

MODELAMIENTO DE GASIFICADOR PARA BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR

AUTORES

JONATHAN EDUARDO ROJAS DUGARTE

GERSON DAMIAN DELGADO SIERRA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2021

# MODELAMIENTO DE GASIFICADOR PARA BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR

## AUTORES

JONATHAN EDUARDO ROJAS DUGARTE

ID: 000 298367

GERSON DAMIAN DELGADO SIERRA

ID: 000230309

## DIRECTOR

MSC. SERGIO ANDRÉS GÓMEZ SUAREZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2021

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	6
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	7
LISTA DE ANEXOS .....	8
SIMBOLOGÍA .....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	13
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	14
4. ANTECEDENTES .....	15
5. OBJETIVOS .....	18
5.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	18
6. ALCANCE.....	19
7. MARCO TEÓRICO.....	20
7.1. GASIFICACIÓN .....	20
7.2. CLASIFICACIÓN DE LOS GASIFICADORES .....	20
7.2.1. EN FUNCIÓN DEL AGENTE GASIFICANTE .....	20
7.2.2. FUNCIÓN DE LA FUENTE PROVENIENTE DEL CALOR REQUERIDO PARA REALIZAR LA COMBUSTIÓN .....	21
7.2.3. EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DE TRABAJO DE LOS GASIFICADORES .....	21
7.2.4. EN FUNCIÓN DEL DISEÑO QUE SE LE DA AL REACTOR, EL CUAL SE ENCUENTRA RELACIONADO CON EL DESPLAZAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA A GASIFICAR Y CON EL TIPO DE AGENTE GASIFICANTE .....	22
7.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE CADA TIPO DE GASIFICADOR	23
7.4. ¿QUÉ ES EL BIOGÁS?.....	24
7.5. PROCESO DE GASIFICACIÓN .....	24
7.5.1. SECADO .....	25
7.5.2. PIROLISIS.....	25
7.5.3. OXIDACIÓN .....	25
7.5.4. REDUCCIÓN .....	25
7.6. REACCIONES BÁSICAS DEL PROCESO CONOCIDAS EN LA GASIFICACIÓN .....	25
7.7. ¿QUÉ ES EL GAS DE SÍNTESIS?.....	26

7.8.	FACTORES ESCENCIALES EN LA GASIFICACION.....	27
7.8.1.	TIPOS DE FACTORES A CONSIDERAR DURANTE EL PROCESO TERMOQUÍMICO DE LA GASIFICACION:.....	27
7.9.	ANÁLISIS QUÍMICO DEL GASIFICADOR.....	28
7.9.1.	ZONAS GENERADAS EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	28
7.10.	REACCIONES QUÍMICAS .....	31
7.10.1.	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL AIRE COMO AGENTE OXIDANTE.....	31
7.10.2.	COMBUSTIÓN COMPLETA O LA COMBUSTIÓN INCOMPLETA.....	32
7.10.3.	ENTALPÍA .....	34
7.10.4.	PODER CALORÍFICO .....	35
7.11.	REACCIÓN ESTEQUIOMETRIA PARA LA FORMULA EMPÍRICA QUE DEFINE AL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR .....	37
7.11.1.	COMBUSTIÓN DEL BAGAZO .....	37
8.	METODOLOGÍA.....	40
9.	CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZUCAR.....	41
10.	ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.....	45
10.1.	ÁRBOL DE OBJETIVOS .....	45
10.2.	DIAGRAMA DE FUNCIONES .....	48
10.2.1.	ETAPAS DEL PROCESO PARA UN GASIFICADOR TIPO DOWN DRAFT .....	48
10.3.	LISTA DE REQUERIMIENTOS.....	49
10.4.	PARÁMETROS CLAVES EN DISTINTOS PROYECTOS.....	50
11.	SELECCIÓN DEL TIPO DE GASIFICADOR MÁS APROPIADO PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR... ..	52
12.	DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MÁQUINA.....	56
12.1.	POSIBLES SOLUCIONES MORFOLÓGICAS DE LA MÁQUINA GASIFICADORA PARA EL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZUCAR .....	56
12.2.	SELECCIÓN DE LA MEJOR OPCIÓN.....	57
12.2.1.	PROPUESTA 1.....	57
12.2.2.	PROPUESTA 2.....	59
12.2.3.	PROPUESTA 3.....	61

12.3. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE ACUERDO A LOS FACTORES DE DISEÑO .....	62
13. CÁLCULOS Y DISEÑO DE DETALLE DEL GASIFICADOR PARA BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR .....	65
13.1. DIMENSIONES DEL GASIFICADOR.....	68
13.2. CÁLCULOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	74
14. PASO A PASO DEL DISEÑO DE UN GASIFICADOR .....	81
15. PLANOS A DETALLE.....	82
16. ESQUEMA Y DEFINICIONES EN LA MANUFACTURA DE COMPONENTES PARA GASIFICADOR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR .....	84
16.1. DEFINICIÓN DE OPERACIONES.....	86
16.2. ORDEN LÓGICO DE ENSAMBLE .....	87
17. ANÁLISIS DE COSTOS .....	89
18. CONCLUSIONES.....	92
19. RECOMENDACIONES .....	94
20. REFERENCIAS .....	95
21. ANEXOS.....	101

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características de los diferentes gasificadores .....	23
Tabla 2 Reacciones del proceso de gasificación.....	25
Tabla 3 Características fisicoquímicas del bagazo de caña de azúcar .....	43
Tabla 4 Componentes químicos del bagazo de caña de azúcar.....	43
Tabla 5 Requerimientos para el diseño de máquina gasificadora para bagazo de caña de azúcar .....	50
Tabla 6 Parámetros claves en distintos proyecto .....	51
Tabla 7 Clasificación de gasificadores parte 1 .....	53
Tabla 8 Clasificación de gasificadores parte 2 .....	54
Tabla 9 Alternativas para los diferentes subsistemas de la máquina gasificadora para el bagazo de la caña de azúcar.....	57
Tabla 10 Selección de la mejor opción para cada subsistema de la propuesta 1 .	58
Tabla 11 Selección de la mejor opción para cada subsistema de la propuesta 2 .	60
Tabla 12 Selección de la mejor opción para cada subsistema de la propuesta 3 .	61
Tabla 13 Correlación de factores de riesgo con sus variables y puntajes.....	63
Tabla 14 Correlación de factores de riesgo con sus variables .....	63
Tabla 15 Eficiencia de un gasificador de lecho fijo para diferentes biomasas .....	65
Tabla 16 Valores del factor de convección para distintos fluidos .....	78
Tabla 17 Cotización al por menor hecha por estudiantes .....	89

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Zonas generadas en el proceso de gasificación .....	29
Ilustración 2 Diagrama de flujo para el balance de masa del gasificador .....	39
Ilustración 3 Metodología de desarrollo .....	40
Ilustración 4 Diagrama de objetivos .....	47
Ilustración 5 Etapas del proceso para un gasificador tipo Down draft .....	48
Ilustración 6 Diseño CAD (SOLIDWORKS) para la propuesta 1 .....	59
Ilustración 7 Diseño CAD (SOLIDWORKS) para la propuesta 2 .....	60
Ilustración 8 Diseño CAD (SOLIDWORKS) para la propuesta 3 .....	62
Ilustración 9 Altura del plano de las toberas sobre el estrechamiento del hogar, para diversos tamaños de generador .....	71
Ilustración 10 Diámetro del anillo de las toberas y apertura de éstas, en relación con el estrechamiento y el diámetro del hogar, para diversos modelos de generadores .....	72
Ilustración 11 Dimensiones de diámetro de garganta y altura del plano de toberas sobre la garganta .....	73
Ilustración 12 Corte de sección del gasificador .....	74
Ilustración 13 Dimensiones del gasificador .....	75
Ilustración 14 Sesiones o resistencias térmicas de transferencia de calor .....	76
Ilustración 15 Diagrama de resistencias térmicas .....	76
Ilustración 16 Temperatura promedio en Bucaramanga /Santander .....	79
Ilustración 17 Esquema del paso a paso en el diseño de un gasificador de bagazo de caña de azúcar .....	81
Ilustración 18 Vista isométrica del diseño del gasificador de bagazo .....	82
Ilustración 19 Vista frontal y vista lateral del diseño del gasificador de bagazo ....	83
Ilustración 20 Vista de corte y vista de transparencia de cilindros externos del diseño del gasificador de bagazo .....	83
Ilustración 21 Diagrama de operaciones de ensamble y manufactura para cuerpo exterior .....	84
Ilustración 22 Diagrama de operaciones de ensamble y manufactura para cuerpo interior .....	85
Ilustración 23 Cotización completa de empresa Influmax .....	90

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Esquema del paso a paso en el diseño de un gasificador de bagazo de caña de azúcar .....	101
Anexo 2 Diagrama de operaciones de ensamble y manufactura para cuerpo exterior .....	110
Anexo 3 Diagrama de operaciones de ensamble y manufactura para cuerpo interior .....	111
Anexo 4 Planos CAD de ensamble de gasificador .....	112
Anexo 5 Planos CAD de embudo de aire .....	113
Anexo 6 Planos CAD de tapa de tolva .....	114
Anexo 7 Planos CAD de tolva piramidal .....	115
Anexo 8 Planos CAD de cono truncado .....	116
Anexo 9 Planos CAD de cilindro de secado .....	117
Anexo 10 Planos CAD de cilindro inferior externo.....	118
Anexo 11 Planos CAD de cilindro de combustión .....	119
Anexo 12 Planos CAD de cilindro de depósito-cono de pirolisis .....	120
Anexo 13 Planos CAD de cilindro superior externo.....	121
Anexo 14 Planos CAD de soporte cilindros exteriores .....	122
Anexo 15 Planos CAD de barredora giratoria .....	123
Anexo 16 Planos CAD de anillo de intercambio de aire .....	124
Anexo 17 Cotización completa de empresa Influmax parte 1 .....	125
Anexo 18 Cotización completa de empresa Influmax parte 2 .....	126

## SIMBOLOGÍA

$AF$  = relación aire combustible

$m_{aire}$  = masa de aire

$m_{combustible}$  = masa de combustible

$\varepsilon$  = número de moles de oxígeno teórico por mol de combustible

$\alpha$  = indica si la mezcla combustible aire es rica, pobre o estequiométrica.

$\Delta E_{sistema}$  = cambio de energía del sistema

$\Delta E_{quimica}$  = cambio de energía química

$h_p$  = entalpía de los productos en base molar

$h_r$  = entalpía de los reactivos en base molar

$H_{productos}$  = entalpía de los productos en base masica

$H_{reactivos}$  = entalpía de los reactivos en base masica

$N_{biomasa}$  = moles de biomasa

$HHV_{DAF}$  = poder calorífico superior en base molar

$LHV$  = poder calorífico inferior en base molar

$N$  = representa las moles de productos o reactivos

$N_r$  = moles de los reactivos

$N_p$  = moles de los productos

$\eta_{gas}$  = eficiencia del gas a partir del proceso de gasificación

$\dot{Q}_{in}$  = calor suministrado o calor que entra en la reacción

$\bar{M}$  = masa atómica de los elementos y masa molecular de los compuestos

$M$  = representa la masa de cada elemento presente

$\dot{V}$  = flujo volumétrico

$P$  = potencia

$\eta_{termica}$  = eficiencia térmica

$\dot{M}$  = flujo másico

$A$  = área

$R$  = radio

$D$  = diámetro

$\rho$  = densidad

$V$  = volumen

$h$  = altura

$\dot{Q}$  = calor

$R_{termicas}$  = resistencias térmicas

$T$  = temperatura

$k$  = conductividad térmica

$e_{aislante}$  = espesor aislante

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

<b>TITULO:</b>	MODELAMIENTO DE GASIFICADOR PARA BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR
<b>AUTOR(ES):</b>	JONATHAN EDUARDO ROJAS DUGARTE GERSON DAMIAN DELGADO SIERRA
<b>PROGRAMA:</b>	Facultad de Ingeniería Mecánica
<b>DIRECTOR(A):</b>	MSC. SERGIO ANDRÉS GÓMEZ SUÁREZ

### RESUMEN

Actualmente las máquinas gasificadoras de biomasa se han convertido en una alternativa importante para la producción de biogás y en su utilización en diferentes áreas e industrias, ya que estas máquinas hacen buen conjunto tanto en sus bajos costos de fabricación y operación, como con su buen desempeño, producción y contribución con la problemática de contaminación medio ambiental por la quema e incendios de desechos orgánicos presente en estos tiempos. Su funcionamiento consiste en la utilización del bagazo de la caña de azúcar como combustible y el aire como agente gasificante, para así poder llevar a cabo el proceso de combustión dentro del gasificador, partiendo de los cuatro principios básicos en el proceso de gasificación como lo es el "Secado" donde se genera la extracción de humedad presente en el material, pasando así a realizar el proceso de "pirólisis" elevando la temperatura del material para empezar a generar el vapor requerido, pasando a las etapas de "oxidación" y "reducción" donde se lleva a cabo cierta purificación del gas, dejándolo con un bajo contenido de impurezas y alquitranes, permitiendo obtener un gas de síntesis ideal para cualquier tipo de aplicación. El tipo de gasificador fue seleccionado basado en ciertos criterios, los cuales satisfacen tanto a la máquina, como al fabricante, al usuario y al lugar de operación de la misma. La máquina fue diseñada con el objetivo de implementarse en un espacio de investigación estudiantil, gracias a su confiabilidad, seguridad y aptos dimensionamientos, para poder cumplir y satisfacer las distintas necesidades y expectativas tanto de docentes como de estudiantes de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

### PALABRAS CLAVE:

Gasificador, biomasa, bagazo, biogás, combustible, agente gasificante, gasificación, temperatura, vapor.

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** GASIFIER MODELING FOR SUGAR CANE BAGSUE

**AUTHOR(S):** JONATHAN EDUARDO ROJAS DUGARTE  
GERSON DAMIAN DELGADO SIERRA

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** MSC. SERGIO ANDRÉS GÓMEZ SUÁREZ

### ABSTRACT

Currently, biomass gasification machines have become an important alternative for the production of biogas and its use in different areas and industries, since these machines make a good combination both in their low manufacturing and operating costs, as well as their good performance., production and contribution to the problem of environmental pollution by burning and fires of organic waste present in these times. Its operation consists of the use of sugarcane bagasse as fuel and air as a gasifying agent, in order to carry out the combustion process inside the gasifier, starting from the four basic principles in the gasification process, such as the "Drying" where the extraction of moisture present in the material is generated, thus going on to carry out the process of "pyrolysis" raising the temperature of the material to start generating the required steam, passing to the stages of "oxidation" and "reduction" Where a certain purification of the gas is carried out, leaving it with a low content of impurities and tars, allowing to obtain an ideal synthesis gas for any type of application. The type of gasifier was selected based on certain criteria, which satisfy both the machine, the manufacturer, the user and its place of operation. The machine was designed with the aim of being implemented in a student research space, thanks to its reliability, security and suitable dimensions, in order to meet and satisfy the different needs and expectations of both teachers and students of the BOLIVARIANA PONTIFICAL UNIVERSITY.

