

Diseño y construcción de un tubo de choque para generar pirolisis ultrarrápida de  
biocombustibles

John Mauricio Herrera Chaparro y Sebastián Barajas León

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

PhD. en ingeniería química, ingeniero mecánico

Codirector

Fabio Andrés Ortiz Ochoa

Ingeniero mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

2023

### **Agradecimientos**

A Dios por brindarnos la vida, la salud y la sabiduría para enfrentar y culminar este gran reto académico en nuestras carreras profesionales y personales.

A las familias Herrera Chaparro y Barajas León por su apoyo incondicional durante todo este proceso, por acompañarnos y aconsejarnos en cada momento difícil de esta etapa.

A Yesid Javier Rueda Ordoñez por ser nuestro director, orientarnos y corregirnos en el transcurso de este proyecto.

A Fabio Andrés Ortiz Ochoa por ser nuestro codirector, animándonos, y guiándonos durante todo el proceso de ejecución para este proyecto.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarnos el espacio y disposición de sus instalaciones y elementos para poder desarrollar de manera segura y cómoda este proyecto.

A los conserjes y funcionarios de la Escuela de Ingeniería Mecánica por tener una gran actitud de servicio en cada momento que fue necesaria su ayuda.

## Contenido

Introducción .....	9
1. Objetivos .....	12
1.1. Objetivo General .....	12
1.2. Objetivos específicos .....	12
2. Marco teórico .....	13
2.1. Tubo de choque .....	13
2.2. Tubo de choque para estudios cinéticos .....	13
2.3. Pirolisis .....	14
2.4. Pirolisis ultrarrápida .....	14
2.5. Biocombustibles .....	15
2.6. Combustión .....	15
3. Metodología .....	16
3.1. Condiciones y cálculos preliminares .....	16
3.2. Diseño experimental del equipo .....	18
3.3. Diseño del dispositivo final .....	20
3.4. Consolidado de materiales .....	26
3.5. Análisis térmico .....	29
4. Análisis de resultados .....	36
5. Conclusiones .....	41
Referencias bibliográficas .....	43
Apéndices .....	45

**Lista de tablas**

Tabla 1. Propiedades del algodón.....	16
Tabla 2. Tipos de membrana.....	25
Tabla 3. Consolidado de materiales.....	27
Tabla 4. Composición gas natural .....	30
Tabla 5. Presupuesto.....	39

**Lista de figuras**

Figura1. Tubo de choque.....13

Figura 2. Proceso de pirolisis.....14

Figura 3. Triangulo de la combustión.....15

Figura 4. Generador de energía.....20

Figura 5. Quemador gases de salida.....23

Figura 6. Válvulas en serie.....23

Figura 7. Ensamble generador chispa.....26

Figura 8. Grafica generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert.....32

**Lista de apéndices**

Apéndice A. Planos tubo de choque.....	45
Apéndice B. Manual técnico.....	52
Apéndice C. Modelo matemático.....	58
Apéndice D. Guía de laboratorio .....	66

## Resumen

**Título:** Diseño y construcción de un tubo de choque para generar pirolisis ultrarrápida de biocombustibles.

**Autores:** John Mauricio Herrera Chaparro y Sebastián Barajas León.

**Palabras clave:** Pirolisis, Ultrarrápida, Biocombustibles.

**Descripción:** En el presente proyecto se expone el diseño y la construcción de un tubo de choque especialmente diseñado para llevar a cabo experimentos de pirolisis ultrarrápida con enfoques pedagógicos para el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica en la Universidad Industrial de Santander. Este documento expone las consideraciones tomadas para el desarrollo de un primer prototipo el cual se hizo mediante unos cálculos preliminares que se basaron en datos encontrados en la web. Muestra a detalle especificaciones y accesorios instalados en el tubo de choque junto como las condiciones realizadas para alcanzar el equipo final, contiguo con esto se presenta un modelo matemático que sirve para exponer y validar todos los procesos termodinámicos que ocurren en la operación del tubo de choque. También, registra los resultados obtenidos con sus respectivas conclusiones, con los que se pudo comprobar el real funcionamiento del equipo y obtener conclusiones favorables que indican la realización de un buen trabajo que sirve como contribución al desarrollo de las actividades misionales de la universidad aportando conocimiento a sus estudiantes.

### **Abstract**

**Title:** Design and construction of a shock tube to generate ultra-fast pyrolysis of biofuels.

**Authors:** John Mauricio Herrera Chaparro and Sebastián Barajas León.

**Keywords:** Pyrolysis, Ultrafast, Biofuels.

**Description:** This project presents the design and construction of a shock tube specially designed to carry out ultrafast pyrolysis experiments with pedagogical approaches for the combustion laboratory of the school of mechanical engineering at the Industrial University of Santander. This document exposes the considerations taken for the development of a first prototype which was made through preliminary calculations that were based on data found on the web. It shows in detail specifications and accessories installed in the shock tube along with the conditions carried out to reach the final equipment. Next to this, a mathematical model is presented that serves to expose and validate all the thermodynamic processes that occur in the operation of the shock tube. . Also, it records the results obtained with their respective conclusions, with which it was possible to verify the real functioning of the team and obtain favorable conclusions that indicate the completion of good work that serves as a contribution to the development of the missionary activities of the university by providing knowledge to their students.

## Introducción

En las últimas décadas los seres humanos se han preocupado por encontrar diversas maneras de obtener combustibles y productos de bajo impacto ecológico, tal que puedan sustituir aquellos productos sintéticos derivados de métodos tradicionales poco amigables con el medio ambiente; buscando así una solución para producción de productos limpios. La conversión de biomasa en combustibles deseables y productos químicos valiosos podría ofrecer una solución atractiva al creciente problema energético del mundo.

El diseño de un tubo de choque para pirolisis ultrarrápida genera un impacto positivo en la ingeniería mecánica, ya que permite cambiar el estigma que se tiene de la única aplicación en ingeniería automotriz, lo cual es una visión incompleta de las aptitudes que presenta la ingeniería mecánica. Gracias a este diseño, se conoce uno de los diversos estudios en los cuales se puede profundizar, como lo es la energía renovable, ofreciendo un campo amplio de aplicación en el cual están incluidos principios de ingeniería, conocimientos físicos, químicos, matemáticos e incluso económicos.

Por otra parte, se tiene un impacto ambiental favorable, ya que la pirolisis ultrarrápida de biocombustibles ofrece una alternativa de obtención apropiada de los recursos disponibles en el medio ambiente. A diferencia de otros métodos, la pirolisis es amigable con el ecosistema, ya que se puede obtener de manera limpia y sin afectar el entorno. Además, esta técnica es una alternativa indicada para generar conciencia en la sociedad, con el fin de cuidar el medio ambiente y hacer uso correcto de sus recursos. Otro punto importante de la pirolisis ultrarrápida es que, esta se genera a partir de una fuente natural, lo cual genera niveles muy bajos de contaminación.

Finalmente, para el análisis de viabilidad se encuentra que, debido a la alta producción y mal manejo de estos desechos orgánicos en la región, se tienen variedad y alta cantidad de materia para el uso, el estudio y desarrollo de este proyecto.

Además, se encuentra que esta técnica es pionera en la región, lo cual genera gran atractivo y respaldo para su ejecución, brindando así una solución para la problemática que se evidencia en la ciudad referente al mal manejo de los desechos orgánicos.

A continuación, se presentan varios enfoques del uso de estos equipos en los diferentes entornos educativos.

A nivel internacional, en la Universidad de Kansas, Estados Unidos, se desarrolló el proyecto *“Fast pyrolysis of cellulose in a single pulse shock tube”* que tuvo como objetivo principal implementar la técnica del tubo de choque para estudiar la descomposición térmica de la celulosa en un gas argón inerte en condiciones de alta temperatura, alta velocidad de calentamiento y tiempos de reacción cortos. (Öztürk & Merkiln, 1993).

En el entorno nacional, la Universidad de los Andes desarrolló el proyecto *“Diseño y construcción de un tubo de choque”* para el cual su objetivo principal fue diseñar y construir un tubo de choque de manera que se pudiera explorar el uso de la técnica de tubo de choque para generar ondas de choque de aire que emitieran las características temporales y espaciales de una onda expansiva de campo libre y de esta manera poder probar interacciones con mecanismos de disipación de la energía ofrecida por la onda de choque.

A nivel local, en la Universidad Industrial de Santander llevo a cabo el proyecto *“Diseño de un reactor tipo auger para la producción de combustible mediante pirolisis de llantas usadas”* donde su objetivo general fue diseñar un reactor a escala semiindustrial tipo auger para el

proceso de producción de combustible mediante pirolisis de caucho de llanta y como resultados se obtuvo que la pirolisis de llantas requiere grandes cantidades de energía para alcanzar la temperatura optima del proceso; según los resultados de diseño se obtuvo que para una alimentación de 13 kg/h las condiciones de operación adecuadas deben ser una temperatura de 580°, una presión de 1 bar y un tiempo de residencia de 0,69 minutos.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Desarrollar un tubo de choque para pirólisis ultrarrápida de biocombustibles en el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Desarrollar un tubo de choque para la conversión de biomasa en combustible líquido y gaseoso a través de pirólisis ultrarrápida, definir parámetros (dimensiones físicas, material del tubo, conexiones para líneas de suministro y extracción, presiones, temperaturas y densidades máximas y mínimas de operación).
- Modelar los principios de termodinámica y transferencia de calor bases que describen el sistema, mediante EES, y validar el modelo mediante la toma y comparación de datos en el laboratorio (punto de operación del sistema, capacidades máximas y mínimas).
- Crear un manual para instruir al personal acerca de las funciones, puesta a punto y capacidades del tubo de choque, a su vez crear un manual guía de laboratorio para el estudio de la pirólisis y/o combustión.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Tubo de choque

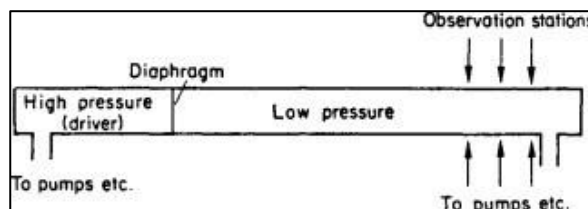
Un tubo de choque en su forma más simple es un tubo largo con extremos cerrados separados en dos secciones, a saber, la sección del controlador y la sección impulsada, generalmente por un diafragma. (Wang, 2019).

### 2.2. Tubo de choque para estudios cinéticos

Los tubos de choque son particularmente útiles en el trabajo en fase gaseosa, ya que se pueden producir altas temperaturas en un tiempo relativamente corto (del orden de unas pocas colisiones moleculares) y se pueden estudiar los cambios químicos posteriores. Un tubo de choque adecuado para estudios cinéticos consiste en un tubo de metal de unas 6 pulgadas de diámetro y 20 pies de largo. Este se divide en una sección de alta presión, que contiene el gas impulsor, y una sección de baja presión que contiene el gas o los gases que van a reaccionar. Los dos están separados por un delgado diafragma de lámina metálica o celofán. Cuando este último es reventado por una aguja convenientemente controlada, la expansión del gas a alta presión produce una onda de choque que atraviesa los gases a baja presión. Estos se comprimen adiabáticamente y se transportan hasta el extremo más alejado de la sección de baja presión donde se pueden seguir los cambios posteriores (estaciones de observación). (ScienceDirect, 1996).

**Figura 1**

*Tubo de choque*



Nota: Adaptado de <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/shock-tubes>

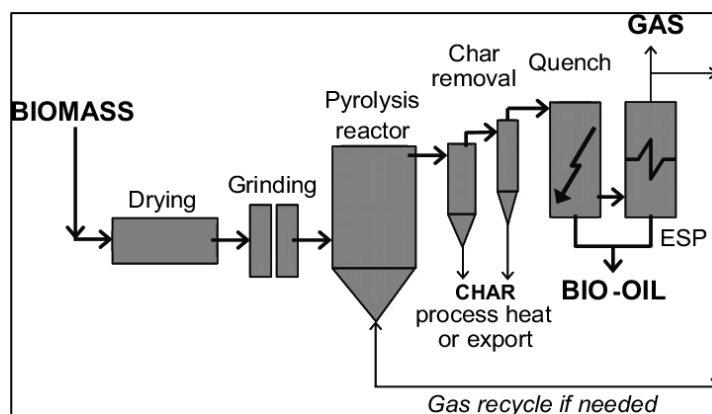
### 2.3. Pirolisis

La pirólisis es un proceso mediante el cual un sólido (o un líquido) se degrada térmicamente en moléculas volátiles más pequeñas, sin interactuar con el oxígeno ni con ningún otro oxidante. (ScienceDirect, 2008).

Es importante entender que la pirólisis no es un cambio de fase; es un proceso químico. Más correctamente, es un proceso de degradación térmica, ya que ocurre bajo calor y degrada moléculas más grandes en otras más pequeñas. La pirólisis está influenciada por muchas variables, incluido el tipo de sustrato, la presencia de oxígeno u otros productos químicos, la tasa de aumento de la temperatura y las temperaturas alcanzadas. (ScienceDirect, 2008).

**Figura 2**

*Proceso de pirolisis*



Nota: Adaptado de <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/shock-tubes>

### 2.4. Pirolisis ultrarrápida

La pirólisis ultrarrápida se caracteriza por una velocidad de calentamiento rápida, un tiempo de residencia corto ( $< 2$  s) y una temperatura moderada (500–1000 °C). Este proceso proporciona un alto rendimiento de bioaceite (75 %) a partir de biomasa con gases no condensables (13 %) y biocarbón (12 %). El color del producto líquido varía de negro a marrón rojizo oscuro o verde, ya que depende del material de alimentación y del método de pirólisis. (ScienceDirect,

2021).

