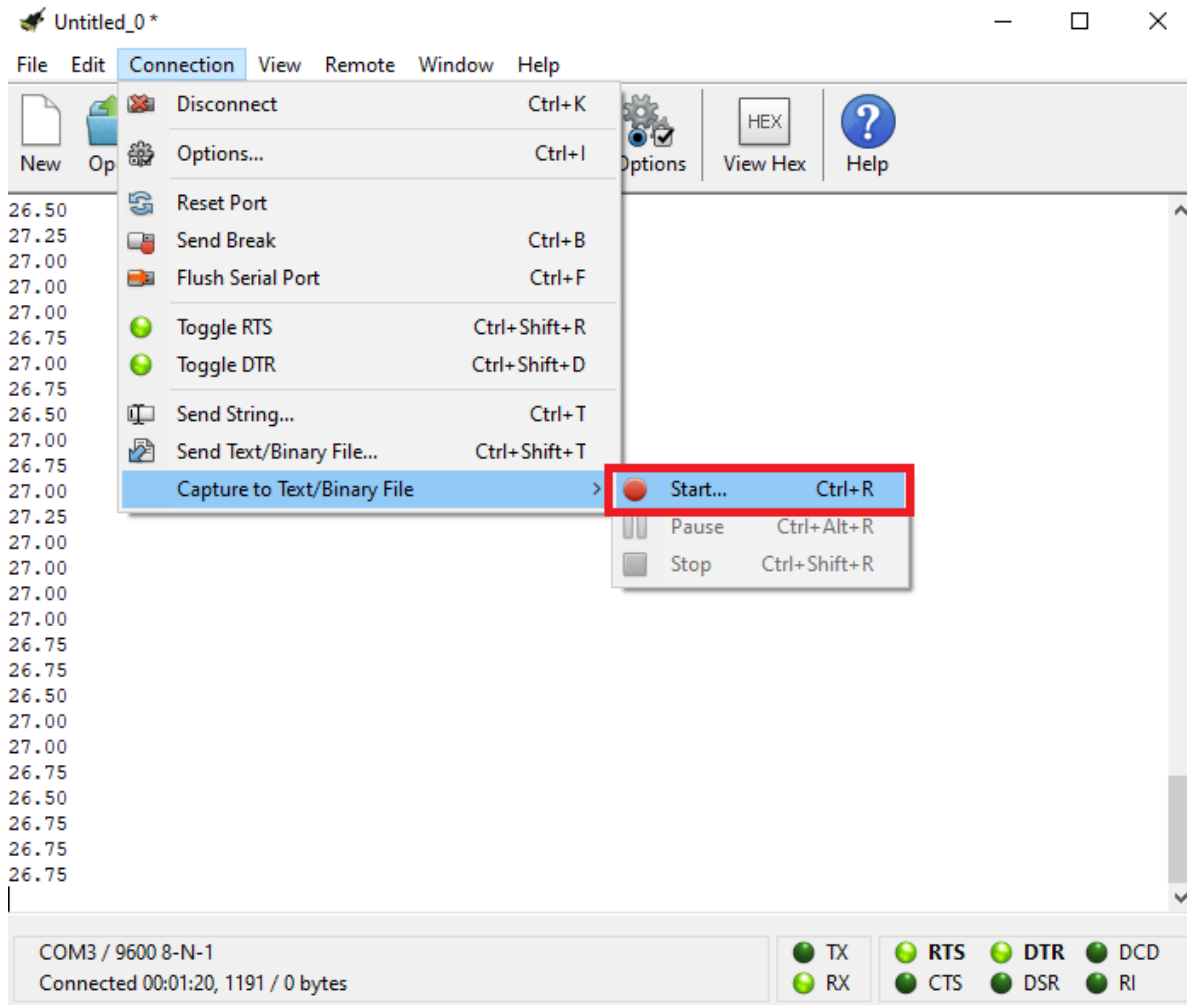
Re-Scan Serial Ports

Cancel    OK

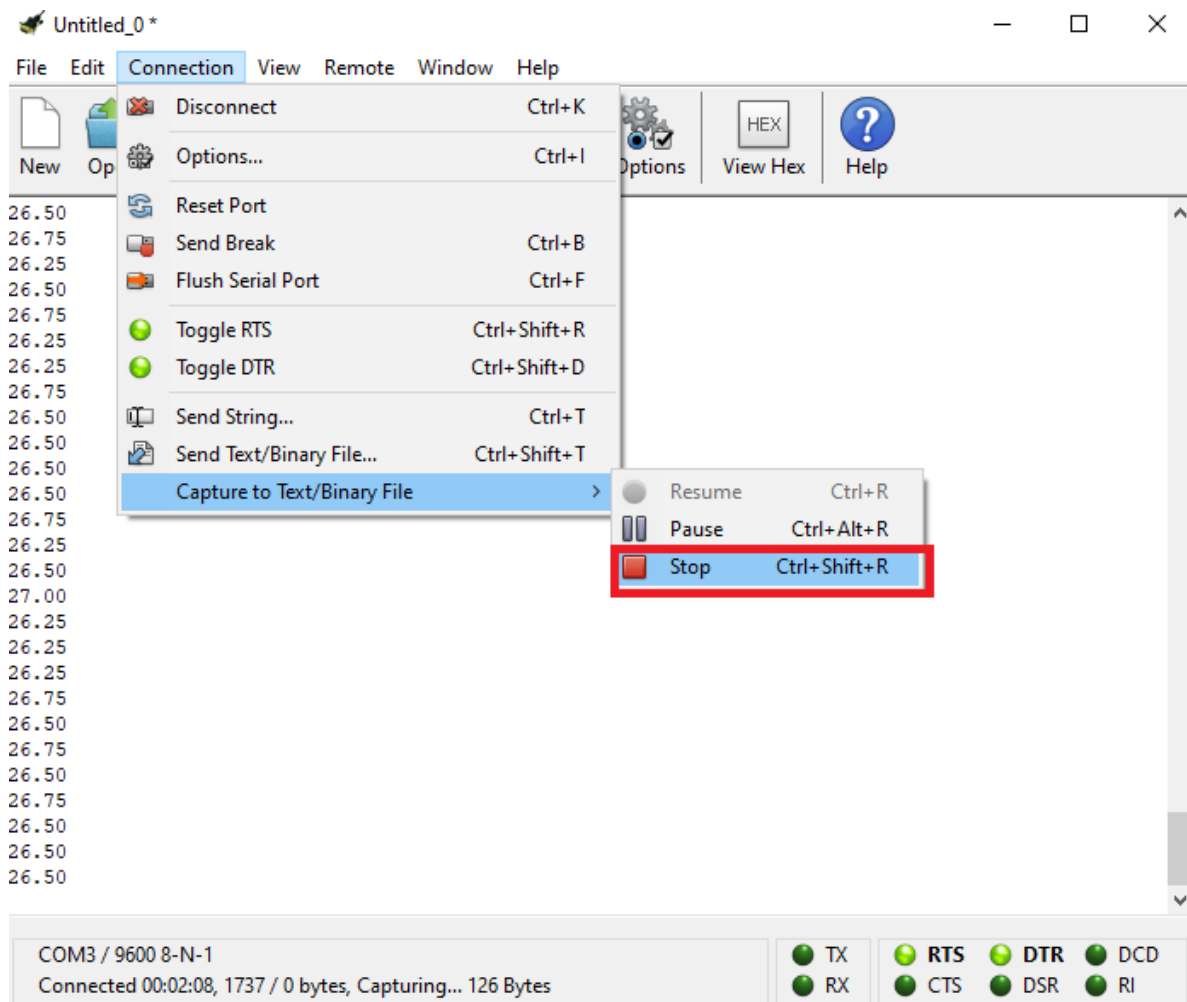
Clic en OK y luego connect



Una vez se dé por finalizada la toma de datos, clic en disconnect luego dar clic en connection, capture to text/Binary file, start.



Seleccionar la ruta que desee para guardar el documento  
Dar clic en connection, capture to text/Binary file, stop



Buscar el documento, aparece un block de notas con los datos