### KEYWORDS:

Gasifier, biomass, bagasse, biogas, fuel, gasifying agent, gasification, temperature, steam.

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## **1. INTRODUCCIÓN**

Debido a la contaminación ambiental que se vive en esta época por el uso de combustibles fósiles y la disminución de las reservas de energías no renovables de las que estos provienen, se ha venido desarrollando en el mundo la aplicación de nuevas técnicas para aprovechar el uso de las energías renovables, una de estas técnicas es la gasificación que consiste en aprovechar la Biomasa como fuente energética para obtener un biocombustible.

Este proyecto se enfoca en aprovechar la biomasa de origen agrícola producida en los sectores azucareros del país Colombia, como lo es el bagazo de la caña de azúcar, por lo que se realizó el diseño de un gasificador de biomasa para la obtención de biogás el cual puede ser aprovechado de múltiples maneras, tales como: combustible para motores de combustión interna, como fuente de calor o poderlo transformar en energía eléctrica, etc.

El diseño del gasificador es de producción de biogás a baja escala con fines académicos para que a futuro pueda ser construido para uso práctico de docentes y estudiantes en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sector rural en Colombia, desde siempre ha sido un sector bastante limitado en el acceso al gas natural, por este motivo, han tenido que recurrir durante años a procesos convencionales como la quema de leña, el uso de carbón y entre otros procesos, esto lo han tenido que realizar para poder suplir la necesidad de gas natural, necesaria para poder subsistir. [1]

Actualmente distintas técnicas y métodos para la obtención de biogás son aplicadas en la industria, entre ellas se encuentra el método de gasificación de biomasa para la obtención de gas metano. En Colombia, el proceso de gasificación a través de biomasa es poco conocido, esta nueva implementación en la obtención de biogás es bastante llamativo por sus bajos costos de producción, ya que Colombia es un país rico en la producción de biomasa, lo cual es de fácil acceso para las personas de los sectores rurales, ya que siempre van a haber desechos orgánicos, los cuales son los principalmente utilizados en el proceso de gasificación para la obtención de biogás. [2]

Ya que en Colombia este proceso es poco conocido, la Facultad de Ingeniería Mecánica de la universidad, con mira a la agroindustria, tiene interés en implementar esta nueva metodología.

Por lo anterior, se da paso al DISEÑO DE UNA MÁQUINA GASIFICADORA A TRAVES DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZUCAR, que permita a los estudiantes en un futuro fabricarla y así enriquecer y afianzar sus conocimientos en esta área en el proceso de gasificación y desechos orgánicos.

### 3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la problemática que se presenta actualmente en Colombia en muchos de los sectores de la agroindustria por motivos de contaminación y producidos por la quema de desechos orgánicos para poder reducir espacio y continuar depositando allí esos residuos, se incentiva el diseño de una máquina de gasificación de biomasa, para así, dar una alternativa de aprovechamiento a los desechos obtenidos en las fincas de producción panelera, evitando la contaminación y aglomeración de estos residuos, aprovechándolos como una alternativa para contribuir al medio ambiente y a su vez convirtiéndolos en una fuente de energía renovable como lo es el gas metano y así mismo en las fincas y zonas rurales, las personas puedan beneficiarse con el biogás obtenido y darle una utilidad de gran importancia, beneficio y necesidad para estas personas.

De igual manera la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, seccional Bucaramanga, podrá contar con un diseño fabricable a futuro, con la intención de que el estudiante UPB tenga acceso y conocimientos más amplios en el ámbito de los procesos de gasificación de biomasa, la cual es un área importante en el desarrollo profesional del estudiante, ya que de esta manera, gracias al diseño a realizar, la región pueda acceder y contar con este beneficio de una manera más fácil y rápida a esta técnica llamada “Gasificación de biomasa”, promoviendo el uso y aprovechamiento de los desechos de la caña panelera en la región, en el caso en que se fabrique la máquina.

Dicho lo anterior, el estudiante aplicará todos los conceptos y conocimientos aprendidos a lo largo de la formación como profesional, teniendo la capacidad de desarrollar y llevar a cabo este proyecto, permitiéndole de esta manera al estudiante, obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico.

#### 4. ANTECEDENTES

- Diego Enrique Galán Borrás (2012), en su trabajo de tesis “GASIFICACIÓN DE BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ENERGÍA. expone resultados, realizados en un gasificador de lecho fijo, haciendo uso como oxidante una mezcla de aire y vapor con el objetivo de producir gss con buen contenido de H<sub>2</sub>. [3]
- William David Navarro Abril (2016), en su proyecto de tesis “DISEÑO DE UN GASIFICADOR DUAL PARA BIOMASA RESIDUAL AGROPECUARIA A NIVEL LABORATORIO”, seleccionaron la biomasa residual en Cundinamarca; también describió los principales gasificadores empleados para obtener gas de síntesis con la finalidad de diseñar un gasificador. [4]
- David Francisco Flórez Ramos (2016), en su proyecto de tesis para maestría “OBTENCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE LA GASIFICACIÓN DE CUESCO DE PALMA DE ACEITE PELETIZADO”, realizó la investigación para ver la rentabilidad de producir gas a través de la gasificación de Pellets de cuesco de Palma de Aceite en un gasificador de lecho fijo de corrientes paralelas. [5]
- Ingrid Lopes Motta, Nahieh Toscano Miranda, Rubens Maciel Filho y Maria Regina Wolf Maciel (2019), en su trabajo de investigación “SUGARCANE BAGASSE GASIFICATION: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE DIFERENTES PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO, MEDIOS FLUIDIZANTES Y TIPOS DE GASIFICADORES ”, por medio del software de simulación Aspen Plus para la obtención de mezclas de gas de síntesis para así posteriormente acondicionarlo en procesos de síntesis.[6]
- Muhammad Awais, Wei Li, Anjum Munir, Muhammad Mubashar Omar y Muhammad Ajmal (2020), mediante su trabajo de investigación experimental “EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DOWNDRAFT BIOMASS

GASIFIER FED BY SUGARCANE BAGASSE AND COCONUT SHELLS”, diseñaron un gasificador de biomasa con corriente descendiente utilizando la bagazo de caña de azúcar y cáscaras de coco. [7]

- Abanti Sahoo y Deo Karan Ram (2015), en su artículo “GASIFIER PERFORMANCE AND ENERGY ANALYSIS FOR FLUIDIZED BED GASIFICATION OF SUGARCANE BAGASSE”, llevaron a cabo experimentos para determinar los efectos de diferentes parámetros del sistema como gasificación temperatura, relación de equivalencia, relación de vapor de biomasa y materiales del lecho que actúan como catalizadores para producción de hidrógeno a base del bagazo de caña de azúcar. [8]
- Prakash Parthasarathy y Sheeba Narayanan (2015), en su trabajo de investigación experimental “EFFECT OF COMBINED SLOW PYROLYSIS AND STEAM GASIFICATION OF SUGARCANE BAGASSE ON HYDROGEN GENERATION” mejoraron la generación de H<sub>2</sub> a partir del bagazo de caña de azúcar en gasificación a vapor, mediante la incorporación de la técnica de pirólisis lenta. [9]
- Anthony Anukam, Sampson Mamphweli, Prashant Reddy, Edson Meyer, Omobola Okoh (2016), en su trabajo de investigación “PRE-PROCESSING OF SUGARCANE BAGASSE FOR GASIFICATION IN A DOWNDRAFT BIOMASS GASIFIER SYSTEM: A COMPREHENSIVE REVIEW”, Proporcionan una revisión integral sobre el procesamiento del bagazo para gasificación y las opciones de tecnología de gasificación para su conversión en energía, con especial énfasis en la tecnología de gasificación de corriente descendente. [10]
- Dr. René Lesme-Jaén, Dr. Luis Garcia-Faure, Dr. Luis Oliva-Ruiz, Dr. Juan Pajarín-Rodríguez, Ing. Dennis Revilla-Suarez (2016), en su trabajo “GASIFICACIÓN DE BIOMASA PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA”, presentan

el análisis de eficiencia térmica en la instalación de secotres de gasificación, enfocados en generar electricidad a base de residuos de la industria forestal.[11]

- Luis Ernesto Arteaga-Pérez, Yannay Casas-Ledón, Jagni Cabrera-Hernandez, Lizet Rodríguez Machín (2014), en su trabajo “GASIFICACIÓN DE BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ENERGÍA”. Es un informe actualizado sobre lo que es gasificar biomasa utilizando nuevas tecnologías. [12]
- Chong Obando, Héctor Wellington (2018), en su proyecto de tesis “ANÁLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO UN GASIFICADOR DE BIOMASA”, se encargan de analizar la propuesta de obtener energía eléctrica por medio de la gasificación de biomasa, el cuál tuvo como objetivo principal la utilización de un gas denominado syngas. [13]

## 5. OBJETIVOS

### 5.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un gasificador a base del bagazo de la caña de azúcar por medio de cálculos mecánicos, de masa y térmicos para la obtención de un biogás aprovechable.

### 5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Establecer las características fisicoquímicas del bagazo de la caña de azúcar más importantes para el proceso de gasificación.

**Resultado:** Las características fisicoquímicas más relevantes para el proceso de gasificación del bagazo de la caña de azúcar.

**Indicador:** Fuentes bibliográficas confiables, bases de datos, artículo de investigación.

Seleccionar el tipo de gasificador más apropiado para el proceso de gasificación del bagazo de la caña de azúcar.

**Resultado:** Elección del gasificador más adecuado para el proceso de gasificación del bagazo de la caña de azúcar.

**Indicador:** Evaluar mínimo tres tipos de gasificadores para la elección del más apropiado.

Diseñar a detalle de los diferentes componentes estructurales y térmicos del gasificador, a través de cálculos teóricos y software de diseño de ingeniería.

**Resultado:** Planos de detalle, materiales y descripción de las etapas de fabricación de los componentes del gasificador.

**Indicador:** Planos en SolidWorks, definición detallada de los planos de fabricación.

Estimar los costos que genera la fabricación del gasificador.

**Resultado:** El costo del gasificador.

**Indicador:** Utilizar un modelo de costos adecuado.

## **6. ALCANCE**

Se ejecutó el diseño de una máquina de gasificación para el bagazo de la caña de azúcar, con el fin de ofrecerla a la comunidad UPB, facultad de Ingeniería Mecánica seccional Bucaramanga, y así mismo pueda ser construida en futuros proyectos que permitan llegar a implementarse en las zonas rurales, dedicadas a la extracción del azúcar de la caña.

Como resultado final se obtuvo el diseño estructurado y detallado de la máquina de gasificación con sus respectivas características, modelado y simulación en software Solidworks con sus respectivas etapas de fabricación, planos y análisis térmicos requeridos en la máquina gasificadora.

## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. GASIFICACIÓN**

El proceso de gasificación se da mediante un gasificador, donde se lleva a cabo la transformación de cierta materia prima que pasa de un estado sólido o líquido y posteriormente se convierte en un gas a través de un poder calorífico, el cual es aplicado por medio de calor con un agente gasificante y con niveles bajo de oxígeno restringido.

Existen diversos tipos de materia prima empleados en los procesos de gasificación, entre los cuales pueden ser de tipo lignocelulósico mientras cuenten con un porcentaje de humedad inferior al 39-40%, residuos forestales y agrícolas. La estructura química del gas resultante, cambia en función del agente gasificante [14].

### **7.2. CLASIFICACIÓN DE LOS GASIFICADORES**

Los gasificadores pueden clasificarse:

#### **7.2.1. En función del agente gasificante [14]**

- **Gasificador de aire**

En este tipo de gasificador se inicia introduciendo al gasificador el aire caliente, lo que nos lleva a producir un gas pobre, el cual va a contener un poder calorífico inferior o igual al 25% que el de un gas natural.

- **Gasificador de oxígeno**

El gasificador de oxígeno contiene un gas de síntesis de más alta calidad que el producido en el caso anterior, ya que no se produce una dilución ya que hay presencia de nitrógeno contenido en el aire, en donde su poder calorífico va a estar contenido entre un 25 – 40% que el de una gas natural.

- **Gasificador utilizando vapor de agua**

En este gasificador el gas producido contiene un alto contenido de hidrogeno y monóxido de carbono, el cual tiene como aplicación o utilidad principal la síntesis de compuestos tales como: metanol y amoniaco, etc.

- **Gasificador empleando hidrogeno**

En la implementación de hidrogeno como agente gasificante, hay un alto poder calorífico del gas obtenido, el cual se puede ejecutar en más aplicaciones que el mismo gas natural.

### **7.2.2. Función de la fuente proveniente del calor requerido para realizar la combustión [14]**

- **Gasificador de tipo directo**

Este gasificador aprovecha el calor producido por la combustión producida en el interior del gasificador por medio de la biomasa que se va a gasificar.

- **Gasificador de tipo indirecto**

En este tipo de gasificador el calor requerido para combustionar es proveniente de otra fuente de energía, el cual podría ser por medio de un intercambiador de calor o incluso a través de la separación de zonas de combustión y gasificación.

### **7.2.3. En función de la presión de trabajo de los gasificadores [14]**

- **Gasificadores tipo atmosféricos**

Este tipo de gasificador trabaja con la presión atmosférica del lugar.

- **Gasificadores de tipo presurizados**

Estos gasificadores llevan a cabo la gasificación a través de una presión establecida.

**7.2.4. En función del diseño que se le da al reactor, el cual se encuentra relacionado con el desplazamiento de la materia prima a gasificar y con el tipo de agente gasificante [14]**

- **Gasificador de tipo lecho fijo o móvil**

Dicha categoría de gasificadores tiene una característica particular, ya que contienen lecho fijo en el cual la biomasa se desplaza suavemente de manera descendente por efecto de gravedad, al mismo tiempo en que se va realizando el proceso de gasificación del material.