## 2.5. Biocombustibles

El biocombustible se define como “combustible líquido, sólido o gaseoso producido por la conversión de biomasa como el bioetanol de caña de azúcar o maíz, carbón vegetal o astillas de madera, y biogás de la descomposición anaeróbica de desechos”. (OCDE, 2002).

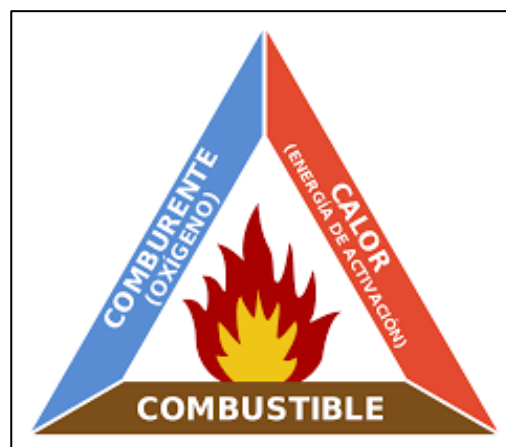
## 2.6. Combustión

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el combustible, que puede ser un sólido (Carbón, Madera, etc.), un líquido (Gasóleo, Fuel-Oíl, etc.) o un gas (Natural, Propano, etc.) y el comburente, Oxígeno. (García, 2001).

La combustión se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable. (García, 2001).

### Figura 3

*Triangulo de la combustión*



Nota: Adaptado de (García, 2001) pág. 3

### 3. Metodología

En este capítulo se abordan las etapas y cálculos para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos, teniendo en cuenta los conceptos anteriormente mencionados y consideraciones tomadas que se irán explicando en el transcurso del capítulo.

#### 3.1. Condiciones y cálculos preliminares

En esta sección se describen el tipo y cantidad de biomasa usados en el proyecto, así como los primeros cálculos realizados para el diseño de un prototipo funcional.

##### 3.1.1. Cantidad y tipo de biomasa

Para la elección de la biomasa se tuvo en cuenta que esta fuese un material que estuviese compuesto principalmente por celulosa, ya que esta es un compuesto orgánico del cual mediante técnicas de degradación como la pirolisis se pueden derivar biocombustibles. El material que cumple con este requerimiento es el algodón el cual está compuesto entre un 88% y un 96% de celulosa. (Geissman, 1973). Teniendo en cuenta esta composición de ahora en adelante se tomará la palabra celulosa como referencia cuando se haga mención de la muestra de algodón.

**Tabla 1**

*Propiedades del algodón.*

BIOMASA	FORMULA QUÍMICA	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	MASA MOLAR (g/mol)
Algodón	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	80	162,14

Nota: Adaptada del libro Termodinámica Yunus A. Cengel 7 ed.

Durante este trabajo se optó por trabajar con una cantidad de 20 mg, cantidad suficiente para estudiar el principio de pirolisis a escala de laboratorio.

### 3.1.2. Cálculos preliminares

Una vez establecida la cantidad de celulosa y sus propiedades, usando la ecuación (1) se calculó el volumen mínimo para contener la celulosa dentro del tubo de choque. La disposición de ubicación para la celulosa se explicará más adelante.

$$Volumen = \frac{masa}{densidad} \quad (1)$$

Durante la revisión bibliográfica se tomó el siguiente dato, “Se encontró que la energía de activación para la descomposición de la celulosa era de 130.5 KJ/mol”. (Öztürk & Merklin, 1993, p.1).

Conocido este valor con la ecuación (2) se calculó la cantidad energía necesaria para degradar la muestra de celulosa usada en este proyecto.

$$Q = \dot{Q} * n \quad (2)$$

**Q:** Energía de activación para degradar la muestra

**$\dot{Q}$ :** Energia de activación

**n:** Moles de celulosa

Conocida la cantidad de energía necesaria para degradar la muestra de celulosa se hizo un estudio para tener una aproximación de cuanto gas natural se requiere para garantizar la energía requerida. Para esta aproximación se tomó en cuenta el poder calorífico superior del metano, ya que es el gas que se encuentra en mayor proporción en el gas natural. Encontrando que “PCS CH<sub>4</sub> = 55530 kJ/Kg” (Cengel, 2012, p.949). Con el cual se calculó la cantidad de gas natural necesaria, a su vez con esta masa de gas y su densidad se obtuvo el volumen necesario para contener esta cantidad de gas,

## APÉNDICE C.

Luego de haber conocido el volumen, se optó por trabajar con una geometría cilíndrica de diámetro 1. ½ in, pudiendo así calcular la altura de esa geometría. Para hacer la analogía de que dicha geometría será la sección de alta presión en el tubo choque.

### **3.2. Diseño experimental del equipo**

Mediante la revisión bibliográfica y comparación con los cálculos preliminares se determinaron los parámetros del tubo de choque para la fabricación del primer prototipo, estos parámetros fueron, diámetro, longitud de secciones, tuberías de suministro, extracción y presiones de trabajo.

#### **3.2.1. Prototipo de PVC**

La primera etapa consistió en un proceso de prototipado para tener valores guías y posteriormente definir las consideraciones y requerimientos de diseño. Partiendo de un prototipo elaborado en el laboratorio con materiales de PVC, se obtuvieron las siguientes consideraciones de diseño.

##### **3.2.1.1. Características del prototipo**

- En los cálculos preliminares se obtuvo un valor de volumen, el cual solamente es suficiente para contener el combustible, sin embargo, para que se lleve a cabo un proceso de combustión es necesario suministrar una masa de aire y una energía de activación. Por lo tanto, a este volumen se le debe sumar el volumen aire necesario para completar la combustión.
- Para contener la mezcla de gases para combustión se requiere una longitud

de [0,001 m], siendo estas dimensiones demasiado pequeñas, para la adaptación de los sistemas de inyección y medición. En el prototipo, se consideraron una longitud de 20 cm para la sección de alta presión y 50 cm para la sección de baja presión, esta última tiene una longitud mayor con el fin de que el volumen de la sección de alta presión se pueda expandir libremente y genere la onda de choque.

- La ubicación de la muestra de celulosa es al interior de la sección de baja presión, el volumen que se tiene esta sección es suficiente para contener la muestra de celulosa; se planteó que la disposición de la muestra fuese en el centro de esta sección y concéntrica con el perfil cilíndrico.
- Como elemento de separación entre las secciones de alta y baja presión se planteó utilizar una membrana de aluminio que mantuviese la mezcla de aire combustible aislada de la sección donde se encuentra la muestra de celulosa.
- El suministro de gas en el laboratorio tiene una presión máxima de 3 psi por ello se trabajó con un rango de presiones entre [2 psi -3psi].
- Para poder inyectar aire a la mezcla se utilizó una válvula de aire de automóvil adaptada a la periferia del tubo en la sección de alta presión, mediante el uso de una bomba de bicicleta se administraba el flujo de aire.
- Como generador de energía de activación se utilizó una fuente de alto voltaje conectada mediante tornillos roscados al tubo en la sección de alta presión.

**Figura 4**

*Generador de energía*



Nota: El destello azul que se evidencia es la chispa con la cual se hace ignición.  
Autoría propia

- Como elemento de medición se usó un manómetro ubicado en la sección de alta presión, para el control del flujo de gas se adaptó una válvula de globo a la tapa de la sección de alta presión.

Una vez construido el prototipo este se puso en operación y se realizaron pruebas de funcionalidad, las cuales mostraron que el gas suministrado fue suficiente para degradar en su totalidad la muestra de celulosa. Dando esto viabilidad para la construcción del dispositivo final.

### **3.3. Diseño del dispositivo final**

En esta sección se presentan las consideraciones y características para el diseño final del tubo de choque, teniendo como punto de partida los datos experimentales del prototipo.

#### **3.3.1. Consideraciones**

- Para el dimensionamiento final de las secciones de alta y baja presión se tuvieron

en cuenta los cálculos preliminares, donde el factor de diseño que influyó fue garantizar una total conexión de todos los accesorios necesarios para la operación del tubo choque y que a su vez la manufactura de este fuera factible.

- Durante los cálculos preliminares se evidenció que el volumen para contener la mezcla de gas natural y aire estaba dado a una escala pequeña, con la que se obtenía una geometría cilíndrica de longitud pequeña; por tanto, el dimensionamiento final de la sección de alta presión se hizo cuidando que el volumen aumentara hasta obtener una geometría a la cual fuera viable la instalación de los accesorios tales como, válvula de suministro de aire, válvula de suministro de gas, manómetro y conexiones eléctricas para aplicar la energía de activación. Las dimensiones finales de la sección de alta presión, así como la disposición de los accesorios se muestran en el APÉNDICE A.

- Posteriormente, en el dimensionamiento de la sección de baja presión se debió garantizar que esta cumpliera con el volumen necesario para contener de manera segura los gases producto de la combustión.

Para tal fin se tomó en cuenta que los gases contenidos en la sección de alta presión se van a expandir hasta 3 veces su volumen inicial. Por lo cual el volumen para la sección de baja presión se estableció como 3 veces el volumen de la sección de alta presión, APÉNDICE C.

- Con el fin de tener un mayor factor de seguridad se decidió fabricar el tubo de choque en acero al carbono SCH 40, ya que su resistencia es mayor que la del PVC, lo que nos garantiza tener mayor seguridad en las prácticas de laboratorio.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas y en base del prototipo se construye un modelo 3D ver APÉNDICE A, en el software de modelado CAD SolidWorks, a continuación, se describen todos accesorios utilizados.

### 3.3.2. Líneas de suministro y extracción

Para tener un control de los gases que ingresan al tubo de choque en la sección de alta presión, se utilizó una válvula de globo de  $\frac{1}{4}$  in de acero al carbono, la cual se instaló roscada directamente en el tapón de esta sección y en el extremo libre de la válvula se conectó la línea de suministro dispuesta en el laboratorio. Por otro lado, en la sección de baja presión se conectaron dos válvulas de las mismas características, de las cuales una se utilizó para el ingreso del argón y la otra para la extracción de los gases. Dichas válvulas se conectaron al tubo mediante unos bujes roscados y soldados en su periferia.

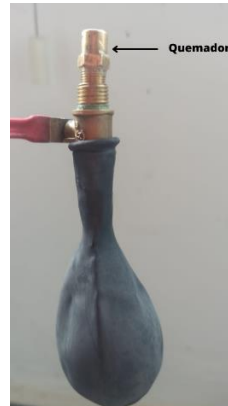
Para poder suministrar el aire necesario para la mezcla en la sección de alta presión, se empleó el uso de una válvula de aire de carro acoplada a esta sección, para hacer este acople fue necesario realizar una perforación con una broca de  $\frac{1}{2}$  in en la sección de alta presión. APÉNDICE A.

El manejo que se planteó para los gases producto del proceso de pirolisis se basa, en un sistema compuesto por dos válvulas de globo en serie, la primera de estas conectada directamente en la sección de baja presión y funciona como válvula de paso que contiene los gases para que no se escapen al aire libre. La segunda de estas válvulas se acopla directamente a la primera válvula, la cual es desmontable y en su otro lado tiene conectado un globo, su función es poderse desmontar y conectar en ella un quemador en su extremo que queda libre, y regular

la salida de los gases contenidos en el globo hacia el quemador. Figura 5.

**Figura 5.**

*Quemador gases de salida*



Nota: Autoría propia. Adaptación de quemador a válvula

**Figura 6**

*Válvulas en serie*



Nota: Autoría propia.

### **3.3.3. Elemento de unión**

Como elemento de unión entre las dos secciones se decidió hacer uso de una brida lisa soldada a cada sección, esto con el fin de garantizar una unión total

y resistente para las presiones producidas por la combustión, ya que si se utiliza una brida roscada a través de ella se pueden presentar fugas y toda la carga estaría soportada por los hilos de las roscas.

Para garantizar un sellado completo y hermético se empleó un empaque de caucho plano diseñado acorde a las dimensiones de diámetros interno y externo de la brida, APÉNDICE A.

#### **3.3.4. Membrana**

Como elemento de separación entre las secciones de alta y baja presión se planteó utilizar una membrana que mantuviese la mezcla de aire y combustible aislada de la sección donde se encuentra la muestra de celulosa, pero que a su vez al producirse la combustión no ofrezca resistencia a la propagación de la onda de choque y esta se pueda dirigir hacia la sección de baja presión sin perder tanta energía al momento de romper la membrana. Es por ello que se plantearon tres tipos de membrana cada uno compuesto de diferentes materiales que ofrecen una mayor o menor resistencia según sea el caso.

La tabla 2 muestra los diferentes tipos de membrana que se plantearon, así como el valor de presión máximo que resiste.

**Tabla 2***Tipos de membrana.*

Tipo de membrana	Presión máxima (Psi)
Papel	5
Aluminio	8
Acetato	40

Nota: Autoría propia. La table muestra los valores de presión máxima que resiste una capa de cada material.

Luego de revisar estos valores de presión y realizar pruebas en el laboratorio se decide tomar como material principal para la membrana el Aluminio ya que, si bien presenta menor resistencia a la presión, este material se fractura de manera más rápida y homogénea contribuyendo de esta manera a la propagación de la onda de choque sin que se generen demasiadas perdidas.

### 3.3.5. Elementos de medición

Como elementos de medición se emplearon dos manómetros analógicos secos roscados al tubo de choque mediante los bujes previamente soldados al tubo, APÉNDICE A.

### 3.3.6. Chispa

Para poder completar los tres componentes del triángulo de combustión, se usó como energía de activación una fuente de alto voltaje con 150000 V, la cual se conectó a unos tornillos golosos dispuestos en la periferia de la sección de alta presión a 90 °, utilizando tornillos de Nylon para aislar el flujo de corriente eléctrica con el resto del tubo. Concéntricos con estos se roscaron los tornillos golosos que permiten la generación de la chispa, APÉNDICE A.

**Figura 7***Ensamble generador chispa*

Nota: Autoría propia. Ensamblaje de tornillos de nylon y golosos

### 3.3.7. Tapones

Finalmente, para sellar los extremos de cada sección se usaron tapones roscados de acero galvanizado; esto con la finalidad de poder realizar inspecciones al interior del tubo y acceder a tomar muestras de partículas después de los procesos de combustión y pirolisis; además en el tapón dispuesto en la sección de baja presión, se soldó un acero redondo de  $\frac{1}{4}$  in para poder ubicar y sostener la muestra de celulosa al interior de la sesión de baja presión. Por otro lado, el tapón de la sección de alta presión se perforo y roscó en su centro para realizar en este una conexión de una válvula de globo para suministrar el flujo de gas natural. Ver APÉNDICE A.



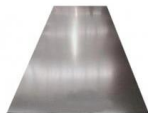



### 3.4. Consolidado de materiales











Una vez finalizado el diseño se requirió seleccionar los materiales que más se adecuan al presupuesto y requerimiento dado, la elección de estos materiales puede afectar los diferentes aspectos del producto como la funcionalidad, seguridad, funcionalidad, aspecto y costos.

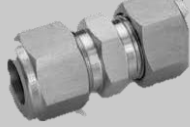




En la tabla 3 se consolidó todos los materiales necesarios para la construcción del tubo de choque. Los elementos consumibles como teflón y membranas de aluminio no se tuvieron en cuenta debido a que estos es necesarios reemplazarlo cada que se hace una prueba.

**Tabla 3.**

*Consolidado de materiales*

Descripción	Material	Representación	Cant
Sección de alta presión	Tubo redondo 1.1/2" Acero al carbón SCH 40		1
Sección de baja presión	Tubo redondo 1.1/2" Acero al carbón SCH 41		1
Bridas	Lamina HOT ROLLED Calibre 1/4"		2
Bujes	Acero redondo 3/4"		6
Tapones	Acero galvanizado		2
Tornillo	Tornillo hexagonal grado 2 5/16"-18hilos/pul		4
Tuerca	Tuerca hexagonal grado 2 5/16"-18hilos/pul		4
Manómetro			2

	Acero, caratula en policarbonato, conexión en bronce NPT		
Válvula gas	Acero al carbón 1/4" roscada		4
Válvula aire	Bronce encauchetado		1
Empaque	Caucho		1
Unión macho/macho	Bronce rosca NPT		3
Unión macho/hembra	Bronce rosca NPT		1
Espigo	Bronce rosca NPT		1
Manguera	Polímero termoplástico PVC (5m)		1
T especial	Acero inoxidable		1
Terminales	Acero inoxidable		4
Unión especial	Acero inoxidable		1

			
Tubin	Acero inoxidable (2m)		1
Manguera especial	Caucho sintético (3m)		1
Flujómetro	Bronce		1
Fuente alto voltaje	Electrónica		2

Nota: Autoría propia, materiales empleados en este proyecto

### 3.5. Análisis térmico

En esta sección se exponen los cálculos termodinámicos que rigen el funcionamiento de este proyecto y con los cuales se valida el proceso. Como primer análisis se estudia la mezcla de gases que componen al gas natural, para esta mezcla se calculó la cantidad de moles usando la ecuación (3) (Van der Waals). Una vez conocida la cantidad de moles suministrados se hizo un análisis de combustión para conocer los productos que se obtienen, luego con este análisis hecho se calculó la temperatura de llama adiabática con el fin de conocer el valor de temperatura máximo alcanzado en la sección de alta presión y con ella poder saber el valor

de presión máximo al cual llega la sección esta sección. Finalmente, se calculó la energía generada por la mezcla de combustible y se verifico que esta fuese suficiente para degradar la muestra de celulosa.

### 3.5.1. Composición del gas natural

Para la composición del gas natural se tuvo en cuenta la composición de este dado por la empresa Vanti, ya que esta suministra el gas al laboratorio. En la tabla 3 se muestra el porcentaje de cada gas presente en el gas natural.

**Tabla 4**

*Composición gas natural*

Gas	Formula	Porcentaje
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
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	3,18
1-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,22
N-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,23
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,9

Nota: Adaptada de <https://www.grupovanti.com/>

Durante los cálculos de este proyecto se trabajó únicamente con gas metano, etano, propano y dióxido de carbono los cuales constituyen en un 98.57% del gas natural.

### 3.5.2. Análisis del combustible

El combustible inyectado a la sección de alta presión se analizó como una mezcla de gases reales conformada por metano, etano, propano y dióxido de

carbono mezclados en las proporciones mostradas.

Para dicha mezcla haciendo uso de la ecuación (3) se calculó el número de moles contenidos en el volumen establecido para la sección de alta presión,

APÉNDICE C.

$$P_m V_m = Z_m n_m R_u T_m \quad (3)$$

Donde:

$P_m$ : Presión del combustible en la sección de alta presión antes de ser mezclado con el aire.

$V_m$ : Volumen que ocupa el combustible, el cual es el volumen total de la sección de alta presión.

$Z_m$ : Factor de compresibilidad de la mezcla.

$n_m$ : Número de moles del combustible.

$R_u$ : Constante universal de los gases.

$T_m$ : Temperatura del combustible a la entrada de la sección de alta presión.

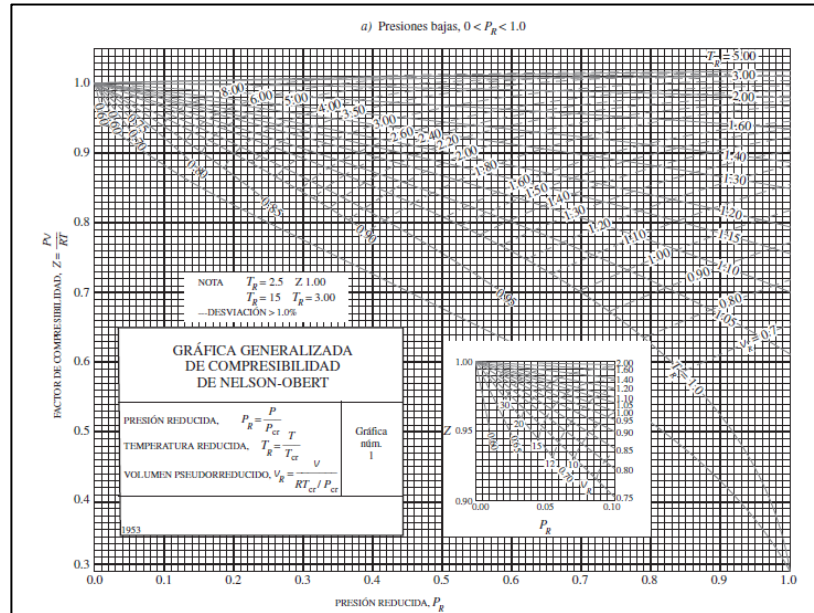
Se tiene que:

$$Z_m = \sum_{i=1}^k y_i Z_i \quad (4)$$

Para realizar este cálculo es necesario conocer la fracción molar de cada componente a partir de la ecuación (5), calcular la temperatura reducida y presión reducida de cada componente del gas natural y con estos valores a través de la Figura 8, obtener el valor  $Z_i$  para cada componente del gas, APÉNDICE C.

**Figura 8**

*Grafica generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert*



Nota: Tomado del libro Termodinámica Yunus A. Cengel 7 ed

Luego de calcular el número de moles totales de combustible, usando la ecuación (5) se calculó el número de moles de cada componente.

$$Y_i = \frac{n_i}{n_m} = \frac{V_i}{V_m} \quad (5)$$

Donde:

$n_i$ : Numero de moles de cada componente del gas

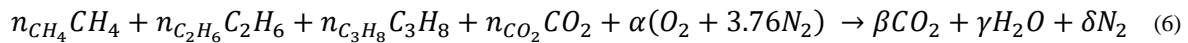
$n_m$ : Numero de moles del gas natural

$V_i$ : Volumen parcial de cada componente del gas

$V_m$ : Volumen de mezcla de gas natural

### 3.5.3. Análisis estequiométrico de combustión

Luego de conocer la cantidad de moles de cada componente, usando la ecuación (6) se realizó un análisis de combustión donde a partir del balance estequiométrico con 100% de aire se conocieron el número de moles de los productos obtenido en la combustión, APÉNDICE C.



Balanceando la ecuación se obtienen los coeficientes que acompañan a los productos y aire.

$$\alpha = 0,03051 [mol]$$

$$\beta = 0,01626 [mol]$$

$$\gamma = 0,02941 [mol]$$

$$\delta = 0,115 [mol]$$

### 3.5.4. Temperatura llama adiabática

Para el cálculo de temperatura de llama adiabática se planteó un balance de energía para un sistema cerrado en la sección de alta presión, en cual no se hubo suministro de calor hacia el interior como tampoco perdidas de calor hacia los alrededores, debido a que este proceso de combustión ocurre en tiempos extremadamente cortos; a su vez no hay ninguna interacción de trabajo tanto de entrada como salida. Por lo que se es válido afirmar que la temperatura máxima alcanzada en el proceso de combustión será la temperatura de llama adiabática, la cual se obtiene de la ecuación (7), igualando las entalpias de reactivos con entalpias de productos.

$$Q_{ent} + W_{ent} + \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r = Q_{sal} + W_{sal} + \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p \quad (7)$$

Donde:

$$Q_{ent} = W_{ent} = Q_{sal} = W_{sal} = 0$$

De la ecuación (7) se obtuvo una entalpia para los productos igual a 85400 [kJ/kmol].

Luego de conocer esta entalpia de productos, se calculó para cada gas el valor de temperatura correspondiente a dicha entalpia. Valores con los que se pudo establecer un sistema de ecuaciones para realizar un proceso iterativo y conocer los valores de entalpia que cumplen la igualación de la ecuación (7), con lo que a su vez se conoció el valor de temperatura de llama adiabática,  $T_{llama\ adiabática} = 2249^\circ K$ , APÉNDICE C.

### 3.5.5. Presión máxima de combustión

Estableciendo la temperatura de llama adiabática como la temperatura máxima alcanzada en la sección de alta presión y considerando la mezcla en su interior como una mezcla de gases ideales se utilizó la ecuación (8), para poder definir el valor de presión máxima alcanzado en la sección de alta presión.

$$PV = NR_U T \quad (8)$$

Donde:

**P**: Presión máxima alcanzada en la sección de alta presión

**V**: Volumen de sección alta presión

$N$ : Numero de moles de mezcla

$R$ : Constante universal de los gases

$T$ : Temperatura de llama adiabática

Obteniendo una presión máxima alcanzada en la cámara de combustión de 935,5 [kPa].

### 3.5.6. Balance de energía cámara de combustión

Luego de conocer la temperatura y presión máximas en la sección de alta presión, se realizó un balance de energía para esta sección considerando que se tiene un flujo estacionario donde no hay interacciones de trabajo y la temperatura de salida de los productos fue igual a la temperatura de llama adiabática, con lo que se obtuvo la ecuación (9)

$$Q_{sal} = \sum N_r (\overline{h}_f^\circ + \overline{h}_{ent} - \overline{h}^\circ)_r - \sum N_p (\overline{h}_f^\circ + \overline{h}_{sal} - \overline{h}^\circ)_p \quad (9)$$

Donde:

$N_r$ : Numero de moles de cada reactivo

$N_p$ : Numero de moles de cada producto

$\overline{h}_f$ : Entalpia de formación de reactivos y productos

$\overline{h}_{ent}$ : Entalpia de reactivos calculada a temperatura de entrada [298°K]

$\overline{h}_{sal}$ : Entalpia de productos calculada a temperatura de salida [2249°K]

$\overline{h}^\circ$ : Entalpia de referencia para reactivos y productos a temperatura [298°K]

De la ecuación (9) se obtuvo que el calor de salida de la sección de alta presión producto del proceso de combustión fue igual a 538,6 [J], APÉNDICE C.

## **4. Análisis de resultados**

Los resultados presentados a continuación están bajo las condiciones y parámetros establecidas en la metodología de trabajo descrita en el capítulo 3. Se elaboró un modelo matemático sencillo del proceso de pirolisis ultrarrápida, con sus ecuaciones pertinentes y condiciones límite y de frontera; el trabajo fue realizado en base al estudio realizado por Zihin Öztürk y Joseph Merklin en la universidad de Kansas. (Öztürk & Merkiln,1993).

### **4.1.Resultados de diseño**

Se verifico que el diseño cumplió con todos los objetivos y requisitos previamente establecidos como funcionalidad, rendimiento, usabilidad y seguridad entre otros. En cuanto a eficiencia de tiempo y costos el diseño sobresale debido a que todos sus materiales y accesorios son muy comerciales como lo es el tubo redondo SCH 40 y conexiones para gas, a su vez la universidad cuenta con una gran lista de proveedores donde se pudo agilizar los tiempos de búsqueda de materiales.

El costo de este diseño final varió notablemente con el costo presupuestado al inicio del proyecto esto se ocurrió debido a la revisión de la literatura donde se encontró que el diámetro factible para un tubo de choque a escala de laboratorio estaba entre 1 in y 2 in por ello se tomó un diámetro de 1. ½ in mas no un diámetro de 3 in como lo presupuestado al inicio. Así mismo para una mejor manejabilidad del equipo se pasó de una longitud de 3 m a 1 m, esto también influyó notablemente en el presupuesto final.