Generalmente la potencia de instalación presente en este tipo de máquinas va desde 1 – 4 MW, está es la gran diferencia entre los gasificadores de configuración “Updraft”, Down draft y corriente cruzada”, como se explica a continuación:

- **Updraft (contracorriente):** Tipo de gasificador más sencillo, ya que el agente utilizado como gasificante se agrega por la parte baja del gasificador y la biomasa por la de encimar, este baja por efecto de gravedad, por lo cual se llevan a cabo de un proceso de secado, pasando así por una fase de pirolisis y otra de gasificación para así llegar a la etapa de oxidación del gas.
- **Down draft (corrientes paralelas):** Este es el tipo de gasificador más común en el cual tanto la biomasa o material combustible como el agente gasificante son alimentados por la parte superior del gasificador, en donde las partículas del material introducido, pasan por diferentes etapas del proceso de gasificación como: Secado, Pirolisis, Oxidación y Reducción del gas obtenido con un bajo contenido de alquitrán y el char depositado en el interior del gasificador.
- **Gasificador de tipo lecho fluidizado**

Estos gasificadores tienen una temperatura uniforme entre 700 – 900°C en todo el lecho.

Por otra parte, los gasificadores de tipo burbujeante y tipo circulante, tiene aplicaciones para instalaciones de potencias entre (0.5 – 10 MW) y (superiores a 5 MW) respectivamente. A continuación, se presentan cada uno de estos tipos de gasificadores:

- **Tipo burbujeante:** Los gasificadores en esta configuración mantienen bajas velocidades de aire en operación. Su característica principal es que los sólidos en su mayoría permanecen en el lecho y solo una pequeña parte cerca al 10% se deben recuperar en el ciclón.
- **Tipo circulante:** En la fluidización des este tipo de configuración, las velocidades de aire son más elevadas. Su característica principal y que más destaca es el arrastre producido del material del lecho, el cual también se puede recuperar a través de un ciclón. Este tipo de configuración maneja costos inferiores que para el caso anterior. [14]

### 7.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE CADA TIPO DE GASIFICADOR

Ahora, se muestra en la tabla 1, la relación entre capacidad y temperatura de operación de cada uno de los tipos de gasificadores.

*Tabla 1 Características de los diferentes gasificadores*

TIPO DE GASIFICADOR	CARACTERÍSTICA	
	TEMPERATURA DE OPERACIÓN °C	CAPACIDAD MÁXIMA (T/H)
LECHO FIJO		
DOWN DRAFT	100	0.5
CROSS DRAFT	900	1
UPDRAFT	1000	10
LECHO FLUIDIZADO		
LECHO FLUJO DOBLE	800	10
LECHO FLUJO CIRCULANTE	850	20
LECHO FLUJO BURBUJEANTE	1000	20
FLUJO DE ARRASTRE	1200	38

*Fuente: Castells Elias, X. y Velo, E. (2012). La Gasificación (Esta monografía es un capítulo del libro TRATAMIENTO Y VALORIZACION ENERGETICA DE RESIDUO. Madrid: Ediciones Diaz de Santos. 436. BIOMASA EN EL AMBITO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES*

Biomasa, es un término tradicionalmente utilizado en el campo ecológico, empleado para demarcar la materia orgánica que está presente en un ecosistema y en el área de microbiología, utilizado para hacer referencia a la conjunto de microorganismos presentes o producidos en un cultivo microbiano.

El área de las energías renovables, dicho término se emplea con dos significados diferentes, ya que la misma palabra se aplica a la materia prima y a la energía producida con esta. El concepto de biomasa se aplica para denominar cualquier tipo de desecho orgánico o materia prima proveniente de origen biológico, extendiéndose así a productos provenientes de origen microbiano, vegetal o animal, donde se debe incluir también los materiales orgánicos provenientes de residuos de agua lodos y parte sólida de residuos orgánicos sólidos urbanos, quedando por fuera de esta clasificación los desechos como materiales sintéticos y plásticos. [16]

#### **7.4. ¿QUÉ ES EL BIOGÁS?**

La mezcla producida entre el dióxido de carbono, metano y otros compuestos producidos por un proceso denominado degeneración microbiana y compuestos de origen vegetal o animal sin presencia de aire, es lo que se conoce como Biogás. Este es el método de producción de energía más eficiente, por medio de residuos secos con porcentaje de humedad alrededor o inferior al 30%, como lo son residuos orgánicos húmedos, desperdicios de alimentos, lodos de aguas negras y estiércol. El gas finalmente obtenido conocido como metano tiene una amplia utilización en la generación eléctrica, generación de combustible y calefacción. [17]

#### **7.5. PROCESO DE GASIFICACIÓN**

En el proceso esencial de gasificación es la transformación de la biomasa en estado sólido a estado gaseoso, el cual está compuesto esencialmente de hidrógeno de monóxido de carbono a través de un proceso termo-químico. Dicho proceso se da a cabo en un recinto cerrado y sellado el cual opera a una presión inferior a la atmosférica. A continuación, se muestran cada una de las etapas que ocurren durante la gasificación

### **7.5.1. Secado**

Proceso en el que se busca evaporar el agua contenida por el material a gasificar, reduciendo así el porcentaje de humedad para poder producir la combustión requerida por el gasificador. Dicho proceso se da a una temperatura que oscila en una temperatura mayor a los 100°C. [18]

### **7.5.2. Pirolisis**

En este proceso la biomasa pasa por un proceso de descomposición térmica con ausencia de oxígeno. Existen dos tipos de pirolisis en los cuales se da la pirolisis rápida y lenta. [18]

### **7.5.3. Oxidación**

En esta etapa se debe introducir el aire al gasificador durante el proceso, a diferencia de la etapa de pirolisis, en donde el agua en fase de vapor, oxígeno y demás gases de tipo inertes son adicionados al proceso. Este proceso se da en temperaturas alrededor de los 700 – 2000°C. [18]

### **7.5.4. Reducción**

En la etapa final o etapa de reducción del gas, es la etapa del proceso donde se desencadenan numerosas reacciones químicas a temperaturas muy elevadas. [18]

## **7.6. REACCIONES BÁSICAS DEL PROCESO CONOCIDAS EN LA GASIFICACIÓN**

Durante el proceso conocido como gasificación de biomasa, se generan numerosas reacciones químicas, en las cuales se producen diferentes compuestos para originar el syngas o gas de síntesis como se observa en la siguiente tabla:

*Tabla 2 Reacciones del proceso de gasificación*

REACCIÓN	FORMULA	PROCESO	$\Delta H$ KJ/MOL
OXIDACIÓN HETEROGÉNEA	$C+O_2 \rightarrow CO_2$	COMBUSTION	393
	$C+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	COMBUSTION INCOMPLETA	110
REACCIÓN HETEROGÉNEA EN EQUILIBRIO	$C+CO_2 \rightarrow 2CO$ $C+H_2O \rightarrow CO+H_2$ $C+2H_2 \rightarrow CH_4$	BOUDUARD REACCIÓN AGUA-GAS HETEROGÉNEA GASIFICACIÓN CON HIDROGENO	+ 172 + 131 - 75
OXIDACIÓN HOMOGENEA	$2CO+O_2 \rightarrow 2CO_2$ $CO+3H_2 \rightarrow CH_4 +H_2O$ $2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O$ $CH_4 +\frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO_2+H_2O$	OXIDACIÓN DE CO METANIZACIÓN OXIDACIÓN DE HIDROGENO OXIDACIÓN DEL METANO	- 283 - 206 - 242 - 519
REACCIÓN HOMOGENEA EN EQUILIBRIO	$CO+H_2O \rightarrow CO_2$ $+H_2CH_4+H_2O \rightarrow CO+3H_2$	REACCIONES AGUA-GAS	- 41 - 206

Fuente: Antolín, G. y Oliva, D. (2003). Caracterización del Bagazo de Caña de Azúcar Mediante Análisis Térmico. Información Tecnológica, 14(4), 9196. <https://books.google.com.co/books?id=6mf1ycxrMOWC&pg=PA96&dq=poder+calorifico+b+agazo&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKewiMh5fTpNTwAhUAFVkfHeuyAo0Q6AEwAXoECAMQAg#v=onepage&q=poder%20calorifico%20bagazo&f=false>

## 7.7. ¿QUÉ ES EL GAS DE SÍNTESIS?

Syngas o también llamado gas de síntesis, es un gas obtenido por materiales carbonosos tales como: carbón, hulla, nafta, coque o biomasa. Este gas es bastante

utilizado en la producción de metanol, amoniaco y también para convertir el metanol en combustible o gasolina. [20]

## 7.8. FACTORES ESCENCIALES EN LA GASIFICACION

### 7.8.1. TIPOS DE FACTORES A CONSIDERAR DURANTE EL PROCESO TERMOQUÍMICO DE LA GASIFICACION:

- **Factores para clave para la operación**
- **Temperatura:** El aumento de esta variable contribuye a un contenido más limpio del gas producido, dejando el gas obtenido por el proceso con un contenido bajo de alquitranes. [14]
- **Presión:** A medida que se eleva o aumenta esta variable, aumenta en la misma proporción el contenido de impurezas en el gas producido.
- **Relación entre el agente gasificante y la biomasa:** En los casos en que se usa aire como medio para gasificar, se producirá dilución ya que hay presencia de nitrógeno, mientras que cuando utilizamos oxígeno, aumentarlo produce cierto beneficio ya que hay mayor formación de dióxido de carbono, pero a su vez el gas obtenido pierde calidad.
- **Factores en biomasa gasificada [14]**
- **Análisis primordial:** en el análisis elemental encontramos los contenidos principales como H, C, S, N, O. Dichos valores afectan directamente la relación que existe entre la biomasa y el agente gasificante, también, las cantidades de azufre y óxido de nitrógeno que se pueden formar en el proceso de gasificación.
- **Análisis inmediato:** En este análisis se determina la volatilidad del material, el carbono fijo y las cenizas. El desecho final de ceniza formado a lo largo del proceso determina de material que se debe retirar del gasificador, el cual debe ser el más bajo posible para que haya una óptima combustión.
- **Poder calorífico:** Esta variable determina en cierta parte la cantidad que existe de energía en el combustible.
- **Tamaño de partícula:** Este parámetro hace referencia al tiempo en que reside la biomasa dentro del gasificador y el volumen que existe del material.
- **Partículas (dureza y forma):** La fluidización puede bajar si se presenta una menor densidad, pero también puede beneficiar si se utiliza un coadyuvante.

- **Humedad:** Dicho parámetro es uno de los más importantes para poder determinar si es económicamente factible llevar a cabo la gasificación de un material.
- **Factores de diseño de un gasificador [14]**
- **Geometría del gasificador:** Este factor establece la capacidad de biomasa que puede introducirse para gasificarse.
- **Sistemas de alimentación y retiro de biomasa:** Aquí se definen los parámetros dimensionales en la salida de gases que están presentes en la transformación de la biomasa ya gasificada.
- **Sistemas de acondicionamiento y de limpieza del gas producido:** En base a la función que se le vaya a dar al gas de síntesis dependerá su limpieza. Estos parámetros se basan principalmente en la eliminación de partículas y alquitranes. [14]

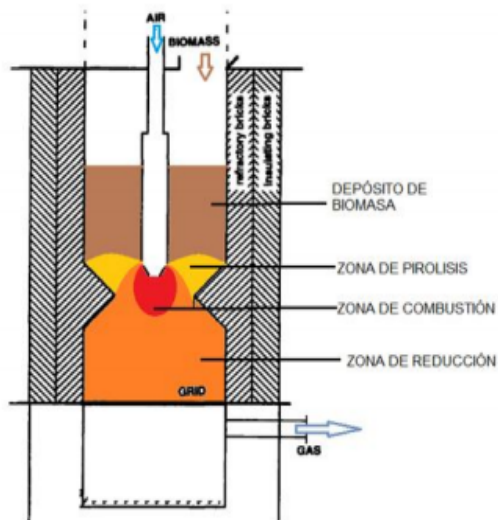
## **7.9. ANALISIS QUIMICO DEL GASIFICADOR**

Se hace una recapitulación en el diseño del gasificador para poder generar de llevar el proceso del diseño, todo el proceso se basará con respecto a las zonas donde ocurren los procesos y las características principales del gasificador seleccionado.

### **7.9.1. Zonas generadas en el proceso de gasificación.**

A continuación, se observa varias zonas presentes en el proceso de gasificación.

Ilustración 1 Zonas generadas en el proceso de gasificación



Fuente: García-Bacaicoa, P., Bilbao, R., Arauzo, J. y Salvador, L. (2013). Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial de Santander [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Archivo digital. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/147322.pdf>

- Secado:

Es el proceso en el que se da el secado de la biomasa que entra al gasificador es calentada y secada, ya que se evapora cierta cantidad de humedad que se encuentra presente en ella gracias a las reacciones de la combustión.

Cuando se produce un gas con cierto valor de poder calorífico tolerable, muchos de los sistemas de gasificación emplean en su utilización biomasa con porcentajes del 7% y 20% de humedad. Este parámetro en la biomasa se vuelve necesario aportar cierta energía para ayudar a la evaporación de las partículas de agua y esta energía se pierde ya que en este proceso no se puede recuperar. [24]

- Zona de combustión:

No hay combustión completa de biomasa que se produce en la zona más cercana a la entrada de aire, en dicha sección por efectos térmicos se producen partículas de hollín y moléculas propias de los compuestos de la combustión (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>), estos elementos luego pasarán a la fase de reducción del gas.

- Zona de reducción:

Esta fase consume baja la energía térmica y las carbonosas o residuales de la combustión reaccionan con moléculas de monóxido de carbono (CO), moléculas de agua (H<sub>2</sub>O) y partículas de hidrogeno (H<sub>2</sub>).

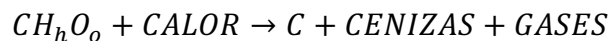
Reacciones químicas que son producto del proceso de gasificación de la biomasa (bagazo de la caña de azúcar).

El resultado del gas depende de diferentes factores, entre ellos:

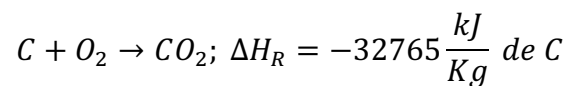
- La forma en como está compuesta la biomasa usada (de este factor deriva el poder calorífico).
- Humedad.
- Temperatura a la que se producen ciertas reacciones en el proceso de gasificación.
- La relación aire, biomasa.
- tamaño de trituración de la biomasa utilizada y su densidad.
- Tipo de gasificador.