El tiempo de manufactura fue corto cumpliendo con lo estimado, esto se debió al flujo de trabajo que tenía la empresa en ese instante, lo cual contribuyó a un tiempo de entrega corto donde se pudo hacer pruebas para evaluar la funcionalidad. Evaluando la funcionalidad se encontró que era necesario un reproceso porque el generador de chispa no estaba generando el campo necesario para dar ignición al proceso de combustión. Este reproceso fue hecho por parte de la empresa metalmecánica en un tiempo aceptable, luego de probar la nueva mejora el equipo funcionó completamente.

Para su manufactura la empresa solicitó planos de detalle de todos sus componentes, para ello fue necesario crear un modelo 3D en SolidWorks y posteriormente elaborar los planos que fueran completos y comprensibles para llevar a cabo este proceso, APÉNDICE A.

La fase de diseño se culminó teniendo un equipo funcional, estético, seguro y fácil de utilizar. Cabe resaltar que debido a sus medidas este equipo no tiene restricciones de ubicación en el laboratorio.

#### **4.2. Resultados de teóricos / experimentales**

Con el diseño finalizado y parametrizado el modelo teórico se hizo la validación del proceso, para llevar a cabo esto se realizaron pruebas con el equipo final donde se evidenció que el calor generado por la combustión fue suficiente para romper la membrana y degradar completamente la muestra de celulosa en un tiempo alrededor de 1 s; a su vez cuando se extrajeron los gases resultantes se encontró que estos gases no estaban a temperatura ambiente, por lo que se consideró que este aumento de temperatura se origina a causa de que el calor remanente que no se utiliza totalmente en la degradación de la biomasa es mayor al necesario y debido a que es un proceso tan rápido no hay transferencia de calor con las paredes

del tubo y por ello estos gases se obtienen a una temperatura mayor.

Lo anterior se validó con el modelo matemático donde se calculó el calor generado por la combustión, este valor de calor es un valor teórico, haciendo uso de la información mencionada en el libro de termodinámica Cengel 7 edición, donde se expresa:

En otras palabras, el potencial de trabajo de los gases de combustión calientes es aproximadamente 65 por ciento del potencial de trabajo de los reactivos. Parece que cuando el metano se quema, 35 por ciento del potencial de trabajo se pierde, aún antes de empezar a usar la energía térmica. (Cengel, 2012, p.800).

Para el análisis térmico del proyecto se tomó y aplicó esta información por el alto porcentaje de concentración en que se encuentra el metano en el gas natural. Luego de aplicar la eficiencia durante el proceso combustión, se tuvo aún un calor mayor que el requerido para la degradación de la celulosa y teniendo la premisa de que la energía no se crea ni se destruye, se tiene que toda la energía sobrante, en este caso, calor es liberada por los gases calientes producto de la combustión y pirolisis cuando se abre la válvula de extracción.

Teniendo en cuenta que los productos de la pirolisis para una muestra de 20 mg de celulosa son gases como el monóxido de carbono en una proporción de másica de 13.47 mg, el dióxido de carbono con 1.223 mg, metano con 1.192 mg, acetileno con 2.77 mg. (Öztürk & Merkiln,1993).

La caracterización de estos productos no fue realizada debido al alcance de este proyecto, además, es necesario realizar más corridas para almacenar una cantidad considerable de gases productos y poder analizarlos en un cromatógrafo, asimismo con el

transcurso de las pruebas se hizo más notable la presencia de cenizas y aceites en la sección de baja presión del tubo de choque.

Se evidencia y comprueba que el proceso de pirolisis para este proyecto se realiza en su totalidad y se valida con el modelo matemático descrito en el APÉNDICE C.

#### 4.3.Presupuesto

En la tabla 5 se describe el presupuesto necesario para el desarrollo del proyecto. En la sección de equipos y materiales se describe todo el material y dinero gastado para este proyecto, los recursos humanos, licencias, así como otros factores se tuvieron en cuenta mas no fueron financiados.

**Tabla 5.**

Presupuesto final

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER						
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						
Título: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO DE CHOQUE PARA GENERAR PIROLISIS ULTRARRÁPIDA DE BIOCOMBUSTIBLES						
Autores: Sebastián Barajas León, John Mauricio Herrera Chaparro						
RECURSOS HUMANOS						
Ítem	Descripción	Fuente de financiamiento	Unidad	Cant.	Valor unitario	Valor total
1	Asesoría profesional - director del proyecto	UIS	Hora	8	\$ 80.000	\$ 640.000
2	Asesoría profesional - Codirector del proyecto	UIS	Hora	8	\$ 60.000	\$ 480.000
3	Estudiante	Estudiantes	Hora	768	\$ 8.000	\$ 6.144.000
					<b>Subtotal</b>	<b>\$ 7.264.000</b>
RECURSOS Y LICENCIAS						
Ítem	Descripción	Fuente de financiamiento	Unidad	Cant.	Valor unitario	Valor total
4	ESS	Estudiantes	Año	1	\$ 4.770.600	\$ 4.770.600
5	Licencia SolidWorks Student	UIS	Año	1	\$ 397.550	\$ 397.550
6	Licencia Microsoft Office 365	UIS	Mes	12	\$ 25.000	\$ 300.000

7	Recursos Bibliográficos	UIS	N/A	1	\$ 250.000	\$ 250.000
					<b>Subtotal</b>	<b>\$ 5.718.150</b>
<b>EQUIPOS Y MATERIALES</b>						
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fuente de financiamiento</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cant.</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
8	Tubo SCH 40 1.1/4" perforado y roscado	Estudiantes	N/A	1	\$ 140.000	\$ 140.000
9	Bridas	Estudiantes	N/A	2	\$ 30.000	\$ 60.000
10	Tapones	Estudiantes	N/A	2	\$ 7.500	\$ 15.000
11	Empaque	Estudiantes	N/A	1	\$ 6.000	\$ 6.000
12	Válvula gas	Estudiantes	N/A	4	\$ 12.000	\$ 48.000
13	Válvula aire	Estudiantes	N/A	1	\$ 5.000	\$ 5.000
14	Bujes	Estudiantes	N/A	6	\$ 15.000	\$ 90.000
15	Probeta	Estudiantes	N/A	1	\$ 12.000	\$ 12.000
16	Manómetro	Estudiantes	N/A	2	\$ 45.000	\$ 90.000
17	Tornillo	Estudiantes	N/A	4	\$ 400	\$ 1.600
18	Tuerca	Estudiantes	N/A	4	\$ 200	\$ 800
19	Tubo PVC	Estudiantes	N/A	1	\$ 14.500	\$ 14.500
20	Unión PVC	Estudiantes	N/A	1	\$ 32.500	\$ 32.500
21	Tapón roscado PVC	Estudiantes	N/A	2	\$ 5.000	\$ 10.000
22	Fuente alto voltaje	Estudiantes	N/A	2	\$ 75.000	\$ 150.000
23	Tornillo goloso	Estudiantes	N/A	2	\$ 200	\$ 400
24	Tornillo nylon	Estudiantes	N/A	2	\$ 10.000	\$ 20.000
25	Unión lisa/roscada	Estudiantes	N/A	2	\$ 8.000	\$ 16.000
26	Cables calibre 12 (4m)	Estudiantes	N/A	4	\$ 2.000	\$ 8.000
					<b>Subtotal</b>	<b>\$ 719.800</b>
<b>OTROS</b>						
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fuente de financiamiento</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cant.</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
27	Internet	UIS	Mes	4	\$ 206.000	\$ 824.000
28	Electricidad	UIS	\$/Kw*h	2000	\$ 745	\$ 1.490.000
29	Transporte	Estudiantes	Mes	4	\$ 216.000	\$ 864.000
30	Papelería	Estudiantes	N/A	10	\$ 10.000	\$ 100.000
					<b>Subtotal</b>	<b>\$ 3.278.000</b>
<b>COSTO PARCIAL DEL PROYECTO</b>						<b>\$ 16.979.950</b>
<b>IMPREVISTOS (10% COSTO PARCIAL)</b>						<b>\$ 1.697.995</b>
<b>COSTO TOTAL</b>						<b>\$ 18.677.945</b>

Nota: Autoría propia. Presupuesto para el desarrollo del proyecto

Para concluir esta sección, se observó el cumplimiento total de todos los objetivos planteados para este proyecto, a su vez en el siguiente capítulo se hacen unas recomendaciones y

posibles mejoras para profundizar más en el tema de pirolisis y la producción de biocombustibles.

## 5. Conclusiones

Después de un extenso proceso de diseño y construcción se demostró la viabilidad de realizar el proceso de pirolisis ultrarrápida a escala de laboratorio, contribuyendo que los estudiantes se interesen en el tema de biocombustibles ya que esta rama cada día crece más y esto genera un impacto positivo en el medio ambiente, considerando que la producción de biocombustibles mediante pirolisis podría reducir la dependencia de combustibles fósiles en un futuro.

Fue posible concebir los parámetros técnicos y dimensionales para construir un equipo funcional y seguro en su operación, con el cual se pudieron desarrollar y estudiar los fenómenos térmicos y químicos que ocurren para un proceso de pirolisis.

A través de los cálculos se comprobó que usar la energía liberada durante el proceso de combustión del gas natural satisface el requerimiento de calor necesario para romper la membrana que separa las dos secciones del tubo de choque y degradar en su totalidad la muestra de celulosa, sin embargo, la energía aprovechable que se obtiene de quemar gas natural es de un 65 por ciento de la energía producida, convirtiéndolo así en un proceso de eficiencia baja, además el rendimiento energético supuesto para los productos de la pirolisis es bajo comparado con el rendimiento del gas natural lo que hace que la eficiencia del equipo sea baja.

Se pudo constatar que para tener un proceso de pirolisis ultrarrápida de alrededor de 1 segundo es necesario suministrar una cantidad de energía de manera ultrarrápida y para ello es necesario que la fuente de dicha energía transfiera esa energía de igual manera. Por lo que, si bien la quema de gas natural no es un proceso de alta eficiencia, si cumple con el requerimiento de transmitir la energía de manera ultrarrápida gracias a la onda que transporta dicha energía producto

de la combustión.

Ya que el proceso ocurre en un corto tiempo las pérdidas de calor que pudieron presentarse por conducción a través de la pared del tubo se reducían hasta tal punto de ser despreciables, por lo que se asumió que no hay pérdidas de calor. Garantizando que toda la energía aprovechable de la combustión se utilizaba para la degradación de la celulosa y luego de degradar la celulosa el calor remanente se empleaba para calentar el argón contenido en la sección de baja presión.

Se creó un manual en el que se recopilaron de manera clara las especificaciones técnicas y condiciones para una buena operación del tubo de choque. Junto con ello se logró realizar una guía sencilla para poder recrear una práctica de laboratorio.

A pesar de nuestros logros, reconocemos que aún existen oportunidades para la mejora continua de la tecnología del tubo de choque para pirolisis ultrarrápida ya que, este fue un modelo a escala de laboratorio y el rendimiento obtenido no fue muy favorable debido a que el suministro de gas se llevaba a cabo sin hacer uso de un flujómetro con el cual inyectar de manera precisa la cantidad requerida. Sumado a esto para constatar un equipo más ecológico se pudiera emplear como combustible biogás proveniente de un biodigestor. De igual forma es recomendable actualizar los manómetros analógicos empleados, a manómetros digitales que puedan dar una medida más exacta. Finalmente, para tener un mejor manejo de los productos gaseosos de la pirolisis se pudiera emplear una válvula de cheque adaptada junto con un tanque de acero para contener estos productos y posteriormente analizarlos con un cromatógrafo para conocer realmente el tipo y porcentajes de cada producto.

## Referencias bibliográficas

- Acuña Zárate, M. J., & Montoya Peñaloza, H. C. (2016). DISEÑO DE UN REACTOR TIPO AUGER PARA LA PRODUCCION DE COMBUSTIBLES MEDIANTE PIROLISIS.
- Arias Vanegas, M. A. (2017). Diseño y construcción de un tubo de choque (MÁSTER). UNIVERSIDAD DE LOS ANDES COLOMBIA.
- Cengel, Y. A. (2012). Termodinámica. McGraw-Hill Interamericana.
- García, R. (2001). Combustión y combustibles.
- Geissman, T. A. (1973). Principios de química orgánica. Reverte.
- LLANTAS USADAS (Ingeniero). Universidad Industrial de Santander.
- OCDE/FAO (2002), OCDE-FAO Biocombustibles y demanda de materias primas 2000 2027, Publicaciones de la OCDE, París/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2018-es](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2018-es).
- Öztürk, Z., & Merklin, J. F. (1993, septiembre). FAST PYROLYSIS OF CELLULOSE IN A SINGLE PULSE SHOCK TUBE. Pergamon.
- Rodríguez Gutiérrez, D. A., & Rivera Lozano, G. V. (2021). Diseño conceptual y preliminar de un tubo de choque supersónico. (Ingeniero). Fundación Universitaria los Libertadores.
- ScienceDirect. (1996). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/shock-tubes>.
- ScienceDirect. (2008). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/pyrolysis>.
- ScienceDirect. (2021). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical->

engineering/fast-pyrolysis.

Urien pinedo, A. (2013). OBTENCION DE BIOCARBONES Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIROLISIS DE BIOMASA RESIDUAL (MÁSTER). UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACION A DISTANCIA.


Wang, D. &. (11 de junio de 2019). Computer Aided Chemical Engineering. Stanford, United States: ELSEVIER.

## Apéndices

### Apéndice A. Planos tubo de choque.

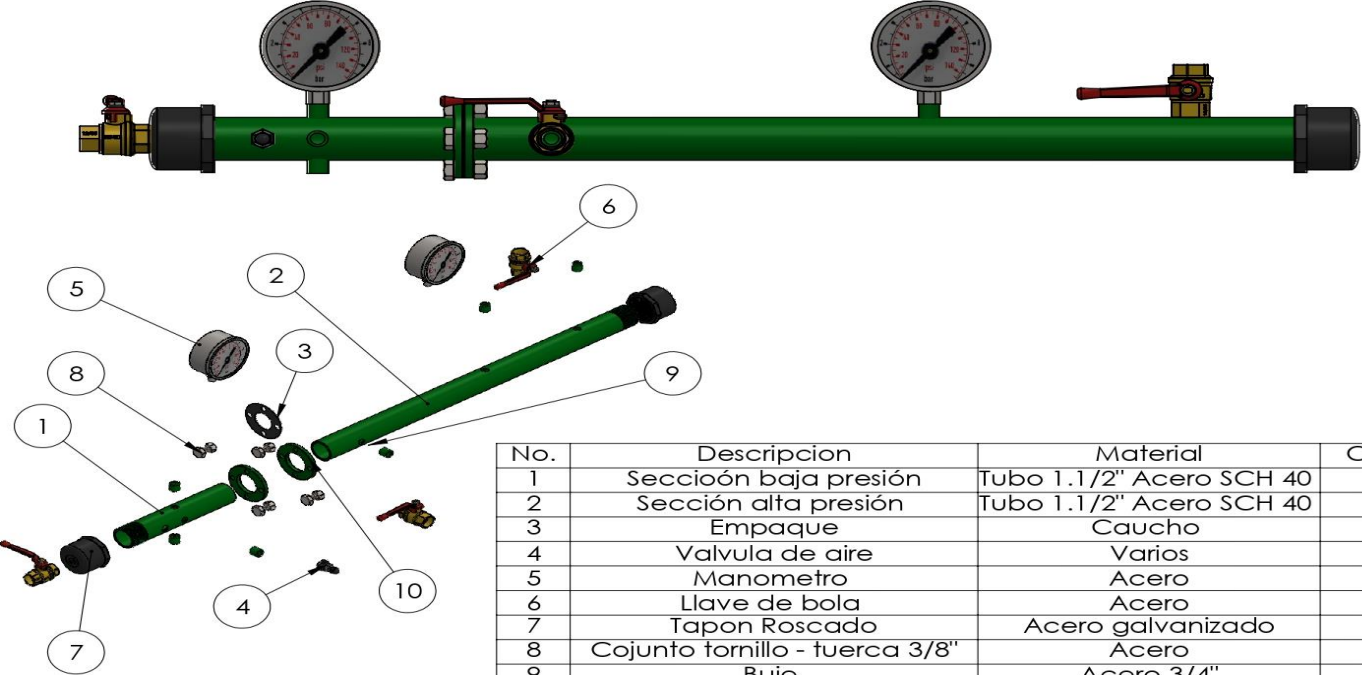
Tubo de choque

## Ens. Tubo de choque



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



No.	Descripcion	Material	Cant.
1	Sección baja presión	Tubo 1.1/2" Acero SCH 40	1
2	Sección alta presión	Tubo 1.1/2" Acero SCH 40	1
3	Empaque	Caucho	1
4	Valvula de aire	Varios	1
5	Manometro	Acero	2
6	Llave de bola	Acero	3
7	Tapon Roscado	Acero galvanizado	2
8	Cojunto tornillo - tuerca 3/8"	Acero	4
9	Buje	Acero 3/4"	6
10	Bridas	Acero	2

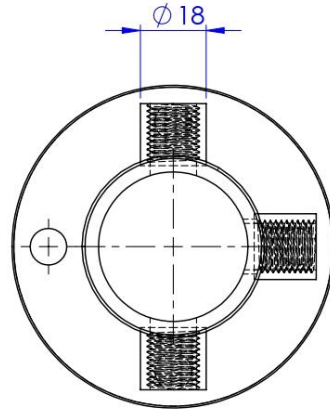
TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS: LINEAL $\pm 0.1$ $\pm 0.1$ $\pm 0.1$ $\pm 0.1$ ACABADO SEGÚN PIEZA		NOMBRE COMPONENTE: Tubo Choque		FECHA ACTUAL: 7/08/2023	FECHA CREACION: 2/08/2023	REVISÓ: J. RUEDA	CANT. PIEZAS: 01
MECANIZADO: MILIMETROS $\pm 0.2$ $\pm 0.1$ $\pm 0.1$ $\pm 0.1$ SEGÚN PIEZA		NOMBRE PIEZA: Tubo de choque		MATERIAL: Varios		DIBUJÓ: J. HERRERA	<b>01</b> HOJA No. 1 DE 7
METALISTERIA: MILIMETROS $\pm 1$ $\pm 1$ $\pm 1$ $\pm 1$ SEGÚN PIEZA		CONTROL DE CAMBIO:		RESPONSABLES DE CAMBIO:		DIBUJÓ:	
DIMENSIONES NO ESPECIFICADAS, EN MILIMETROS		CAMBIO:		AUTORIZO:		PROCESO <b>Ensamble</b>	

RUTA: C:\Users\jherera\Documents\Proyecto



**Tubo de choque**

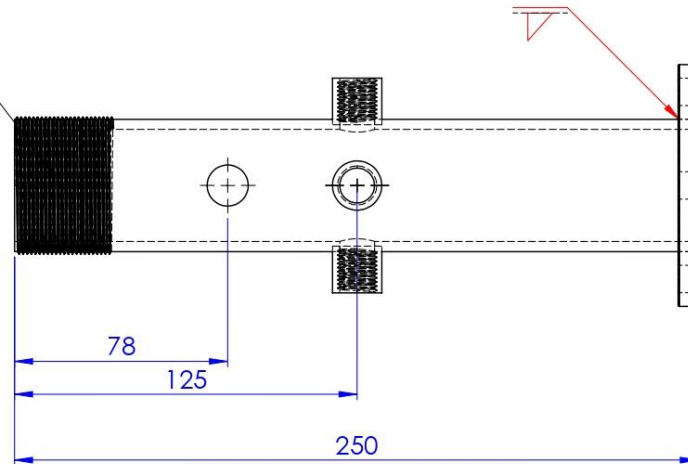
**Sección alta presión**



NOTA: Soldar 3 bujes equidistantes a 90°, luego taladrar y roscar con macho NPT 1/4" 14 hilos



Rosca NPT 1.1/2" 14 hilos



TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS	LINEAL	Ø	⊥	∠	ACABADO
MECANIZADO	MILÉSIMAS ±0.2	±0.1	±0.1	±0.1	BU/TA SEGÚN PIEZA
METALISTERIA	MILÍMETROS ±1	±1	±1	±1	SEGÚN PIEZA

DIMENSIONES NO ESPECIFICADAS, EN MILÍMETROS

NOMBRE COMPONENTE:	Tubo Choque	FECHA ACTUAL:	7/08/2023	FECHA CREACION:	2/08/2023	REVISÓ:	J. RUEDA	CANT. PIEZAS:	01
NOMBRE PIEZA:	Sección alta presión	DIBUJÓ:	J. HERRERA						
MATERIAL:	Tubo acero 1.1/2" SCH 40								
CONTROL DE CAMBIO:	VERSION	MODIFICACION	RESPONSABLES DE CAMBIO						
			DIBUJÓ:						
			AUTORIZÓ:						

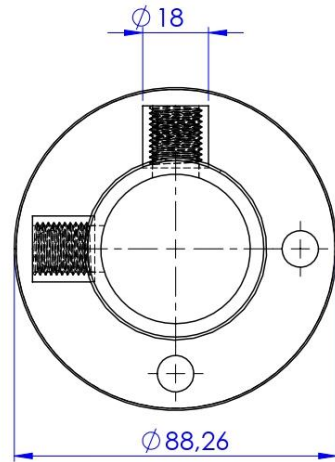
<b>PROCESO</b>	
<b>SOLDADURA</b>	
HOJA No. 2 DE 7	

RUTA: C:\Users\jherrera\Documents\Proyecto\

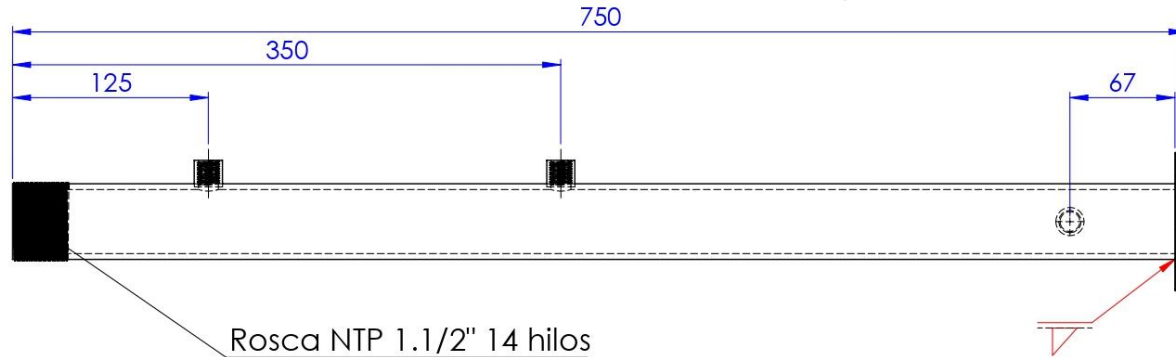


Tubo de choque

Sección baja presión



NOTA: Soldar bujes 2 bujes colineales y el siguiente a 90°; luego taladrar y roscar con macho NPT 1/4" 14 hilos



TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS	LINEAL				ACABADO
	Ø	⊥	∠	BU/A	
MECANIZADO	MILÉSIMAS ±0.2	±0.1	±0.1	±0.7	SEGÚN PIEZA
METALISTERIA	MILÍMETROS ±1	±1	±1	±1°	SEGÚN PIEZA

DIMENSIONES NO ESPECIFICADAS, EN MILÍMETROS

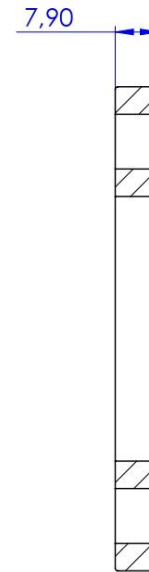
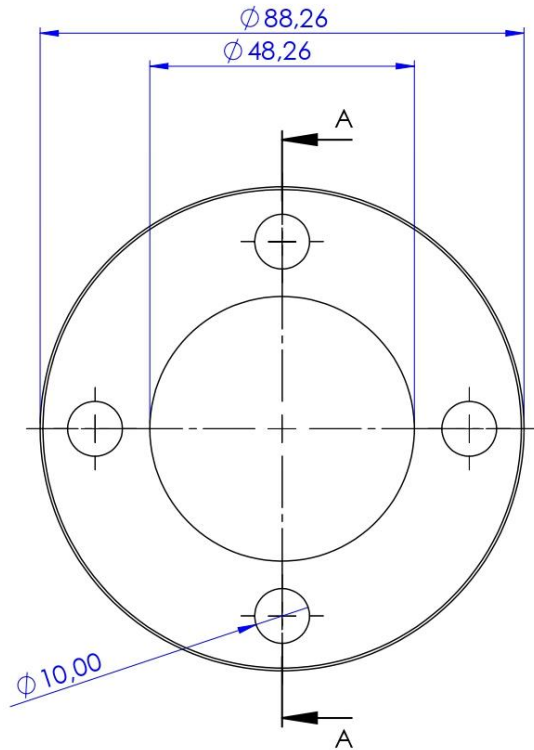
NOMBRE COMPONENTE:	Tubo Choque						
NOMBRE PIEZA:	Sección baja presión						
MATERIAL:	Tubo acero 1.1/2" SCH 40						
CONTROL DE CAMBIO	<table border="1"> <thead> <tr> <th>VERSIÓN</th> <th>MODIFICACIÓN</th> <th>RESPONSABLES DE CAMBIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	VERSIÓN	MODIFICACIÓN	RESPONSABLES DE CAMBIO			
VERSIÓN	MODIFICACIÓN	RESPONSABLES DE CAMBIO					
		DIBUJÓ:					
		AUTORIZÓ:					

FECHA ACTUAL	FECHA CREACION	REVISÓ: J. RUEDA	CANT. PIEZAS
7/08/2023	2/08/2023	DIBUJÓ: J. HERRERA	
PROCESO			01
SOLDADURA			
			HOJA No.
			3 DE 7