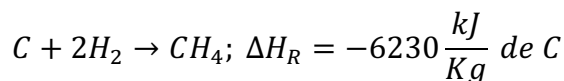
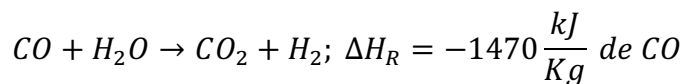
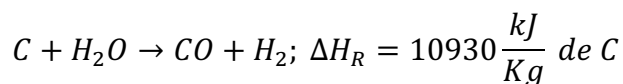
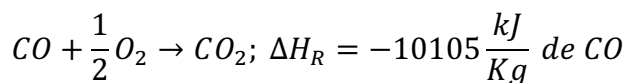
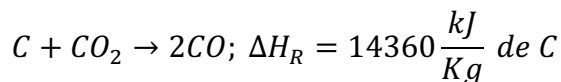
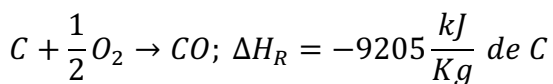
El resultado final del gas se compone de monóxido de carbono (CO), (CO<sub>2</sub>), (H<sub>2</sub>), (CH<sub>4</sub>), y también menor cantidad de ciertos hidrocarburos como: (H<sub>2</sub>O), (N<sub>2</sub>) y otros compuestos.[24]

Los procesos de gasificación se realizan por medio de procesos térmicos de degradación (pirolisis) o a través de oxidación con un agente oxidante (gasificación) para producir combustibles de tipo líquido o gaseoso, dependiendo su aplicación .[25] La pirolisis se define con la ecuación química:



Por otro lado el o los procesos que se llevan a cabo en el gasificador, se definen por las siguientes reacciones:





## 7.10. REACCIONES QUÍMICAS

Se define como combustible a los materiales que generan energía térmica una vez son expuestos a procesos al calor en los procesos de combustión. Se conoce como hidrocarburos a un conjunto de combustibles compuestos de átomos de carbono, hidrógeno, estos se conocen con la fórmula general  $C_nH_m$ .

Se conoce como combustión a la reacción química en la que un combustible se oxida y gran parte de la energía es liberada. Uno de los agentes oxidantes más conocidos o más utilizados para producir combustión es el aire, ya que este se encuentra presente en el medio ambiente y contiene oxígeno.

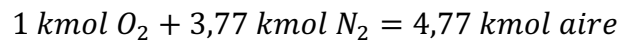
### 7.10.1. Características principales del aire como agente oxidante

Un mol de aire seco se conforma por:

- 20.9% Oxígeno
- 78.1% de nitrógeno

- 0.9% de argón
- Dióxido de carbono (bajas cantidades)
- Helio
- Neón
- Hidrógeno

Por lo tanto, se tiene:

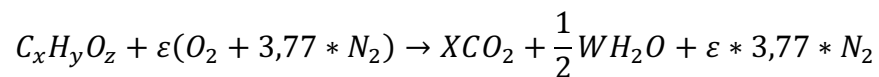


- En el proceso de combustión, es definido el nitrógeno como gas de tipo inerte, ya que no producen reacciones con otros elementos.
- Ciertos parámetros y elementos como el nitrógeno, humedad de aire y agua, pueden ser manejados como un gases inertes.

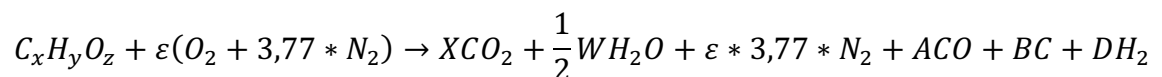
Basados en esta investigación podemos catalogar varios tipos de procesos de combustión:

### 7.10.2. Combustión completa o la combustión incompleta

Es “completa” cuando el carbono contenido en el combustible se oxida en  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $SO_2$ , como se muestra a continuación:



Se entiende como “incompleta” cuando se tiene componentes como  $C$ ,  $H_2$ ,  $CO$  o  $OH$ .



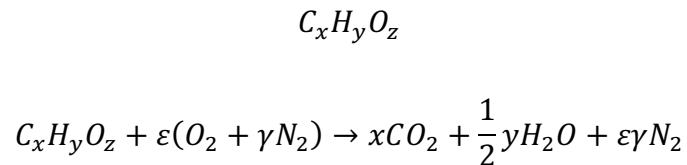
Existen diferentes causas para provocar combustión incompleta:

- Ausencia o demasiada presencia de oxígeno.
- separación (altas temperaturas).

Esta clasificación de los procesos de combustión, se da la unión que establece la cantidad de aire para generar combustión completa o incompleta.

$$AF = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}}$$

Se define la ecuación química de la combustión teórica de un mol (o un kilogramo) para un hidrocarburo con la siguiente ecuación:



En donde:

$\varepsilon = x + \frac{1}{4}y - \frac{1}{2}z$  se define como el número de moles de oxígeno teórico por mol de combustible.

$\gamma = 3,77$  Para oxidar utilizando aire

$\gamma = 0$  Empleando oxígeno puro.

Si nos fijamos que  $\varepsilon$  no viene siendo el número de moles de aire; dicho parámetro se obtiene de la suma de  $3,77\varepsilon$  moles de  $N_2$  a e moles de  $O_2$ , es decir, la cantidad en mol de aire presentes en combustión son  $4,77\varepsilon$ . [26]

La relación teórica de aire combustible para la ecuación química es:

$$AF = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}}$$

$$AF = \frac{138,3\varepsilon}{m_{combustible}}$$

En la cual la variable puesta en el numerador,  $138.3=4.77'28.97$ , se identifica como los gramos de presentes de aire por mol de oxígeno y  $m_{combustible} = 12x + y + 16z$  viene siendo la masa molar del combustible.

Por lo tanto, Si conocemos dicho análisis final del combustible, sabemos en teoría de aire combustible, la podemos hallar o calcular por:

$$AF = 1,44(8C + 24H + 3S - 3O)$$

C, H, S y O son pequeñas partes de masa de carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno para el combustible. [26]

Teniendo en cuenta lo anterior, posteriormente  $\alpha$  se halla la razón equivalente, que nos muestra si la mezcla Aire Combustible es estequiometria, pobre o rica. Se define así:

$$\alpha = \frac{\text{Aire teorico}}{\text{Aire actual}}$$

$\alpha > 1$ , la mezcla es rica en combustible,

$\alpha < 1$  la mezcla es pobre

$\alpha = 1$ , es una mezcla estequiometrica.

### 7.10.3. Entalpía

Todos aquellos procesos que presentan reacciones químicas, hay que tener presente la energía química que está directamente ligada a la creación de enlaces de moléculas. Dependiendo el origen natural de cada reacción, en estos sistemas despreciamos ciertas energías como lo son la cinética y potencial solo se acepta o se considera la química. Por lo tanto tenemos que,

$$\Delta E_{sistema} = \Delta E_{quimica}$$

En combustión, la entalpía de reacción se conoce también como entalpía pero de combustión ( $h_c$ ). Este parámetro hace referencia al calor desatado durante la combustión lineal o estable, donde se oxida por completo 1Kmol o 1Kg de combustible en un estado:

$$h_p - h_r = H_{productos} - H_{reactivos}$$

La entalpía de combustión es bastante útil cuando se hacen análisis completos a lo largo de la combustión, donde en procesos incompletos es más sencillo trabajar con ( $h_f^\circ$ ) entalpía de formación. [25]

Cuando se quiere hallar formación de entalpía presente en la biomasa, hay que considerar que existe un vínculo ente la entalpía de: reactantes y productos, la cual está definida así:

$$N_{biomasa} HHV_{DAF} = \sum N_r h_r^\circ - \sum N_p h_p^\circ$$

Se simplifica si tenemos un mol de masa, de la siguiente manera:

$$h_{biomasa}^\circ = HHV_{DAF} + xh_{CO_2}^\circ + yh_{H_2O}^\circ + zh_{S_2O}^\circ$$

#### 7.10.4. Poder Calorífico

Se define como poder calorífico de cualquier combustible, la energía generada en forma de calor y es liberada una vez el combustible se haya oxidado por completo.

Este concepto se conoce también como el valor absoluto de la entalpía de la combustión. [25]:

$$\text{poder calorífico} = |h_c| \frac{KJ}{Kmol}$$

Por lo tanto, por sus siglas en inglés el poder calorífico superior es denominado con las siglas HHV, y el inferior es denominado con las siglas LHV. [25]

$$HHV = LHV + (mhf)_{H_2O}$$

En combustión se utiliza el HHV, conocido como densidad de energía de los gases. Dicho parámetro se da:

$$HHV_{gases} = \sum_{i=1}^n (X_i * HHV_i)$$

Tenemos  $X$  y  $HHV$  como fracción molar y densidad de energía en los diferentes tipos de combustible.

### **Eficiencia de Conversión de Energía:**

Este parámetro denomina la energía totalmente recuperada en gases fríos por cada unidad de biomasa empleada en combustión. Dicha parámetro se define como:

$$\eta_{gas} = \frac{HHV_{gas}}{N_{combustible} * HHV_{combustible} + N_{vapor}(\lambda + C_p(T_e - T_a) + Q_{in})}$$

Donde:

- $N_{combustible}$ ,  $N_{vapor}$ : kmoles de biomasa y vapor proporcionados en el gasificador por cada metro cúbico de mezcla.
- $HHV_{combustible}$  : poder calorífico superior de la biomasa (kJ/kmol\*K).
- $\lambda$ : es el calor latente del vapor de agua (kJ/kmol).
- $CP$ : es el calor específico del agua (kJ/kmol\*K).

- $T_e$ : la temperatura de ebullición del agua a 1 bar.
- $T_a$ : es la temperatura del ambiente.
- $Q_{in}$ : es el calor suministrado al gasificador.

Entonces, en sistemas no adiabáticos el calor agregado por Kmol de biomasa se halla:

$$Q_{in} = \sum_k N_{k,p} * h_{k,p}(T) - \sum_k N_{k,r} * h_{k,r}(T)$$

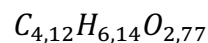
Donde:

- $N_{k,p}$ : kmoles de producto
- $N_{k,r}$ : kmoles de los reactantes
- $h_{k,p}$ : entalpía de los productos
- $h_{k,r}$ : entalpía de los reactantes
- $k$ : especies del combustible.

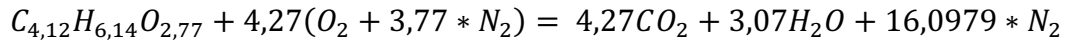
## 7.11. REACCIÓN ESTEQUIOMETRIA PARA LA FORMULA EMPÍRICA QUE DEFINE AL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

### 7.11.1. Combustión del bagazo

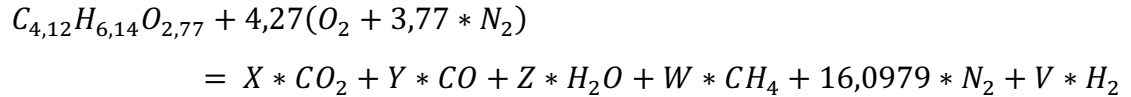
El contenido de bagazo seco en la caña se encuentra alrededor del 17 %, por lo tanto el bagazo que se quema viene siendo de 101.50 ton / día. Con la composición elemental del bagazo seco dada en la Sección 2 (Mesa-Orama & González-Penichet, 2003), se obtiene la siguiente fórmula empírica: [27]



La siguiente reacción muestra la combustión completa del bagazo:



Pero sabemos que para la gasificación del bagazo la combustión es incompleta ya que hay presencia de CO y el gas de la gasificación metano (CH<sub>4</sub>)



Masas atómicas de cada elemento que participa en la reacción.

$$\bar{M}_C = 12 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$\bar{M}_H = 1 \frac{Kg}{Kmol}$$

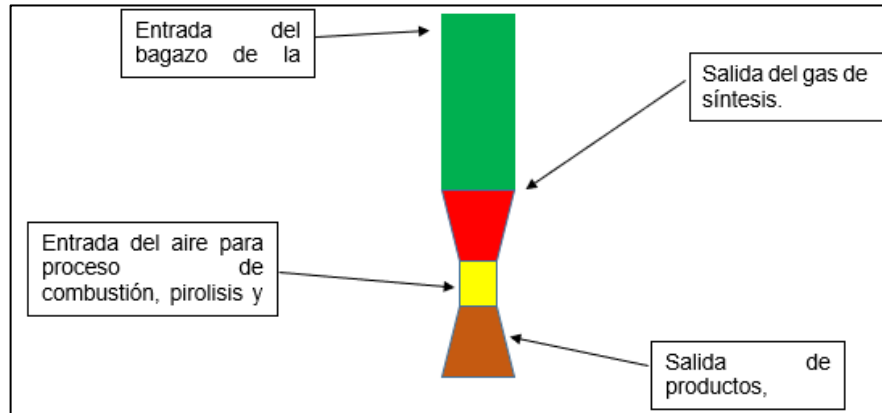
$$\bar{M}_O = 16 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$\bar{M}_N = 14 \frac{Kg}{Kmol}$$

En los gasificadores de tipo lecho fijo, a pesar de que se muestran como un diseño simple y sencillo, estos generan un gas combustible el cual tiene elevados porcentajes de alquitrán: “Principalmente el producto de la composición de gas es:

- 40 - 50 % N<sub>2</sub>,
- 15 - 20 % H<sub>2</sub>
- 10 - 15 % CO
- 10 - 15 % CO<sub>2</sub>
- 3 - 5 % CH<sub>4</sub>
- CV neto de 4 - 6 MJ / Nm<sup>3</sup>. [28]

Ilustración 2 Diagrama de flujo para el balance de masa del gasificador



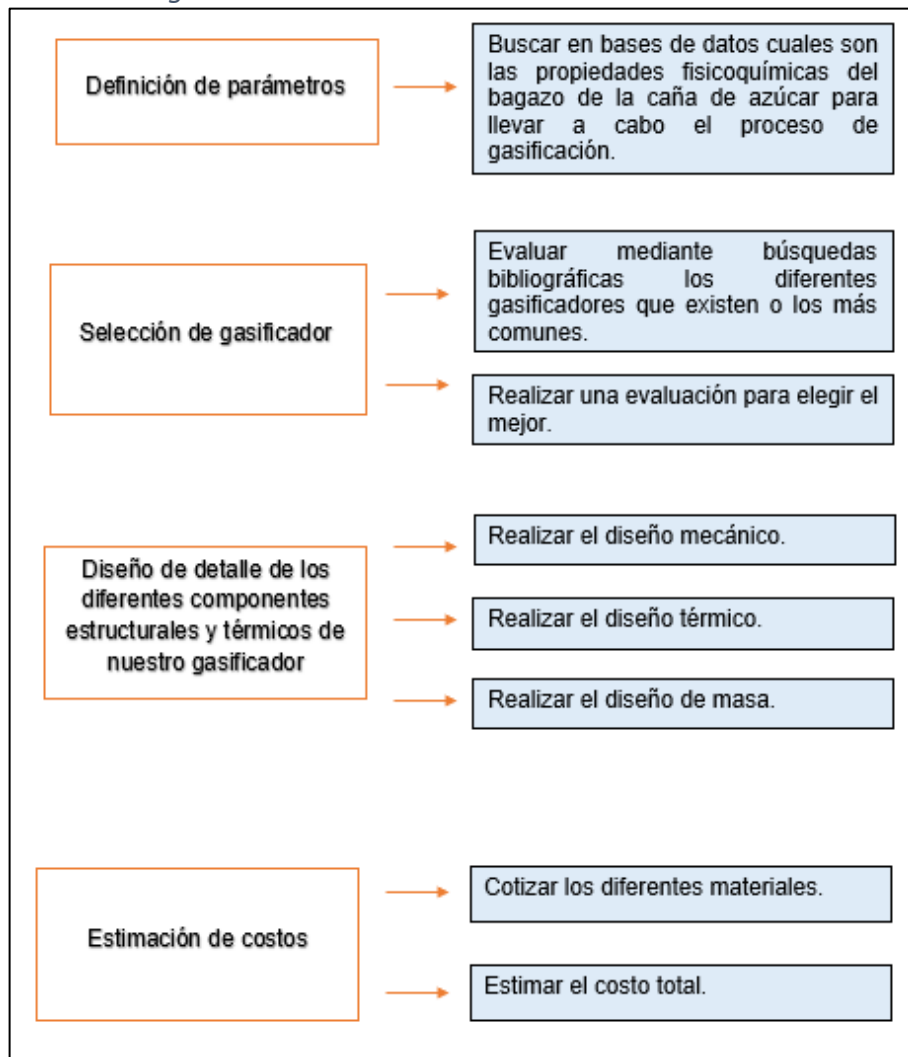
$$M_{entra} = M_{sale}$$

$$M_{bagazo} + M_{aire} = M_{gas} + M_{cenizas}$$

## 8. METODOLOGÍA

Para cumplir a cabalidad con cada uno de los objetivos descritos en este proyecto al llevar a cabo el diseño de la máquina de gasificación del bagazo de caña de azúcar, se tuvo que realizar una serie de tareas, las cuales se plantearon y se especificaron a continuación en la ilustración 1. Esta metodología permitió tener presente cada uno de los propósitos importantes y necesarios a lo largo de la elaboración de dicho diseño, donde se plantearon cuatro tareas principales mencionadas en los recuadros subrayados en color naranja, los cuales contienen las especificaciones en los recuadros subrayados de color azul que son claves para llevar a cabo la búsqueda, desarrollo y construcción del diseño de la maquina gasificadora en este proyecto.

*Ilustración 3 Metodología de desarrollo*



## **9. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZUCAR**

La identificación de los parámetros más importantes, se realizaron mediante el uso de bases de datos, evaluando así los más adecuados para el proceso de gasificación. Según esto se obtuvo que las principales características son las siguientes:

Se denomina “bagazo de caña de azúcar” a los residuos obtenidos después del proceso de extracción del azúcar de la caña. Tradicionalmente se ha llevado a cabo su utilización como materia prima en la producción de la energía para las calderas en los países azucareros, centrales azucareras, etc. El bagazo de caña de azúcar se empleó en la producción de papel desde 150 años atrás, también en la producción de paneles aglomerados de fibras, celulosa para procedencias farmacéuticas, aditivos de alimentos y partículas. [21]

Colombia es un país que cuenta con unas buenas condiciones biofísicas en el sector azucarero, óptimo para la producción a gran escala de caña de azúcar. Una de las regiones más productoras de caña de azúcar en Colombia es el Valle de Cauca, quien ha aprovechado esta riqueza para convertirse en uno de los sectores agroindustriales más grandes e importantes del país, donde se tiene una producción anual de 23.95 millones de toneladas de caña de azúcar.

A lo largo del procesamiento uno de los residuos o quizá el más importante y que es derivado del proceso de la caña de azúcar es el bagazo, el cual presenta aproximadamente un 30% de la caña molida.

En cuanto a la cogeneración de energía en los ingenios azucareros se ha visto un incremento acelerado en los últimos años, ya que en la actualidad dichos sectores tienen la capacidad de autoabastecerse energéticamente, llegando al punto de poder entregar parte de la producción de energía a la red nacional. Se estima que para el año 2020, la producción o generación de energía eléctrica a partir del bagazo

de la caña de azúcar sea aproximadamente del 2%, según se habla en el Plan Energético Nacional de Colombia. [22]

En el uso del bagazo, es indispensable tener presente el constante crecimiento de dicha industria de los derivados, como lo es la diversidad de la industria como una forma de análisis económico y su principal compromiso con el sector energético ya que estos han adquirido un alto significado económico. Uno de los derivados que cuenta con mayor interés en los últimos años es el etanol, ya que se cuenta con gran disponibilidad de bagazo en las fábricas de azúcar, lo cual ayuda ha disminuido los costos de producción.

Históricamente el bagazo ha sido usado como un combustible dentro de la industria y sector azucarero, teniendo este un bajo poder calorífico relativamente que oscila entre los 1850 Kcal/kg, siendo comparado con otro tipo de combustibles tradicionales, el bagazo de caña azúcar es un gran potencial energético para los países que no cuentan con grandes reservas de combustibles fósiles y también son grandes productores de caña de azúcar. [23]

Toda esta información se buscó en diferentes fuentes de datos principales, con la finalidad de obtener las características fisicoquímicas principales existentes en el bagazo de caña de azúcar necesarias para llevar a cabo el proceso de gasificación, estas características son fundamentales para realizar los cálculos correspondientes y poder así tomar acción y realizar las selecciones adecuadas que se llevarán a cabo en el proceso de diseño del gasificador.

Tabla 3 Características fisicoquímicas del bagazo de caña de azúcar

Fuente: J Neri Segura. *Pirólisis a baja temperatura del bagazo de la caña de azúcar para la producción de combustibles líquidos.* (Citado el 18/08/2021). <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1291/1/XSMH156PIROLISIS%20A%20BAJA%20TEMPERATURA%20DEL%20BAGAZO%20DE%20CA%C3%91A%20DE%20AZ%C3%9ACAR%20PARA%20LA%20PRODUCCI%C3%93N%20DE%20COMBUSTIBLES%20LIQUIDOS.pdf>

Tabla 4 Componentes químicos del bagazo de caña de azúcar

<b>Componentes químicos</b>	
componentes	composición %
Glucosa	19.5
Xilosa	10.5
Arabinosa	1.5
Galactosa	0.55
Lignina	9.91
Solubles orgánicos	2.7
azúcares reductores	1.85
Ácidos urónicos	1.91
Ceniza	1.6
Celulosa	50
Total, de hexosas	20.04
Pentosas totales	12

Fuente: Manals-Cutiño, E., y Penedo-Medina, M. (2015). *Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal.* *Tecnología Química*, XXXV (2), 179-192. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543787003.pdf>



## **10. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN**

Dentro de las alternativas de solución se encuentran diferentes partes, las cuales serán de gran ayuda e importancia para permitir realizar el estudio de las necesidades y requerimientos que desde un principio deberá satisfacer la máquina. Cada uno de estos requerimientos serán analizados desde dos puntos de vista muy importantes, tanto como del fabricante, como del cliente o comprador de la máquina. Para esto se realizará un estudio enriquecedor a profundidad de diferentes proyectos para adquirir cierto aprendizaje y así tener diferentes soluciones de diseño, organizándolas o clasificándolas desde la más indicada hasta la menos indicada, para que finalmente se pueda obtener una máquina eficiente, con gran desempeño y segura.

### **10.1. ÁRBOL DE OBJETIVOS**

Se realizó el árbol de objetivos como parte del planteamiento del diseño de la máquina gasificadora para el bagazo de la caña de azúcar. En primer lugar, se procedió a tomar los requerimientos más importantes y relevantes que deberá satisfacer el diseño final de la máquina, quedando dividido en cuatro categorías principales, donde están organizadas jerárquicamente del mayor nivel de importancia al menor.

Los objetivos evaluados son:

- Fácil operación.
- Capacidad térmica alta.
- Tamaño de partícula bajo.
- Capacidad de biomasa moderada.
- Alta calidad de gas de síntesis.
- Gas con baja cantidad de alquitranes.
- Baja cantidad de cenizas.
- Construcción sencilla.
- Dimensiones de construcción de la máquina.

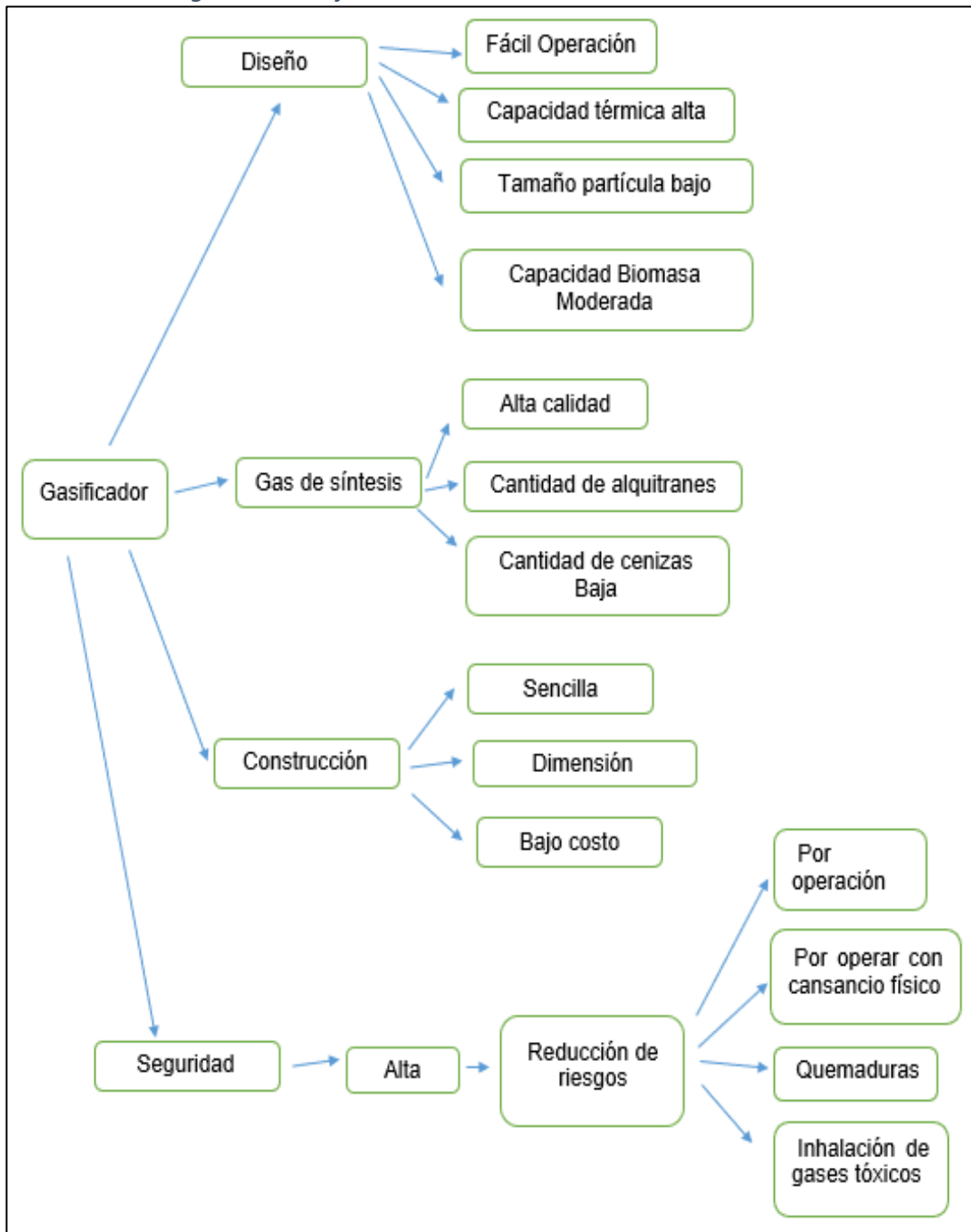
- Bajo costo.
- Reducción de riesgos por operación.
- Reducción de riesgos por operar con cansancio físico.
- Reducción de riesgos por quemaduras.
- Reducción de riesgos por inhalación de gases tóxicos.

Dichos objetivos principales van de la mano con unos objetivos secundarios, donde se tuvo en cuenta los siguientes requerimientos:

- Diseño.
- Gas de síntesis.
- Construcción.
- Seguridad.

Basado en los objetivos anteriormente mencionados, se obtuvo el siguiente diagrama, donde se muestran cada uno de los niveles jerárquicos que demuestran su importancia. Este diagrama es conocido como árbol de objetivos y se realiza como se muestra en la figura a continuación.