RUTA: C:\Users\jherera\Documents\Proyectos\

Tubo de choque

**Bridas**



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1

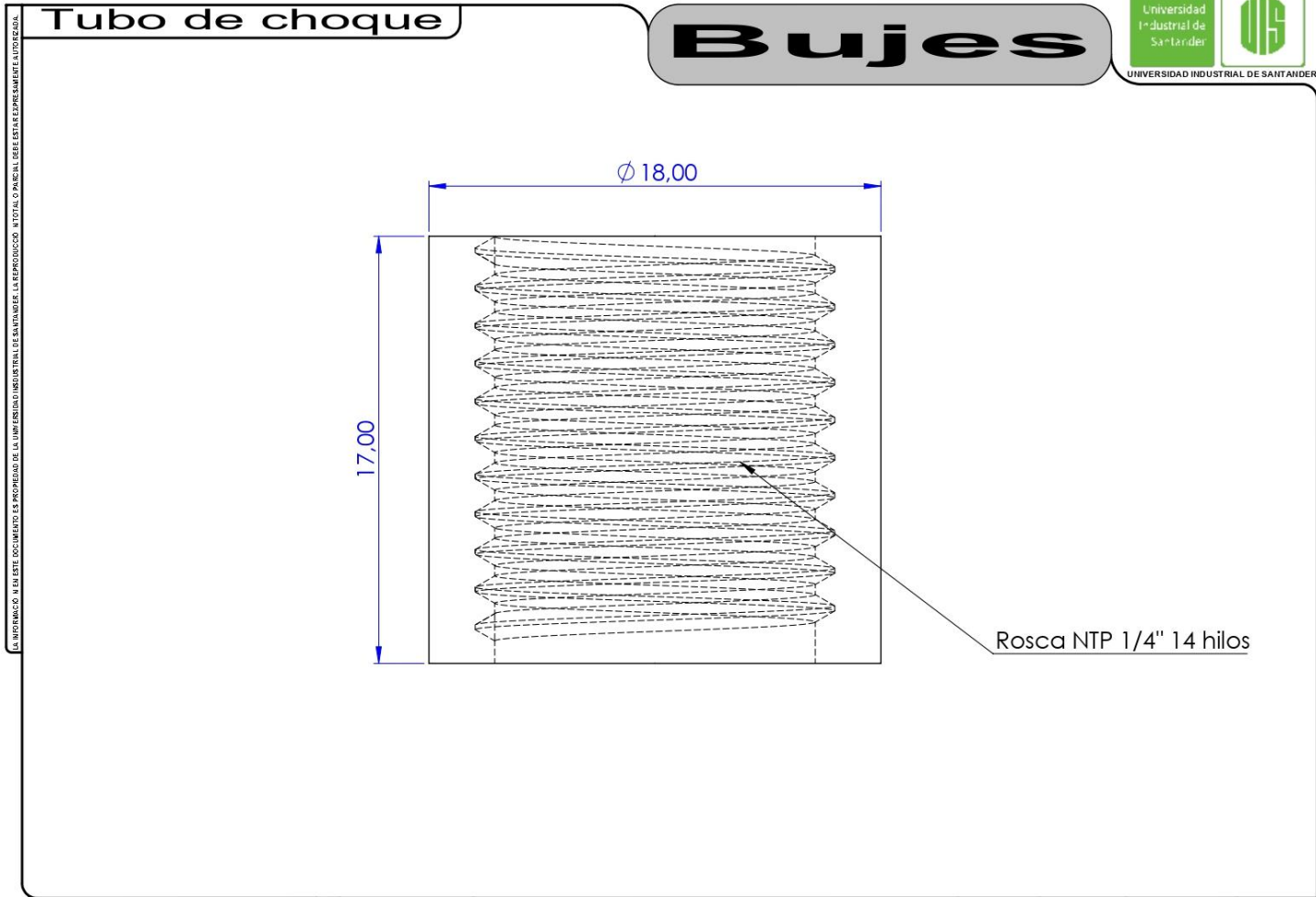
TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS	LINEAL	ACABADO			SEGUN PIEZA
		RA	RA	RA	
MECANIZADO	MILÉSIMAS	±0.2	±0.1	±0.1	SEGUN PIEZA
METALISTERIA	MILÍMETROS	+1	+1	+1	SEGUN PIEZA

DIMENSIONES NO ESPECIFICADAS, EN MILÍMETROS

NOMBRE COMPONENTE:	Tubo Choque	FECHA ACTUAL:	7/08/2023	FECHA CREACION:	2/08/2023	REVISÓ:	J. RUEDA
NOMBRE PIEZA:	Bridas					DIBUJÓ:	J. HERRERA
MATERIAL:	Lamina HR Calibre 5/16"	RESPONSABLES DE CAMBIO					
CONTROL DE CAMBIO	VERSIÓN	MODIFICACIÓN	DIBUJÓ:				
			AUTORIZÓ:				

PROCESO		CANT. PIEZAS
<b>MECANIZADO</b>		
		HOJA No.
		4 DE 7

RUEDA: C:\Users\jherrera\Documents\Proyectos\



TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS		LINEAL	Ø	⊥	∠	ACABADO	NOMBRE COMPONENTE: Tubo Choque		FECHA ACTUAL	FECHA CREACION	REVISÓ: J. RUEDA	CANT. PIEZAS	
		MILÉSIMAS	±0.2	±0.1	±0.1	±0.7	NOMBRE PIEZA: Bujes		7/08/2023	2/08/2023	DIBUJÓ: J. HERRERA	06	
		MILÍMETROS	±1	±1	±1	±1*	MATERIAL: Acero redondo 3/4"		PROCESO				HOJA No. 5 DE 7
		DIMENSIONES NO ESPECIFICADAS, EN MILÍMETROS						CONTROL DE CAMBIO		MECANIZADO/SOLDADURA			

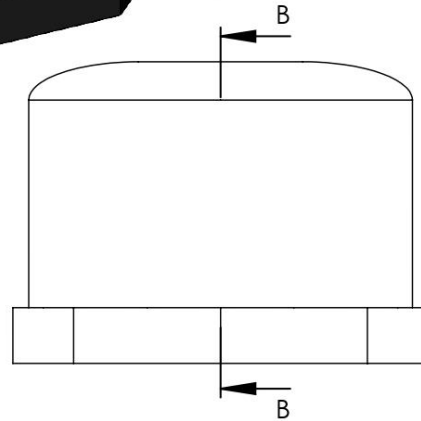


C:\Users\jherrera\Documents\Proyectos\

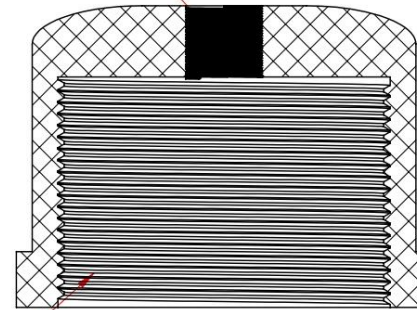


Tubo de choque

Tapa sección alta presión



Taladrado y roscado NTP 1/4" 14 hilos



SECCIÓN B-B  
ESCALA 1 : 1

Roscado NTP 1.1/2" 14 hilos

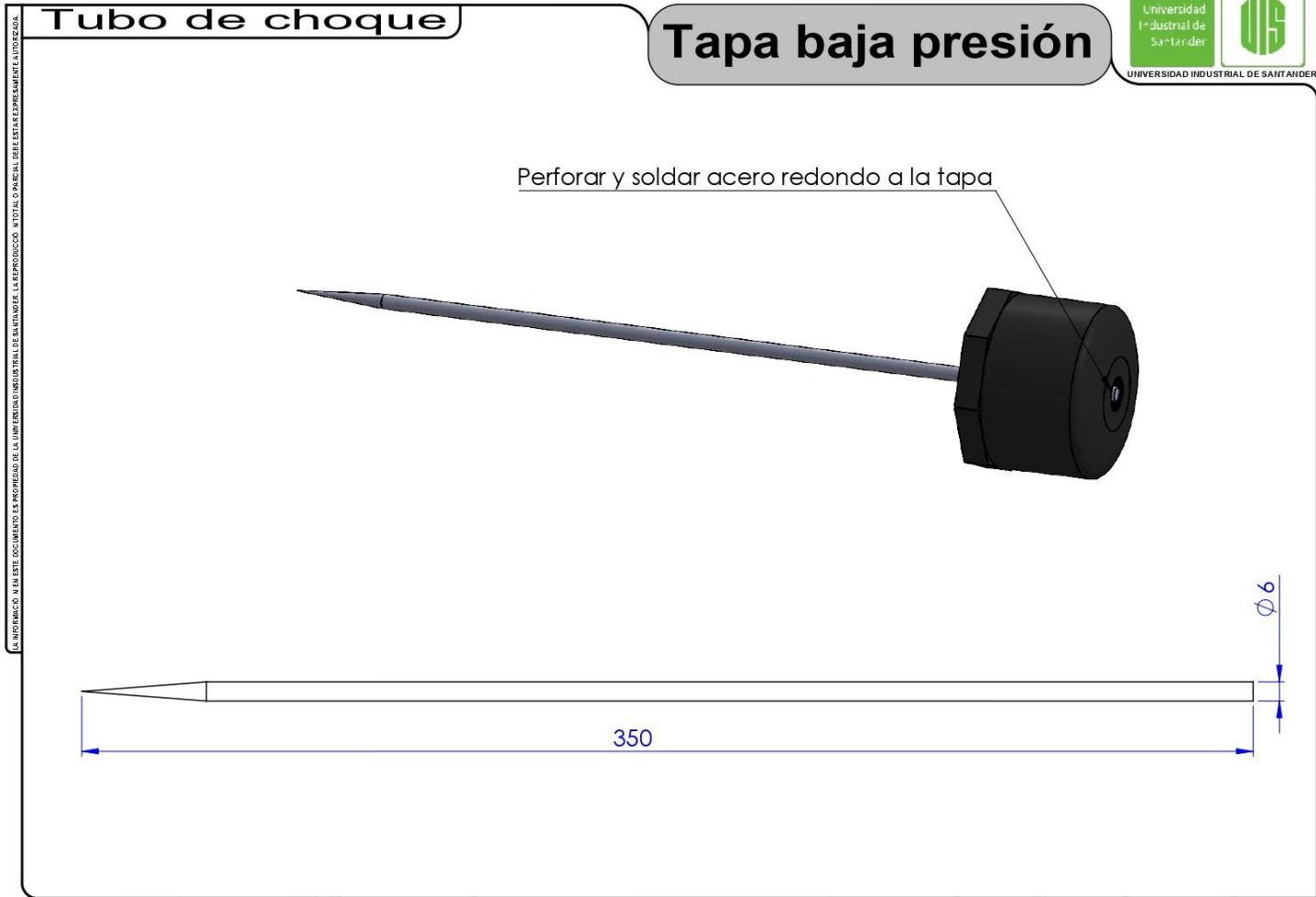
TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS	LINEAL	Ø			ACABADO
		±8	±4	±0.7	
MECANIZADO	MILÉSIMAS	±8	±4	±0.7	SEGUN PIEZA
METALISTERIA	MILÍMETROS	+1	+1	+1	SEGUN PIEZA

DIMENSIONES NO ESPECIFICADAS, EN MILÍMETROS

NOMBRE COMPONENTE:		Tubo Choque	
NOMBRE PIEZA:		Tapa sección alta presión	
MATERIAL:		Acero	
CONTROL DE CAMBIO	VERSIÓN	MODIFICACIÓN	RESPONSABLES DE CAMBIO
			DIBUJÓ:
			AUTORIZÓ:

FECHA ACTUAL	FECHA CREACION	REVISÓ: J. RUEDA	CANT. PIEZAS
7/08/2023	2/08/2023	DIBUJÓ: J. HERRERA	01
PROCESO			HOJA No.
<b>MECANIZADO</b>			6 DE 7

RUTA: C:\Users\jherrera\Documents\Proyectos\



Tubo de choque

Tapa baja presión




Perforar y soldar acero redondo a la tapa

TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS		LINEAL	$\circ$	$\perp$	$\angle$	ACABADO	NOMBRE COMPONENTE: Tubo Choque	FECHA ACTUAL: 7/08/2023	FECHA CREACION: 2/08/2023	REVISÓ: J. RUEDA	CANT. PIEZAS: 01	
MECANIZADO	MILÉSIMAS	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$	SEGUN PIEZA	NOMBRE PIEZA: Tapa baja presión	DIBUJÓ: J. HERRERA	PROCESO		HOJA No. 7 DE 7	
METALISTERIA	MILÍMETROS	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	SEGUN PIEZA	MATERIAL: Acero	SOLDADURA		RUTA:		
DIMENSIONES NO ESPECIFICADAS, EN MILÍMETROS							CONTROL DE CAMBIO	VERSIÓN	MODIFICACIÓN	RESPONSABLES DE CAMBIO		
										DIBUJÓ:		
										AUTORIZÓ:		

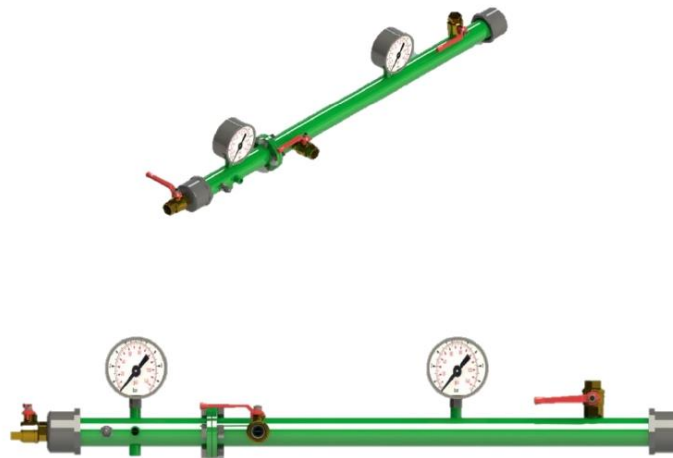
C:\Users\jherrera\Documents\Proyecto1

## Apéndice B. Manual técnico

	MANUAL TECNICO LABORATORIO DE COMBUSTION	CÓDIGO: 21808
		VERSION: 01
		FECHA MOD: 7/08/2023
		Pág. 1 de 7

El presente documento contiene las especificaciones técnicas y el procedimiento de operación del equipo.

### TUBO DE CHOQUE PARA PIROLISIS ULTRARRÁPIDA



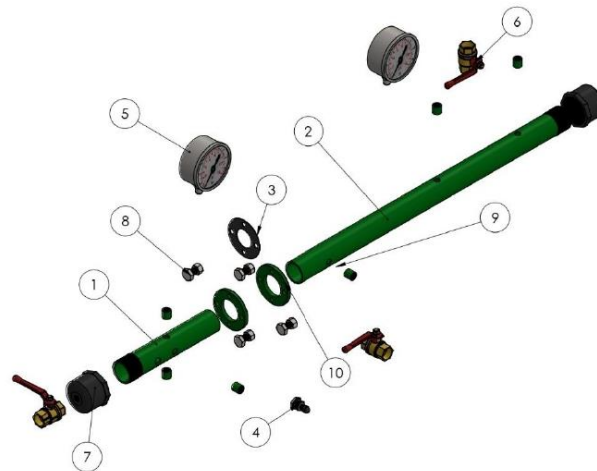
Equipo para practica de laboratorio de combustión donde su objetivo es analizar el proceso de pirolisis ultrarrápida mediante la degradación de celulosa en tiempos cortos [1.9s]

	MANUAL TECNICO LABORATORIO DE COMBUSTION	CÓDIGO: 21808
		VERSION: 01
		FECHA MOD: 7/08/2023
		Pág. 2 de 7

**FICHA TÉCNICA**

Capacidad	20 a 50 mg/corrida
Medidas	1 m x 0.2 m x 0.2 m
Voltaje entrada / salida	3.6 v/ 40 kV
Corriente entrada / salida	3A / 0.05A
Presión de trabajo	80 psi
Relación aire/ combustible	14/1
Flujo argón	5 psi

**DESCRIPCION DEL TUBO DE CHOQUE**



	<p style="text-align: center;">MANUAL TECNICO LABORATORIO DE COMBUSTION</p>	CÓDIGO: 21808
		VERSION: 01
		FECHA MOD: 7/08/2023
		Pág. 3 de 7

1. Sección de alta presión.
2. Sección baja presión.
3. Empaque.
4. Válvula de aire.
5. Manómetro 0-100 [psi].
6. Llave de bola 1/4".
7. Tapa roscada 1.1/2".
8. Conjunto tornillo tuerca 3/8".
9. Bujes roscados.
10. Bridas.

#### OPERACIÓN DEL TUBO DE CHOQUE

- Unir ambas las dos secciones mediante los tornillos, ubicar el empaque y la membrana entre ambas secciones y apretar tornillos y tuercas firmemente para que no se presenten fugas.
- Cerciórese de conectar el suministro de gas a la llave de bola ubicada en la sección de alta presión de manera que no se presente escapes de gas al interior del laboratorio.



- El suministro de gas cuenta con dos llaves de seguridad en caso de presentarse un daño con la primera llave de bola.
- Suministrar 2 psi de gas a la cámara y posteriormente suministrar aire mediante la válvula de aire.


	<p>MANUAL TECNICO LABORATORIO DE COMBUSTION</p>	CÓDIGO: 21808
		VERSION: 01
		FECHA MOD: 7/08/2023
		Pág. 4 de 7



- Suministrar 28 psi de aire mediante el uso de una bomba de para bicicletas.
- Tomar muestras de 20 mg de celulosa (algodón) y ubicarlos en el acero redondo que tiene la tapa de la sección de baja presión.
- Para todas las conexiones utilizar teflón para garantizar la presurización del equipo.
- Suministrar argón desde la válvula de bola próxima a la brida en la sección de baja presión; es necesario el uso de un flujómetro ya que debe ingresar argón a 5 [psi] durante 40 [s] para garantizar la ausencia de oxígeno.



- Una vez verificado que no hay fugas y se mantiene la presión de la mezcla se hace la ignición de la chispa mediante la fuente de alto voltaje; la cual esta conectada a dos tornillos que se ubican a 90° en la sección de alta presión.

	<p style="text-align: center;">MANUAL TECNICO LABORATORIO DE COMBUSTION</p>	CÓDIGO: 21808
		VERSION: 01
		FECHA MOD: 7/08/2023
		Pág. 5 de 7



- Una vez todo este conectado se hace la detonación, la combustión de la mezcla rompe la membrana de aluminio ubicada en medio de las dos secciones, la onda generada viaja a través del tubo transportando toda la energía de la combustión toda esta energía degrada la celulosa y se produce biogases en una cantidad baja y hollín que se puede evidenciar en las paredes del tubo.
- Ubicar una bomba para la recolección de gases, esta se ubica en la última válvula de bola que permanecerá cerrada en todo momento y se debe abrir cuando ya se haya realizado todo el proceso para que todos los gases producidos puedan empaquetarse.



- Luego de realizada la combustión y degradación de celulosa se retira la tapa de baja presión y se evidencia que hay poca cantidad de celulosa siendo esta relativamente nula
- Con la bomba llena de gases se puede hacer una prueba de combustión para verificar si se produjeron biogases, esto consiste en dejar salir un flujo pequeño de la bomba y encender una llama continuo al flujo si la llama aumenta es evidencia de que se produjeron biogases.

 	MANUAL TECNICO LABORATORIO DE COMBUSTION	CÓDIGO: 21808
		VERSION: 01
		FECHA MOD: 7/08/2023
		Pág. 6 de 7

#### PROCEDIMIENTO PARA UNA NUEVA MUESTRA

- Desajuste y retire los tornillos y tuercas.
- Reemplazar la membrana.
- Ubicar la nueva muestra en el acero redondo de la tapa.
- Unir y ajustar nuevamente todo el equipo.
- Verificar que no se presente escapes.
- Repetir el proceso anteriormente descrito.

#### PRECAUCIONES

- Siempre cerciórese de que no se presenten fugas
- No utilizar la fuente de alto voltaje de manera diferente a lo descrito en este manual.
- No maltratar las válvulas ya que podrían perder su efectividad de sello.
- No dejar caer el equipo ya que contiene piezas críticas como manómetros y válvulas.
- Cerrar correctamente el suministro de los gases y apagar la fuente de alto voltaje cuando se termine la práctica.
- Ubicar el equipo en un lugar seguro y estable.

## Apéndice C. Modelo matemático

Analisis del combustible en la camara de combustión antes de mezclarse con el aire.

$$P_m * V_m = Z_m * N * R_u * T_m \quad \text{Ecuación de Van Der Waals}$$

$$N = (P * V) / (Z_m * R_u * T) \quad \text{De esta manera se conoce el número de moles}$$

$$Z_m = \sum Y_i * Z_i \quad \text{Factor de compresibilidad de la mezcla}$$

$$Y_i = N_i / N_m = V_i / V_m \quad \text{Fracción molar}$$

$$Z_i [P_r ; T_r] \quad \text{Factor de compresibilidad de cada componente}$$

$$T_r = (T_m) / (T_{\text{critica}}) ; P_r = (P_m) / (P_{\text{critica}})$$

$$R_u = 8,3144 \quad [(\text{KPa} * \text{m}^3) / (\text{Kmol} * \text{K})] \quad \text{Constante universal de los gases}$$

Calculo de  $Z_i$  para cada componente del combustible. Se trabaja con G.N Vanti, el cual se compone en su mayoría de Metano 81,86% ( $\text{CH}_4$ ), etano 11,61% ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano 1.92% ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y dióxido de carbono 3,18% ( $\text{CO}_2$ ).

$$T_{r\text{CH}_4} = \frac{T_m}{T_{\text{criCH}_4}}$$

$$T_m = 298,15 \quad ^\circ\text{K, es la temperatura ambiente a la que está el combustible}$$

$$T_{\text{criCH}_4} = 191,1 \quad ^\circ\text{K, Tomado de la tabla A-1 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$T_{r\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{T_m}{T_{\text{criC}_2\text{H}_6}}$$

$$T_{\text{criC}_2\text{H}_6} = 305,5 \quad ^\circ\text{K, Tomado de la tabla A-1 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$T_{r\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{T_m}{T_{\text{criC}_3\text{H}_8}}$$

$$T_{\text{criC}_3\text{H}_8} = 370 \quad ^\circ\text{K, Tomado de la tabla A-1 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$T_{r\text{CO}_2} = \frac{T_m}{T_{\text{criCO}_2}}$$


---

$$T_{\text{criCO}_2} = 304,2 \text{ } ^\circ\text{K, Tomado de la tabla A-1 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$P_{r\text{CH}_4} = \frac{P_m}{P_{\text{criCH}_4}}$$

$$P_m = 0,1219 \text{ } ^\circ\text{MPa, es la presión a la que se inyecta el combustible (3 Psi + 14,69) Psi}$$

$$P_{\text{criCH}_4} = 4,64 \text{ } ^\circ\text{MPa, Tomado de la tabla A-1 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$P_{r\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{P_m}{P_{\text{criC}_2\text{H}_6}}$$

$$P_{\text{criC}_2\text{H}_6} = 4,48 \text{ } ^\circ\text{MPa, Tomado de la tabla A-1 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$P_{r\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{P_m}{P_{\text{criC}_3\text{H}_8}}$$

$$P_{\text{criC}_3\text{H}_8} = 4,26 \text{ } ^\circ\text{MPa, Tomado de la tabla A-1 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$P_{r\text{CO}_2} = \frac{P_m}{P_{\text{criCO}_2}}$$

$$P_{\text{criCO}_2} = 7,39 \text{ } ^\circ\text{MPa, Tomado de la tabla A-1 del libro de Cengel 7 ed}$$

El factor de compresibilidad para cada componente, se obtiene de la gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson - Obert

$$Z_{\text{CH}_4} = 1 \text{ Según gráfica, a) presiones bajas } 0 < P_r < 1,0 \text{ del libro de Cengel 7 ed}$$

$$Z_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0,98 \text{ Según gráfica, a) presiones bajas } 0 < P_r < 1,0 \text{ del libro de Cengel 7 ed}$$

$$Z_{C_2H_6} = 0,98 \quad \text{Según gráfica, a) presiones bajas } 0 < P_r < 1,0 \text{ del libro de Cengel 7 ed}$$

$$Z_{C_3H_8} = 0,98 \quad \text{Según gráfica, a) presiones bajas } 0 < P_r < 1,0 \text{ del libro de Cengel 7 ed}$$

$$Z_{CO_2} = 1 \quad \text{Según gráfica, a) presiones bajas } 0 < P_r < 1,0 \text{ del libro de Cengel 7 ed}$$

La fracción molar se calcula con la relación de volumen parcial y volumen de la mezcla.

Para este caso el volumen de la mezcla se toma como el volumen de la cámara de combustión ya que es el volumen que ocupa el combustible antes de inyectar aire a la cámara de combustión, donde las dimensiones para la cámara de combustión son  $\varnothing=3,81\text{cm}$  y  $L=15\text{cm}$

$$V_m = 285 \quad [\text{cm}^3]$$

$$V_{CH_4} = 233,3 \quad [\text{cm}^3]$$

$$V_{C_2H_6} = 33,08 \quad [\text{cm}^3]$$

$$V_{C_3H_8} = 5,47 \quad [\text{cm}^3]$$

$$V_{CO_2} = 9 \quad [\text{cm}^3]$$

$$Y_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_m}$$

$$Y_{C_2H_6} = \frac{V_{C_2H_6}}{V_m}$$

$$Y_{C_3H_8} = \frac{V_{C_3H_8}}{V_m}$$

$$Y_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_m}$$

$Z_m = \text{Sumatoria}(Y_i \cdot Z_i)$  Factor de compresibilidad de la mezcla

$$Z_m = Z_{CH_4} \cdot Y_{CH_4} + Z_{C_2H_6} \cdot Y_{C_2H_6} + Z_{C_3H_8} \cdot Y_{C_3H_8} + Z_{CO_2} \cdot Y_{CO_2}$$

Calculo del número de moles de combustible. De la ecuación de Van Der Waals se despeja el número de moles de combustible a usar, los cuales se calculan a temperatura ambiente, presión a la que se inyecta el combustible y volumen que ocupa el combustible en la cámara de combustión

$$N_{\text{fuel}} = P_m \cdot 1000 \cdot \frac{\frac{V_m}{1000000}}{Z_m \cdot R_u \cdot T_m} \cdot 1000 \quad [\text{mol}]$$