Ilustración 4 Diagrama de objetivos

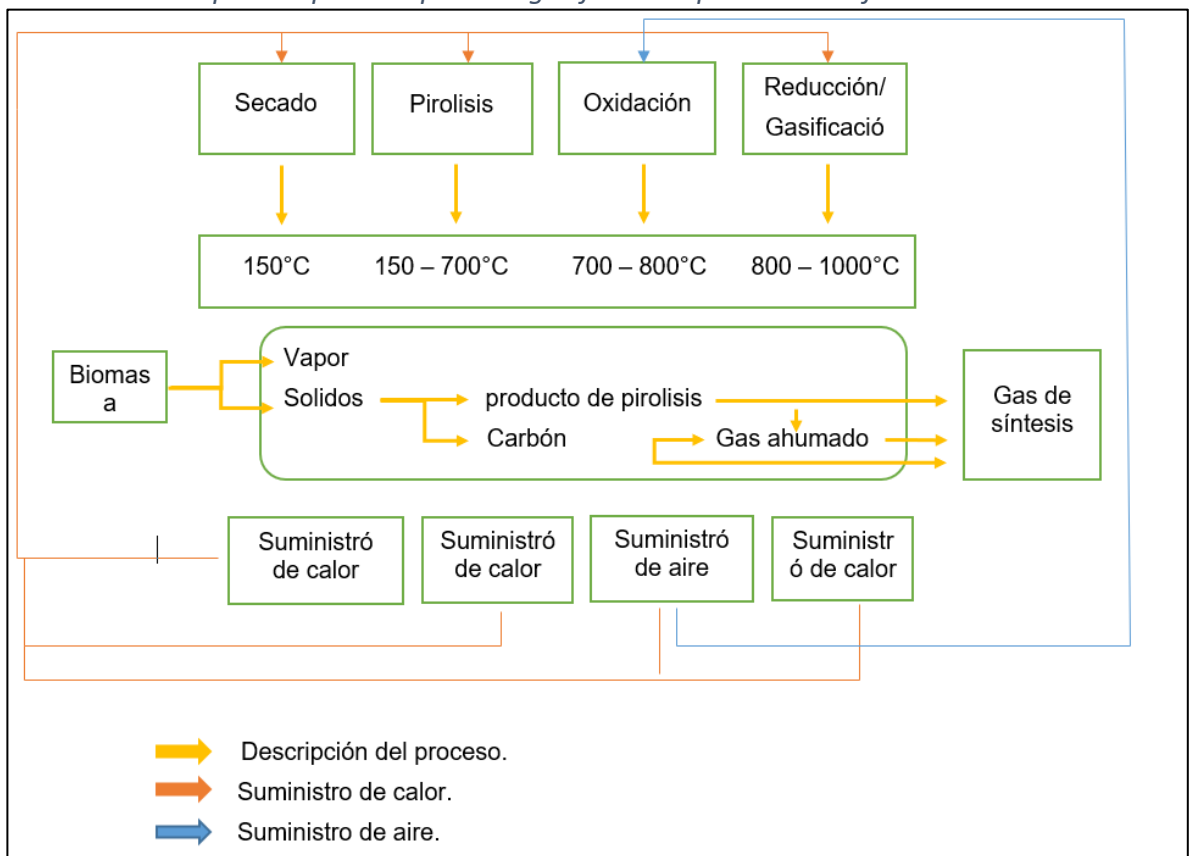


## 10.2. DIAGRAMA DE FUNCIONES

### 10.2.1. Etapas del proceso para un gasificador tipo Down draft

En este diagrama se muestran los diferentes procesos característicos y requeridos en una máquina de gasificación de lecho fijo tipo Down draft, para así llevar a cabo el proceso de gasificación junto con los valores de temperaturas aproximados en cada una de las etapas como se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 5 Etapas del proceso para un gasificador tipo Down draft



Fuente: Rincón Martínez, J., y Silva Lora, E. (Ed.). (2014). *Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad. La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía*. <https://books.google.com.co/books?id=YpnxCAAAQBAJ&pg=PA185&dq=potencia+de+un+gasificador&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKewiYiMG0s6TwhAhUgFVkfFHav0DdgQ6AEwBXoECAEQAg#v=onepage&q=potencia%20de%20un%20gasificador&f=false>

Como se observa en la ilustración 5, el elemento de entrada será la biomasa con las dimensiones requeridas. Una vez ingresado el bagazo de caña de azúcar como material combustible, y el aire como agente gasificante para producir la combustión, se da la generación de calor, donde se busca provocar un secado del material, para poder extraer el mayor porcentaje de humedad posible hasta el requerido por el diseño de la máquina, en donde inmediatamente se empezará a generar vapores. Posterior a esto se lleva a cabo otro proceso conocido y mencionado en el diagrama como lo es la pirolisis donde se sigue suministrando calor, llegando a una elevada temperatura, que oscila aproximadamente entre los 150 – 7000°C, donde el material combustible experimenta una descomposición térmica en ausencia del oxígeno, para así realizar la Oxidación haciendo un suministro de aire en la cámara, donde el aire suministrado reacciona con el char o residuo carbonoso que queda tras la pirolisis del material que se da entre los 700 – 800°C, y finalmente se da la reducción donde hay aporte de calor, con una temperatura entre los 800 – 1000°C, donde el carbón o ceniza producida de la pirolisis reacciona con numerosos gases, especialmente con el hidrogeno y el dióxido de carbono, terminando así de eliminar el contenido de alquitranes contenido en el gas de síntesis, gracias a las altas temperaturas producidas en el a lo largo el proceso de gasificación del material.

### **10.3. LISTA DE REQUERIMIENTOS**

Teniendo en cuenta el árbol de objetivos y el diagrama de funciones para la máquina de gasificación, es importante tener en cuenta ciertos requisitos por poder realizar los procesos de construcción y operación de la máquina de gasificación para el bagazo de la caña de azúcar, en la tabla 5 se resaltan los más importantes que se contemplan en la ejecución de este proyecto.

*Tabla 5 Requerimientos para el diseño de máquina gasificadora para bagazo de caña de azúcar*

<b>Ítem</b>	<b>Requerimientos</b>	<b>Observaciones</b>
<b>1</b>	Área máxima del gasificador	1 m * 1.5m, que no ocupe mucho espacio para utilizarse con fines académicos.
<b>2</b>	Presión de alimentación	El diseño requiere una presión de 1 a 5 bar.
<b>3</b>	Presión de operación	Durante la operación la presión debe ser atmosférica.
<b>4</b>	Silenciosa	Silenciosa y eficiente.
<b>5</b>	Económica	El diseño no supera límites económicos.
<b>6</b>	Aire	Agente oxidante con suministro bajo y suministrado de manera equicorrente.
<b>7</b>	Calor	Suministro de calor con máquina externa.
<b>8</b>	Peso máximo del gasificador	Como intención tener una máquina bastante ligera.
<b>9</b>	Tamaño de partícula	De 20 a 100 mm.
<b>10</b>	Contenido de humedad	En el bagazo de la caña de azúcar debe ser máximo del 30%.
<b>11</b>	Fácil uso de operación	Facilidad y confiabilidad al momento de operar la máquina ya que su uso será con fines académicos.
<b>12</b>	Gas de síntesis	Contenido de alquitranes bajo.

#### **10.4. PARÁMETROS CLAVES EN DISTINTOS PROYECTOS**

Al comparar los distintos proyectos donde se diseña un gasificador de biomasa, se encontraron una serie de parámetros que son fundamentales y característicos de la Biomasa para el proceso de gasificación, los cuales los autores consideraron viables para realizar los cálculos correspondientes y tomar decisiones respecto al diseño y realización de gasificador.

Tabla 6 Parámetros claves en distintos proyecto

ITEM	PROYECTO	AUTORES	UNIVERSIDAD	BIOMASA	PARAMETROS
1	CONSTRUCCION DE UN GASIFICADOR DE TIRO DESCENDENTE	GERMAN IGNACION GUZMAN S	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES	CARBON VEGETAL	PODER CALORIFICO:29000 A 30000 KJ/Kg  HUMEDAD=2 AL 7%  DENSIDAD= 200 A 300 Kg/m <sup>3</sup>
2	DISEÑO CONCEPTUAL DE UN GASIFICADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE RESIDUOS DE PODA GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD EAFIT	MARCELA ARISTIZÁBAL ÁLVAREZ LILIANA VALENCIA NARANJO	UNIVERSIDAD EAFIT	RESIDUOS DE PODA	CONTENIDO DE HUMEDAD = 26.175 %  PODER CALORÍFICO SUPERIOR =18.399 KJ/Kg  DENSIDAD BULK 262.90 Kg/m <sup>3</sup>
3	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN GASIFICADOR PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE LA BIOMASA RESIDUAL FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	FABIAN YESID BARAJAS PEÑARANDA	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	BIOMASA RESIDUAL FORESTAL	DENSIDAD APARENTE=275Kg DE MATERIAL SECADO/m <sup>3</sup>  HUMEDAD=0.075 kg DE AGUA/Kg DE MATERIAL SECO  PODER CALORIFICO INFERIOR:6920.17[BTU/lb] O 16099596.21[J/Kg]

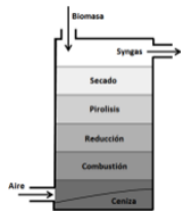
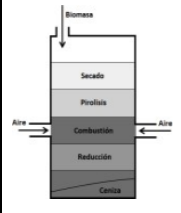
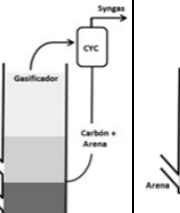
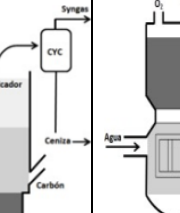
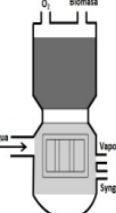
Después de identificar las diferentes características más importantes se evaluó que para el proceso de gasificación mediante bagazo de caña de azúcar requiere tener en cuenta los siguientes tres parámetros principales, los cuales son: Humedad (4.42%), densidad (275 Kg/m<sup>3</sup>) y Poder Calorífico (15.528,7KJ/kg)

## **11. SELECCIÓN DEL TIPO DE GASIFICADOR MÁS APROPIADO PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR.**

Para la selección del gasificador a diseñar, se va a analizar las siguientes tablas que comparan diferentes tipos de gasificadores, para poder seleccionar el gasificador se tiene en cuenta que el propósito como diseñadores es que el gasificador sea pequeño para poder ser construido a futuro para uso práctico de la universidad y que produzca un gas de síntesis limpio aprovechable sin necesidad de hacer tratamientos posteriores.

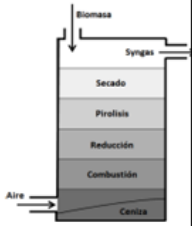
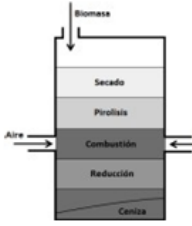
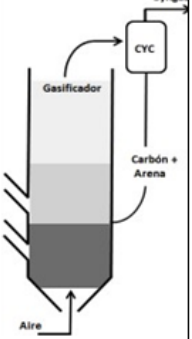
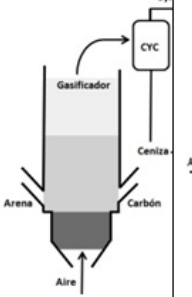
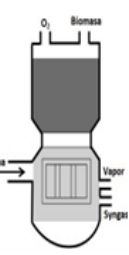
En las siguientes tablas 7 y 8 se observa que cada uno de los tipos de gasificadores cuentan con diferentes parámetros para su operación, capacidades y condiciones de operación.

Tabla 7 Clasificación de gasificadores parte 1

TIPO DE GASIFICADOR	LECHO FIJO		LECHO FLUIDIZADO		LECHO ARRASTRADO
	UPDRAFT (CONTRACORRIENTE)	DOWNDRAFT (EQUICORRIENTE)	CFB (CIRCULANTE)	BFB (BURBUJEANTE)	
					
PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA				
TAMAÑO DE PARTÍCULA	5-100 MM	20-100 MM	0-20 MM	0-20 MM	<1MM
TOLERANCIA LA CENIZA	MÁX. 6%	MÁX. 6%	MÁX. 25%	MÁX. 25%	MÁX. 25%
CONTENIDO DE HUMEDAD	MÁX. 30%	MÁX. 30%	-----	-----	-----
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
DEMANDA DE OXIGENO	BAJA	BAJA	MODERADA	MODERADA	ALTA
DEMANDA DE VAPOR	BAJA	BAJA	MODERADA	MODERADA	ALTA
ALIMENTACIÓN OXIDANTE	CONTRACORRIENTE	EQUICORRIENTE			
TEMPERATURA	800-1000 °C (MENOS UNIFORME)	1000-1200 °C (MENOS UNIFORME)	750-950 °C (MÁS UNIFORME)	900-1000 °C (MÁS UNIFORME)	1100-1500 °C
PRESIÓN DE OPERACIÓN	ATMOSFÉRICA	ATMOSFÉRICA	ATMOSFÉRICA O PRESURIZADA	ATMOSFÉRICA O PRESURIZADA	ATMOSFÉRICA O PRESURIZADA
PRESIÓN DE ALIMENTACIÓN	1-5 BAR	1-5 BAR	1-20 BAR	1-30 BAR	1-70 BAR
VELOCIDAD DEL GAS	BAJA	BAJA	MAYOR QUE BFB	ALTA	ALTA
TIEMPO $\theta$	LARGO (15-30 MIN)	LARGO (15-30 MIN)	CORTO (5-50 S)	CORTO (5-50 S)	MUY CORTO (1-10 S)

Fuente: Pérez, J. (2017). Gasificación de biomasa para generación de energía a pequeña escala [Diapositiva de PowerPoint]. Universidad de Antioquia. [http://eventos.uanl.mx/energias\\_renovables/presentaciones/03\\_juan\\_fernando\\_perez.pdf](http://eventos.uanl.mx/energias_renovables/presentaciones/03_juan_fernando_perez.pdf)

Tabla 8 Clasificación de gasificadores parte 2

TIPO DE GASIFICADOR	LECHO FIJO		LECHO FLUIDIZADO		LECHO ARRASTRADO
	UPDRAFT	DOWN DRAFT	CFB (CIRCULANTE)	BFB (BURBUJEANTE)	
					
PARAMETROS	CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO				
TEMPERATURA DEL GAS	425-650 °C	425-650 °C	900-1050 °C	900-1050 °C	1250-1600 °C
HHV	5-6 MJ/NM <sup>3</sup>	5-6 MJ/NM <sup>3</sup>	5-6 MJ/NM <sup>3</sup>	5-6 MJ/NM <sup>3</sup>	5-10 MJ/NM <sup>3</sup>
CONTENIDO DE ALQUITRANES	MUY ALTO 0.015-5 G/NM <sup>3</sup>	BAJO 0.015-0.50 G/NM <sup>3</sup>	MODERADO <5 G/NM <sup>3</sup>	MODERADO <5 G/NM <sup>3</sup>	SIEMPRE LIBRE DE ALQUITRANES
	PLANTA				
POSIBILIDAD DE ESCALAR EL GASIFICADOR	LIMITADA	LIMITADA	LIMITADA	POSIBLE	POSIBLE
CAPACIDAD TÉRMICA	< 10 MW	4 KW – 4 MW	1-100 MW	1-25 MW	-----
	CAPACIDAD MÁXIMA				
CAPACIDAD MÁXIMA	10 T/H	0.5 T/H	20 T/H	20 T/H	38 T/H

Fuente: Rincón, J., & Silva, E. (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. <https://books.google.com.co/books?id=YpnxCAAQBAJ&pg=PA185&dq=potencia+de+un+gasificador&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwiYiMG0s6TwhUgFVvkFHav0DdgQ6AEwBXoECAEQAg#v=onepage&q=potencia%20de%20un%20gasificador&f=false>

Analizando las tablas 7 y 8 de los tres tipos principales de gasificadores tales como: lecho fijo, lecho fluidizado y lecho arrastrado, se selecciona los gasificadores de lecho fijo ya que son gasificadores de bajas potencias, ideal para su utilización de pequeñas aplicaciones, ya que la finalidad de este diseño es que a futuro pueda

llevarse a cabo su construcción con una finalidad de uso educativo de laboratorio en el área de energías renovables.

Al comparar los dos tipos de gasificadores de lecho fijo Updraft y Down draft se selecciona el gasificador Down draft ya que este produce un gas de síntesis más limpio, pues su contenido de alquitranes es bajo. Es un gasificador de baja potencia y en el cual el bagazo de caña de azúcar cumple con las características de materia prima para el proceso de gasificación, además este gasificador tipo Down draft presenta una poco más de flexibilidad en cuanto al porcentaje de humedad contenido en el bagazo de caña de azúcar, para poder llevar a cabo el proceso de combustión, trabaja también a una presión atmosférica y a su vez requiere menos tiempo (20 – 30 minutos) para realizar el arranque y empezar el proceso de gasificación que uno de tipo Updraft, lo cual representa también una alta eficacia en la gasificación debido a la alta temperatura de salida de los gases.

## **12. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MÁQUINA**

Para llevar a cabo el desarrollo del diseño de este proyecto fue de gran importancia aplicar los conceptos y estrategias de diseño de productos con contenido de ingeniería brindadas por el libro Metodología de Cross, permitiendo hacer un análisis riguroso y profundo de las diferentes soluciones funcionales y aplicables que comprenden la máquina gasificadora del bagazo de la caña de azúcar. Dichas soluciones son el resultado de investigar y acoger características importantes de diseños similares permitiendo así, lograr diseñar una maquina mejorada.

### **12.1. POSIBLES SOLUCIONES MORFOLÓGICAS DE LA MÁQUINA GASIFICADORA PARA EL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZUCAR**

Los modelos funcionales son los subsistemas que satisfacen el objetivo principal de la máquina, producir biogás a partir de la gasificación del bagazo de la caña de azúcar. Para cada uno de los subsistemas, se proponen diferentes soluciones que nos permitan realizar un análisis más acertado, escogiendo la solución de diseño más apropiada.

Para ello, los subsistemas son:

- Entrada del material combustible (bagazo de la caña de azúcar).
- Entrada del agente gasificante.
- Aporte de calor.
- Depósito de ceniza.
- Salida del gas de síntesis.
- Estructura de la máquina.

A continuación, teniendo en cuenta los subsistemas anteriormente mencionados, se propusieron las siguientes alternativas:

*Tabla 9 Alternativas para los diferentes subsistemas de la máquina gasificadora para el bagazo de la caña de azúcar*

<b>SUBSISTEMAS</b>	<b>OPCIÓN 1</b>	<b>OPCIÓN 2</b>	<b>OPCIÓN 3</b>
Entrada del material.	Tolva cilíndrica	Tolva cónica	Tolva rectangular
Tipo del agente gasificante.	Oxígeno	Aire	Vapor de agua
Aporte de calor.	Gas a alta temperatura	Pre calentamiento de material con pistola de calor	Resistencia Plana
Depósito de ceniza.	Sistema de manejo de ceniza de fondo con extracción cilíndrica lateral	Sistema de tornillo inferior manual para manejo de ceniza de fondo con	Sistema de manejo de ceniza de fondo con extracción de tubería rectangular lateral
Salida del gas de síntesis.	Conexión una sola tubería lateral	Conexión lateral con doble tubo	Salida por tubería cuadrada
Estructura de la máquina.	Cilíndrica de 3 secciones	Cilindro	Cuadrada

## **12.2. SELECCIÓN DE LA MEJOR OPCIÓN**

Se realizan 3 posibles propuestas de diseño para la máquina de gasificación del bagazo de la caña de azúcar, los cuales cumplirán objetivamente con cada uno de los requerimientos para dicha máquina. Seguidamente se seleccionará la propuesta de diseño más adecuada para cada uno de los subsistemas.

### **12.2.1. Propuesta 1**

El diseño del gasificador cuenta con modelado cilíndrico seccionado en tres partes que conforman la máquina, iniciando por la entrada del combustible la cual es una tolva cilíndrica por donde ingresa el material que para este caso es el bagazo de la

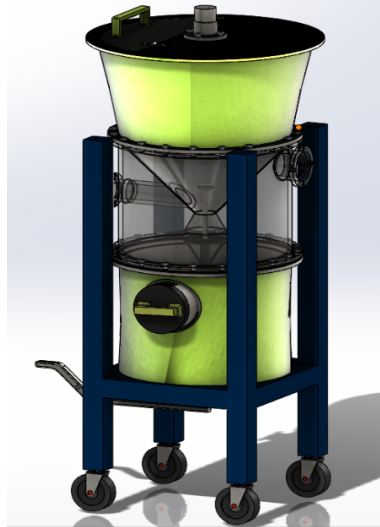
caña de azúcar llegando así a la zona de secado del gasificador. Para este prototipo en particular se cuenta como agente gasificante el oxígeno entregado de manera equicorriente y con un aporte de calor por medio de la inyección de gas a alta temperatura para así generar la combustión requerida para el proceso de pirolisis y oxidación del material, de esta manera eliminando el alto contenido de alquitranes, permitiendo al material combustionado caer y depositarse en el sistema de manejo de ceniza de fondo siendo retirado por una tubería cilíndrica lateral y por otro lado dejando fluir el gas obtenido del proceso hacía conexión de tubería cilíndrica lateral del gasificador. El material principal de la estructura es de aluminio.

*Tabla 10 Selección de la mejor opción para cada subsistema de la propuesta 1*

<b>SUBSISTEMAS</b>	<b>OPCIÓN 1</b>	<b>OPCIÓN 2</b>	<b>OPCIÓN 3</b>
Entrada del material.	Tolva cilíndrica	Tolva cónica	Tolva rectangular
Tipo del agente gasificante.	Oxigeno	Aire	Vapor de agua
Aporte de calor.	Gas a alta temperatura	Pre calentamiento de material con pistola de calor	Resistencia Plana
Depósito de ceniza.	Sistema de manejo de ceniza de fondo con extracción cilíndrica lateral	Sistema de tornillo inferior manual para manejo de ceniza de fondo con	Sistema de manejo de ceniza de fondo con extracción de tubería rectangular lateral
Salida del gas de síntesis.	Conexión una sola tubería lateral	Conexión lateral con doble tubo	Salida por tubería cuadrada
Estructura de la máquina.	Cilíndrica de 3 secciones	Cilindro	Cuadrada

En la Ilustración 6, se observa el diseño preliminar de la propuesta del diseño No. 1 de la máquina de gasificación para el bagazo de caña de azúcar.

*Ilustración 6 Diseño CAD (SOLIDWORKS) para la propuesta 1*



### **12.2.2. Propuesta 2**

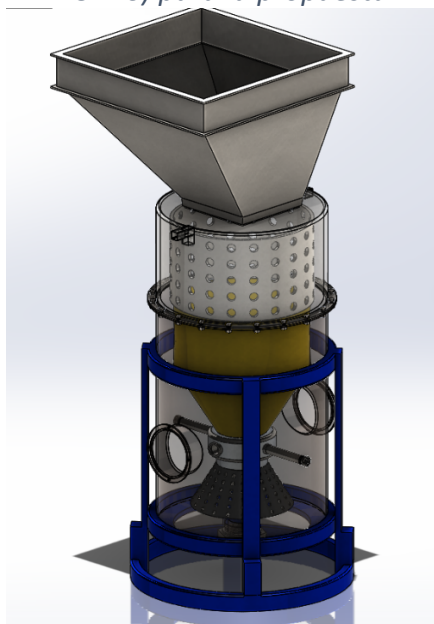
A diferencia del diseño 1, en el diseño 2 se estipula la construcción del gasificador en acero inoxidable, el cual contiene un diseño de entrada de combustible de tipo cónico llegando a la zona de secado del gasificador. Para este diseño se cuenta con agente gasificante el aire entregado de manera equicorriente y con un aporte de calor por medio de un precalentamiento manual con pistola de calor para así generar la combustión requerida para el proceso de pirolisis y oxidación del material, de esta manera eliminando el alto contenido de alquitranes durante el proceso, permitiendo al material combustionado caer y depositarse en el sistema de manejo de ceniza de fondo siendo retirado por un sistema manual de tornillo y por otro lado dejando fluir el gas obtenido del proceso hacia conexión lateral con doble tubo en los extremos laterales del gasificador.

Tabla 11 Selección de la mejor opción para cada subsistema de la propuesta 2

SUBSISTEMAS	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
Entrada del material.	Tolva cilíndrica	Tolva cónica	Tolva rectangular
Tipo del agente gasificante.	Oxígeno	Aire	Vapor de agua
Aporte de calor.	Gas a alta temperatura	Pre calentamiento de material con pistola de calor	Resistencia Plana
Depósito de ceniza.	Sistema de manejo de ceniza de fondo con extracción cilíndrica lateral	Sistema de tornillo inferior manual para manejo de ceniza de fondo con	Sistema de manejo de ceniza de fondo con extracción de tubería rectangular lateral
Salida del gas de síntesis.	Conexión una sola tubería lateral	Conexión lateral con doble tubo	Salida por tubería cuadrada
Estructura de la máquina.	Cilíndrica de 3 secciones	Cilindro	Cuadrada

En la ilustración 7, se observa el diseño preliminar de la propuesta del diseño No. 2 de la máquina de gasificación para el bagazo de caña de azúcar.

Ilustración 7 Diseño CAD (SOLIDWORKS) para la propuesta 2



### 12.2.3. Propuesta 3

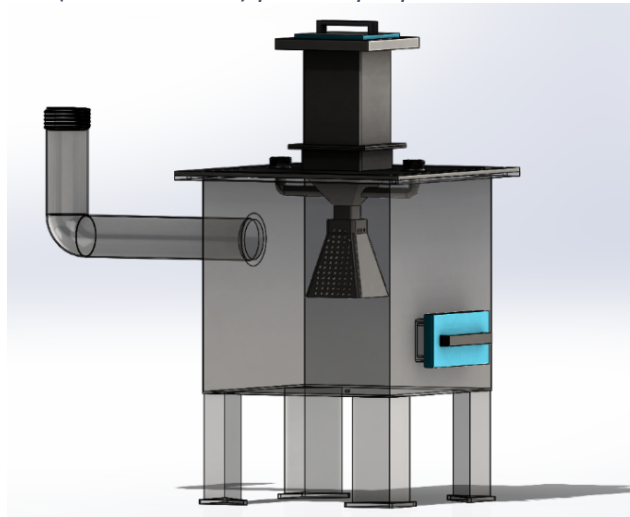
En el diseño 3 se estipula la construcción del gasificador en Hierro, el cual contiene un diseño de tolva en la entrada de combustible de tipo rectangular llegando a la zona de secado del gasificador. En este diseño se cuenta con agente gasificante el vapor de agua entregado de manera equicorriente y con un aporte de calor por medio de una resistencia plana para así generar la combustión requerida para el proceso de pirolisis y oxidación del material, de esta manera eliminando el alto contenido de alquitranes durante el proceso, permitiendo al material combustionado caer y depositarse en el sistema de manejo de ceniza de fondo siendo retirado por un sistema de extracción de tubería rectangular lateral y por otro lado dejando fluir el gas obtenido del proceso hacia conexión lateral con doble tubo en los extremos laterales del gasificador.

*Tabla 12 Selección de la mejor opción para cada subsistema de la propuesta 3*

SUBSISTEMAS	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
Entrada del material.	Tolva cilíndrica	Tolva cónica	Tolva rectangular
Tipo del agente gasificante.	Oxigeno	Aire	Vapor de agua
Aporte de calor.	Gas a alta temperatura	Pre calentamiento de material con pistola de calor	Resistencia Plana
Depósito de ceniza.	Sistema de manejo de ceniza de fondo con extracción cilíndrica lateral	Sistema de tornillo inferior manual para manejo de ceniza de fondo con	Sistema de manejo de ceniza de fondo con extracción de tubería rectangular lateral
Salida del gas de síntesis.	Conexión una sola tubería lateral	Conexión lateral con doble tubo	Salida por tubería cuadrada
Estructura de la máquina.	Cilíndrica de 3 secciones	Cilindro	Cuadrada

En la ilustración 8, se observa el diseño preliminar de la propuesta del diseño No. 1 de la máquina de gasificación para el bagazo de caña de azúcar.

*Ilustración 8 Diseño CAD (SOLIDWORKS) para la propuesta 3*



### **12.3. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE ACUERDO A LOS FACTORES DE DISEÑO**

Habiendo realizado cada uno de los diseños de las propuestas anteriormente mencionadas, se puede proceder a tomar la decisión para escoger u optar por la mejor opción, con base en unos conceptos y fundamentos que definen el concepto de una maquina confiable, eficiente y segura.

- **Fabricación:** La máquina gasificadora cuenta con facilidad y sencillez en su ensamblaje, sencillo y bajo costo de mecanizado para su fabricación.
- **Seguridad:** Se define el riesgo que presenta la máquina en el momento de ser manipulada por el operario a cargo.
- **Desempeño:** Hace referencia al rendimiento de la máquina, es decir, al trabajo útil de esta, debe ser eficiente, productiva y de gran calidad.
- **Costo:** Tanto su construcción como operación requieren un bajo costo, manteniendo una alta eficiencia en el tiempo que esté operando.
- **Apariencia:** La estructura de la máquina debe llevar una buena estética e impecabilidad, que sea agradable a la vista en el recinto o lugar de trabajo u operación de la misma.

A continuación, se mostrarán los factores de riesgo con sus respectivas variables y calificaciones según la importancia que se le da a cada una de ellas. La importancia que tiene dichas variables en cada uno de los diseños es evaluada del 1 al 5, siendo 5 la máxima puntuación posible.

*Tabla 13 Correlación de factores de riesgo con sus variables y puntajes*

<b>Factor de riesgo</b>	<b>PESO</b>	<b>Variable</b>	<b>Puntaje</b>
Fabricación	20%	Facilidad	4
		Ensamblaje	3
		Tiempo	2
		Dificultad	1
Seguridad	20%	Bajo riesgo de accidentes durante la operación	4
		Pocas fallas mecánicas	3
Desempeño	30%	Excelente	5
		Bueno	3
		Regular	2
Costo	15%	Económico	5
		Costoso	3
		Muy costoso	2
Apariencia	15%	Resistencia mecánica	4
		Resistencia a la corrosión	3
		Estética	2
		Dificultad en el acabado y terminado de los elementos	1

Teniendo en cuenta los factores de riesgo con sus variables y puntajes, se va a comparar y evaluar los 3 diseños propuestos por los autores a través de una tabla comparativa como se muestra a continuación:

*Tabla 14 Correlación de factores de riesgo con sus variables para las 3 propuestas*

Factores	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor
Fabricación	20	3	60	3	60	4	80
seguridad	20	4	80	4	80	4	80
desempeño	30	3	90	4	120	3	90
Costo	15	3	45	4	60	4	60
apariencia	15	2	30	4	60	2	30
<b>Total</b>	<b>100</b>		<b>305</b>		<b>380</b>		<b>340</b>

De acuerdo a los análisis basados en cada uno de los 3 prototipos propuestos anteriormente, se puede concluir que el diseño 2 debido a que tiene los mayores puntajes asignados, es el más indicado y adecuado para realizar en este proyecto. La elección de este diseño se realiza teniendo en cuenta el buen desempeño, el bajo costo de fabricación y de operación que ofrece la máquina, la facilidad de fabricación de la misma y la apariencia. La máquina está compuesta por diferentes cámaras específicas para cada una de las etapas del proceso, permitiendo así que el gas liberado con contenido de alcatraces se disipe de manera apropiada, permitiendo que el gas de síntesis salga mucho más limpio con bajo contenido de alquitranes y la ceniza producida por la combustión se almacene en el fondo del gasificador, ideal para realizar la extracción de está con mayor facilidad.