Número de moles de cada componente de combustible

$$N_i = Y_i \cdot N_{\text{fuel}}$$

$$N_{CH_4} = Y_{CH_4} \cdot N_{\text{fuel}}$$

$$N_{C_2H_6} = Y_{C_2H_6} \cdot N_{\text{fuel}}$$

$$N_{C_3H_8} = Y_{C_3H_8} \cdot N_{\text{fuel}}$$

$$N_{CO_2} = Y_{CO_2} \cdot N_{\text{fuel}}$$

Análisis estequiométrico de combustión. Conociendo el número de moles de cada componente de combustible se realiza un análisis con 100% de aire estequiométrico

$$N_{CH_4} \cdot CH_4 + N_{C_2H_6} \cdot C_2H_6 + N_{C_3H_8} \cdot C_3H_8 + N_{CO_2} \cdot CO_2 + X(O_2 + 3,77N_2) = B \cdot CO_2 + C \cdot H_2O + D \cdot N_2$$

$$N_{CH_4} + 2 \cdot N_{C_2H_6} + 3 \cdot N_{C_3H_8} + N_{CO_2} = B \quad \text{Balance de carbonos}$$

$$\frac{4 \cdot N_{CH_4} + 6 \cdot N_{C_2H_6} + 8 \cdot N_{C_3H_8}}{2} = C \quad \text{Balance de hidrogenos}$$

$$2 \cdot N_{CO_2} + 2 \cdot X = 2 \cdot B + C \quad \text{Balance de oxigenos}$$

$$2 \cdot X \cdot 3,77 = 2 \cdot D \quad \text{Balance de nitrogenos}$$

$$B = N_{proCO_2} \quad \text{Número de moles de CO}_2 \text{ en los productos}$$

$$C = N_{proH_2O} \quad \text{Número de moles de H}_2\text{O en los productos}$$

$$D = N_{proN_2} \quad \text{Número de moles de N}_2 \text{ en los productos}$$

Calculo de la T° de salida de los gases de combustión. Para este calculo se dice que la camara de combustión es adiabática y por tanto se aproxima la temperatura de salida de los gases a la temperatura de llama adiabática, asumiendo que no hay interacciones de trabajo ni cambios en las energías cinéticas y potencial

$$H_{pro} = H_{reac}$$

$$\text{Sumatoria}_{N,prod}(h_f + h_{sal} - h_{ref})_{prod} = \text{Sumatoria}_{N,react}(h_f + h_{ent} - h_{ref})_{react}$$

$$h_{fCO_2} = -393520 \quad [\text{kJ/kmol}] \quad \text{Tomado de la tabla A-26 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$h_{fH_2O} = -241820 \quad [\text{kJ/kmol}] \quad \text{Tomado de la tabla A-26 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$h_{fN_2} = 0 \quad [\text{kJ/kmol}] \quad \text{Tomado de la tabla A-26 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$h_{fCH_4} = -74850 \quad [\text{kJ/kmol}] \quad \text{Tomado de la tabla A-26 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$h_{fC_2H_6} = -84680 \quad [\text{kJ/kmol}] \quad \text{Tomado de la tabla A-26 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$h_{fC_3H_8} = -103850 \quad [\text{kJ/kmol}] \quad \text{Tomado de la tabla A-26 del libro de Cengel 7 ed}$$

$$h_{refCO_2} = 9364 \quad [\text{kJ/kmol}] \quad \text{Tomado de la tabla A-20 del libro de Cengel 7 ed; @ 298 °K}$$

$$h_{refH_2O} = 9904 \quad [\text{kJ/kmol}] \quad \text{Tomado de la tabla A-23 del libro de Cengel 7 ed; @ 298 °K}$$

$$h_{refN2} = 8609 \text{ [KJ/kmol]} \text{ Tomado de la tabla A-18 del libro de Cengel 7 ed; @ 298 °K}$$

$$H_{pro} = N_{proCO2} \cdot (h_{fCO2} + h_{sal} - h_{refCO2}) + N_{proH2O} \cdot (h_{fH2O} + h_{sal} - h_{refH2O}) + N_{proN2} \cdot (h_{fN2} + h_{sal} - h_{refN2})$$

Para el calculo de la entalpia de los reactivos, se omiten los valores de  $h_{entr}$  y  $h_{ref}$  ya que estos dos son iguales porque el combustible ingresa a la temperatura ambiente

$$H_{reac} = N_{CH4} \cdot h_{fCH4} + N_{C2H6} \cdot h_{fC2H6} + N_{C3H8} \cdot h_{fC3H8} + N_{CO2} \cdot h_{fCO2}$$

$$H_{pro} = H_{reac}$$

Lo que produce

$$N_{proCO2} \cdot h_{sal} + N_{proH2O} \cdot h_{sal} + N_{proN2} \cdot h_{sal} = 13184,75 \text{ [J]}$$

Se obtiene un valor de entalpia de salida para cada gas producto de la combustión, el cual se asume igual para todos los productos de la combustión y de esta manera se calcula un valor de temperatura de salida para cada gas equivalente a dicho valor de entalpia

$$T_{salCO2} = 1742,8 \text{ [°K]} \text{ Tomado de la tabla A-20 del libro de Cengel 7 ed; @ 85400 KJ/Kmol}$$

$$T_{salH2O} = 2054,7 \text{ [°K]} \text{ Tomado de la tabla A-23 del libro de Cengel 7 ed; @ 85400 KJ/kmol}$$

$$T_{salN2} = 2565,9 \text{ [°K]} \text{ Tomado de la tabla A-18 del libro de Cengel 7 ed; @ 85400 KJ/Kmol}$$

Con estos valores de temperatura la  $H_{pro} > H_{reac} = 13723 > 13184,75$ , por tanto se debe tomar un valor de temperatura menor. Como primera opción se toma un valor por debajo al valor de la temperatura del N2 ya que este se encuentra en mayor proporción en los gases de combustión

$$h_{sal} @ 2450 \text{ [°K]}$$

$$h_{salCO2} = 128219 \text{ [KJ/Kmol]}$$

$$h_{salH2O} = 106183 \text{ [KJ/Kmol]}$$

$$h_{salN2} = 81149 \text{ [KJ/Kmol]}$$

$$H_{pro} = 14539,8 \text{ [J]}$$

Con estos valores de entalpias,  $H_{pro} < H_{reac}$ , por lo cual ya es posible obtener el valor de temperatura de salida haciendo una iteración

$$2100 \text{ °K} \text{ ----- } 12185,85 \text{ J}$$

$$T_{sal} \text{ °K} \text{ ----- } 13184,75 \text{ J}$$

$$2450 \text{ °K} \text{ ----- } 14539,82 \text{ J}$$

$$T_{sal} = 2248,5 \text{ [°K]}$$

Cálculo de la presión que se alcanza en la camara de combustión.

Para esto se hace la aproximación de los productos de combustión como gases ideales para poder emplear la ecuación de estado de un gas ideal

$$P_{maxcombust} = \frac{\frac{N_{fuel}}{1000} \cdot R_u \cdot T_{sal}}{\frac{V_m}{1000000}}$$

Balance de energía en la cámara de combustión. Para este análisis se toma en cuenta que el flujo es estacionario y que no hay suministro de calor desde el exterior ni tampoco interacciones de trabajo

$$E_{ent} = E_{sal}$$

$$E_{ent} = Q_{ent} + W_{ent} + \text{suma}_{N, \text{reac}}(h_{f,i} + h_{sal} - h_{ref})_{\text{reac}}$$

$$E_{sal} = Q_{sal} + W_{sal} + \text{suma}_{N, \text{prod}}(h_{f,i} + h_{sal} - h_{ref})_{\text{prod}}$$

En esta caso el trabajo y calor de entrada son cero, además, el trabajo de salida también es igual a cero.

Obteniendo lo siguiente,

$$Q_{sal} = \text{suma}_{N, \text{reac}}(h_{f,i} + h_{sal} - h_{ref})_{\text{reac}} - \text{suma}_{N, \text{prod}}(h_{f,i} + h_{sal} - h_{ref})_{\text{prod}}$$

Las entalpías de entrada y de referencia de los reactivos son iguales, ya que los reactivos ingresan a temperatura ambiente la cual es la temperatura de referencia, por ello en los cálculos se anulan

$$\text{suma}_{\text{reac}} = N_{\text{CH}_4} \cdot h_{f\text{CH}_4} + N_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot h_{f\text{C}_2\text{H}_6} + N_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot h_{f\text{C}_3\text{H}_8} + N_{\text{CO}_2} \cdot h_{f\text{CO}_2}$$

Las entalpías de salida de los productos se calculan a la temperatura de salida de la cámara de combustión, @2249 °K

$$h_{\text{salCO}_2} = 115923,1 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$h_{\text{salH}_2\text{O}} = 95509,56 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$h_{\text{salN}_2} = 73819,68 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$\text{suma}_{\text{prod}} = N_{\text{proCO}_2} \cdot (h_{f\text{CO}_2} + h_{\text{salCO}_2} - h_{\text{refCO}_2}) + N_{\text{proH}_2\text{O}} \cdot (h_{f\text{H}_2\text{O}} + h_{\text{salH}_2\text{O}} - h_{\text{refH}_2\text{O}}) + N_{\text{proN}_2} \cdot (h_{f\text{N}_2} + h_{\text{salN}_2} - h_{\text{refN}_2})$$

$$Q_{sal} = \text{suma}_{\text{reac}} - \text{suma}_{\text{prod}}$$

Calculo de energía de activación de la celulosa. Según la literatura la celulosa necesita una energía para degradarse igual a 130000 [J/mol].

En este proyecto se usó una muestra de 20 [mg] de celulosa, para la cual se obtienen los siguientes datos

$$N_{\text{cel}} = \frac{m_{\text{cel}}}{M_{\text{mcel}}}$$

$$m_{\text{cel}} = 0,02 \quad [\text{g}]$$

$$M_{\text{mcel}} = 162,14 \quad [\text{g/mol}]$$

$$Q_{\text{act}} = 130000$$

$$Q_{\text{cel}} = Q_{\text{act}} \cdot N_{\text{cel}}$$

$B = 0,01626$ [mol]	$C = 0,02941$ [mol]	$D = 0,115$ [mol]	Densidad <sub>pro</sub> = 4,503 [Kg/m <sup>3</sup> ]
$h_{fC_2H_6} = -84680$ [kJ/kmol]	$h_{fC_3H_8} = -103850$ [kJ/kmol]	$h_{fCH_4} = -74850$ [kJ/kmol]	$h_{fCO_2} = -393520$ [kJ/kmol]
$h_{fH_2O} = -241820$ [kJ/kmol]	$h_{fN_2} = 0$ [kJ/kmol]	$H_{pro} = -1220$ [J]	$H_{reac} = -1220$ [J]
$h_{refCO_2} = 9364$ [kJ/kmol]	$h_{refH_2O} = 9904$ [kJ/kmol]	$h_{refN_2} = 8609$ [kJ/kmol]	$h_{sal} = 85400$ [kJ/kmol]
$h_{salCO_2} = 115923$ [kJ/kmol]	$h_{salH_2O} = 95510$ [kJ/kmol]	$h_{salN_2} = 73820$ [kJ/kmol]	$m_{cel} = 0,02$ [g]
$M_{mcel} = 162,1$ [g/mol]	$M_{mCO_2} = 44$ [g/mol]	$M_{mH_2O} = 18$ [g/mol]	$M_{mN_2} = 28$ [g/mol]
$M_{mprod} = 90$ [g/mol]	$N_{C_2H_6} = 0,001655$ [mol]	$N_{C_3H_8} = 0,0002737$ [mol]	$N_{cel} = 0,0001234$ [mol]
$N_{CH_4} = 0,01167$ [mol]	$N_{CO_2} = 0,0004503$ [mol]	$N_{fuel} = 0,01426$ [mol]	$N_{proCO_2} = 0,01626$ [mol]
$N_{proH_2O} = 0,02941$ [mol]	$N_{proN_2} = 0,115$ [mol]	$P_{atm} = 101,3$ [kPa]	$P_{critC_2H_6} = 4,48$
$P_{critC_3H_8} = 4,26$	$P_{critCH_4} = 4,64$	$P_{critCO_2} = 7,39$	$P_m = 0,1219$
$P_{maxcombust} = 935,5$ [kPa]	$P_{rC_2H_6} = 0,02721$	$P_{rC_3H_8} = 0,02862$	$P_{rCH_4} = 0,02627$
$P_{rCO_2} = 0,0165$	$Q_{act} = 130000$	$Q_{cel} = 16,04$ [J]	$Q_{efectivo} = 350,1$ [J]
$Q_{sal} = 538,6$ [J]	$R_u = 8,314$ [(KPa*m <sup>3</sup> )/(Kmol*K)]	suma <sub>prod</sub> = -1758 [J]	suma <sub>reac</sub> = -1220 [J]
$T_{critC_2H_6} = 305,5$	$T_{critC_3H_8} = 370$	$T_{critCH_4} = 191,1$	$T_{critCO_2} = 304,2$
$T_m = 298,2$	$T_{rC_2H_6} = 0,9759$	$T_{rC_3H_8} = 0,8058$	$T_{rCH_4} = 1,56$
$T_{rCO_2} = 0,9801$	$T_{sal} = 2249$ [°K]	$Vel_{pro} = 19,25$ [m/s]	$V_{C_2H_6} = 33,08$ [cm <sup>3</sup> ]
$V_{C_3H_8} = 5,47$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_{CH_4} = 233,3$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_{CO_2} = 9$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_m = 285$ [cm <sup>3</sup> ]
$X = 0,03051$ [mol]	$Y_{C_2H_6} = 0,1161$	$Y_{C_3H_8} = 0,01919$	$Y_{CH_4} = 0,8186$
$Y_{CO_2} = 0,03158$	$Z_{C_2H_6} = 0,98$	$Z_{C_3H_8} = 0,98$	$Z_{CH_4} = 1$
$Z_{CO_2} = 1$	$Z_m = 0,9827$		

## Apéndice D. Guía de laboratorio.



### PIROLISIS ULTRARRAPIDA DE BIOMASA

#### Objetivo general

Recrear el proceso de pirolisis ultrarrápida de biomasa mediante la combustión de gas natural en un tubo de choque.

#### Objetivos específicos

- Comprobar el principio de pirolisis ultrarrápida de la celulosa.
- Analizar los procesos químicos que ocurren al interior del tubo de choque.
- Validar la práctica de laboratorio con el modelo matemático.

#### Materiales

- Aluminio
- Algodón
- Gramera
- Bomba de aire
- Teflón
- Kit de herramientas (llave de 1/2 in, tijeras)



**Tratamiento de datos**

PRACTICA DE LABORATORIO			
PIROLISIS ULTRARRAPIDA DE BIOMASA			
Nombre:			
Fecha:		Grupo:	
Observaciones:			
Gas [PSI]	Aire [PSI]	Muestra [mg]	% Porcentaje degradado