El diseño de este gasificador es bastante sencillo y compacto, con alta seguridad en la operación por el sistema de precalentamiento del material combustible antes de ingresarlo dentro del gasificador, además el tanque cuenta con un aislamiento térmico para prevenir accidentes en el área de trabajo por parte del operario. Es un diseño ideal para un ambiente académico ya que no son procesos de mayor complejidad ni demandan mucho tiempo, además es un diseño bastante objetivo en mira hacia el sector de la agroindustria ya que no se cuenta con gastos de consumo de energía eléctrica y contribuye también al medio ambiente utilizando residuos orgánicos como lo es el bagazo de la caña de azúcar.

### 13. CÁLCULOS Y DISEÑO DE DETALLE DEL GASIFICADOR PARA BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR

Para los cálculos, el diseño del gasificador se basa en los datos obtenidos en las tesis de grados más recientes, mencionadas en antecedentes.

De acuerdo a las necesidades de suministro y funcionamiento de para gasificadores.

$$\dot{V}_{gas} = 0,0034 \frac{m^3}{s}$$

$$P_{suministrada} = 49,28 \text{ KW} \approx 50 \text{ KW}$$

La eficiencia del gasificador utilizado para suministrar aire de 20 Nm<sup>3</sup>/h obtenemos como máximo valor de eficiencia para un gasificador = 70,8 %, potencia térmica = 50,3 kW, aunque como mayor potencia térmica se da de = 57,8 kW, eficiencia = 68,6% logra un flujo de aire de = 22 Nm<sup>3</sup>/h, bajo cierta condición que es de la similitud de relación de aire que existe entre el 1er y 2do estado del 40 %. [29]

*Tabla 15 Eficiencia de un gasificador de lecho fijo para diferentes biomásas*

Biomásas	Eficiencia en frío	Eficiencia en caliente
Bagazo	0,53	0,83
Leña (Algarrobo)	0,40	0,61
Carbón vegetal (Algarrobo)	0,43	0,67
Tallos de arbustos	0,51	0,82

*Fuente: Lesme Jaen R., Recio Recio A., Preston T., Rodríguez L., y Ruiz Oliva L. (2015). ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN GASIFICADOR "ANKUR" MODELO WBG-10 TRABAJANDO CON DIFERENTES BIOMASAS. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543757009.pdf>*

De acuerdo a los resultados de eficiencia de gasificadores de lecho fijo, para los cálculos se toma una eficiencia del 70%

$$\eta_{termica} = \frac{P_{suministrada}}{P_{bagazo}}$$

Despejando la energía térmica por unidad de segundo que debe suministrar el bagazo.

$$P_{bagazo} = \frac{P_{suministrada}}{\eta_{termica}}$$

$$P_{bagazo} = \frac{49,28 \text{ KW}}{0,70} = 70,4 \text{ KW}$$

Según lo anterior la cantidad de energía en KJ por unidad de segundo suministrada en la combustión y al final cada proceso en la gasificación de la biomasa debe ser de 70,4 KW

Se encuentra la cantidad de masa a suministra de bagazo, y de acuerdo a la tabla 13 el poder calorífico del bagazo de la caña de azúcar es de 15.528,7KJ/kg.

- La potencia suministrada está dada por:

$$P \text{ (KW)} = PC \left( \frac{KJ}{Kg} \right) * M(Kg)$$

- La masa suministrada será:

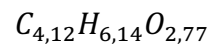
$$M = \frac{P}{PC}$$

$$\dot{M} = \frac{70,4 \text{ KW}}{15.528,7 \frac{KJ}{kg}} \cong 0,005 \frac{Kg}{s} = 16,32 \frac{Kg}{h}$$

Se encuentra la relación aire combustible para conocer la cantidad de aire a suministrar, mediante la siguiente ecuación:

$$AF = \frac{138,3\varepsilon}{m_{combustible}}$$

- Es necesario conocer la masa molecular del bagazo de composición:



Y masa atómica de los elementos que lo componen:

$$\bar{M}_C = 12 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$\bar{M}_H = 1 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$\bar{M}_O = 16 \frac{Kg}{Kmol}$$

- La masa molecular será:

$$\bar{M}_{C_{4,12}H_{6,14}O_{2,77}} = 4,12 * 12 + 6,14 * 1 + 2,77 * 16$$

$$\bar{M}_{C_{4,12}H_{6,14}O_{2,77}} = 99,9 \frac{Kg}{Kmol}$$

- La cantidad de moles suministradas de  $C_{4,12}H_{6,14}O_{2,77}$  es:

$$N_{C_{4,12}H_{6,14}O_{2,77}} = \frac{M}{\bar{M}_{C_{4,12}H_{6,14}O_{2,77}}}$$

$$N_{C_{4,12}H_{6,14}O_{2,77}} = \frac{0,005 \frac{Kg}{s}}{99,9 \frac{Kg}{Kmol}}$$

$$N_{C_{4,12}H_{6,14}O_{2,77}} = 0,00005 \frac{Kmol}{s}$$

- Se encuentra épsilon para calcular la cantidad de aire a suministrar:

$$\varepsilon = 0,00005 \left( 4,12 + \frac{1}{4} * 6,14 - \frac{1}{2} * 2,77 \right)$$

$$\varepsilon = 0,0002135 \frac{Kmol}{s} \text{ de aire}$$

- La relación aire combustible será:

$$AF = \frac{138,3\varepsilon}{m_{combustible}}$$

$$AF = \frac{138,3 * 0,0002135}{0,005 \frac{Kg}{s}}$$

$$AF = 5,9 \cong 6$$

Es decir, el resultado obtenido en la relación aire combustible, muestra que se necesitan 6 kg de aire para producir 1 kg de combustible.

### 13.1. DIMENSIONES DEL GASIFICADOR

En cuanto al diseño en la geometría del gasificador, se realiza por la denominación de lo que se conoce como de “carga de hogar” que define cantidad de gas pobre minimizado a estándares normales de presión y temperatura (entrada de gas del

motor), haciendo su división por el área de la superficie de garganta como se evidencia en la siguiente ecuación:

$$Carga\ hogar = \frac{entrada\ de\ gas\ del\ motor\ \frac{m^3}{h}}{area\ de\ la\ garganta\ cm^2}$$

Para este caso la entrada de gas del motor se toma como referencia de “DISEÑO DE UN GASIFICADOR DUAL PARA BIOMASA RESIDUAL AGROPECUARIA A NIVEL LABORATORIO”.

Como valor máximo que es posible alcanzar por concepto de carga del hogar es de 0.9 hablando de gasificadores de tipo, los cuales operen bajo operaciones continuas e ideales para su trabajo con doble gargante de hogar. Ya que este gasificador será a escala de laboratorio académico no tiene mayores tiempos de operación. Por lo tanto solamente se tendrá una sola reducción de garganta por motivo de la geometría de operación. Se considera que en equipos de una sola garganta como valor de carga del hogar es de= 0,275. [30]

- Se halla el área de la garganta:

$$area\ de\ la\ garganta\ cm^2 = \frac{0,0034\ \frac{m^3}{s} * 3600}{0,275}$$

$$area\ de\ la\ garganta\ cm^2 = 44,5\ cm^2$$

El área de un círculo es:

$$A = \pi * R^2$$

Despejando el radio se tiene:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

- Hallamos el radio:

$$R = \sqrt{\frac{44,5 \text{ cm}^2}{\pi}} = 3,7 \text{ cm} \cong 4 \text{ cm}$$

El diámetro será de:

$$D = 2 * R = 8 \text{ cm}$$

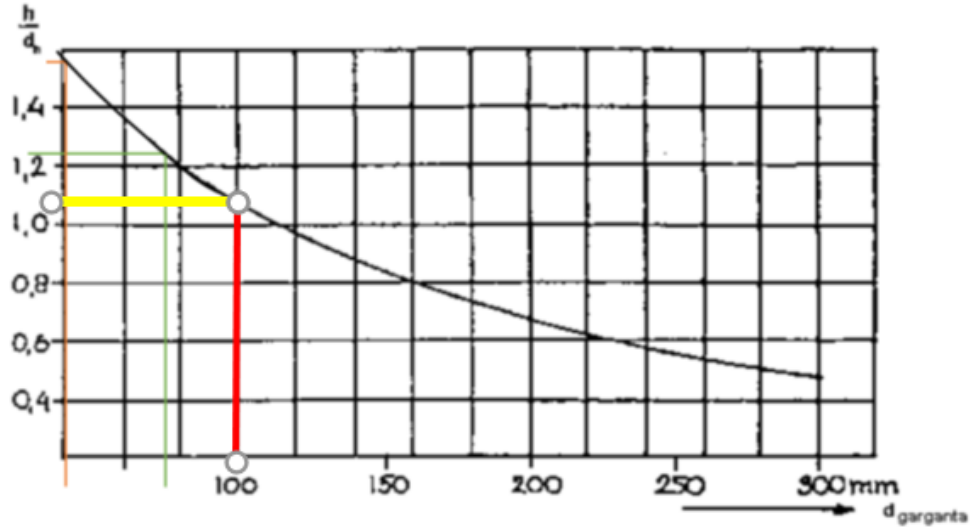
Para facilidades de cálculo se da el diámetro con un valor aproximado de 10 cm.

Una vez obtenido el diámetro de garganta, se tienen las principales dimensiones más importantes, una de ellas es:

- Altura de plano de tobera sobre sección transversal de garganta.

Haciendo uso de la ilustración 9 podrá hallarse la relación requerida posteriormente para los cálculos de altura en las toberas. A continuación se observa en la figura 9 de manera gráfica, las dimensiones en cuanto a diámetros de garganta y a su vez alturas del plano en las toberas.

Ilustración 9 Altura del plano de las toberas sobre el estrechamiento del hogar, para diversos tamaños de generador



Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1986). Wood gas as engine fuel. <http://www.fao.org/3/t0512e/t0512e00.htm>

- Se halla la altura del plano de la tobera:

$$\text{Altura del plano de la tobera} = \text{diámetro de la garganta} * \frac{h}{dh}$$

$$\text{altura del plano de la tobera} = 10 \text{ cm} * 1,14 = 11,4 \text{ cm}$$

Para los cálculos se toma una altura de tobera de 15 cm, con el fin de facilitar cálculos y construcción del diseño.

El siguiente paso es tomar el diámetro del anillo superior de cada una de las toberas haciendo uso de la ilustración 3, donde tenemos los valores en la relación  $d_{ri}/dh$  para un diámetro de garganta de 2.2. Por lo tanto se tiene el mismo valor en el

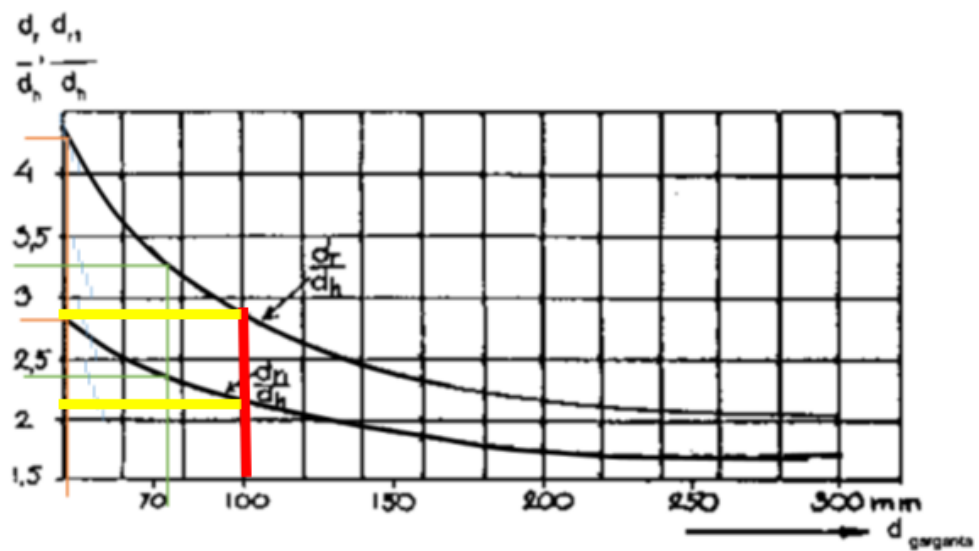
diámetro para el anillo de las toberas como de la cámara de combustión, únicamente para los reactores de la garganta simple.

Entonces se obtiene:

$$\text{Diámetro del anillo superior de la tobera} = \text{diámetro de garganta} * \frac{dr_1}{dh}$$

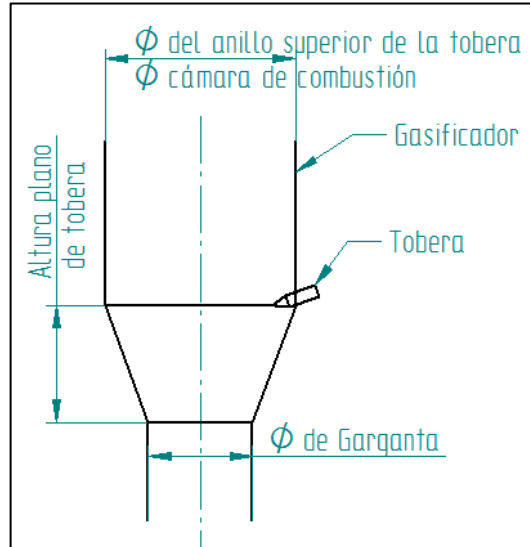
$$\text{Diámetro del anillo superior de la tobera} = 10 \text{ cm} * 2,2 = 22 \text{ cm}$$

Ilustración 10 Diámetro del anillo de las toberas y apertura de éstas, en relación con el estrechamiento y el diámetro del hogar, para diversos modelos de generadores



Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1986). Wood gas as engine fuel. <http://www.fao.org/3/t0512e/t0512e00.htm>

Ilustración 11 Dimensiones de diámetro de garganta y altura del plano de toberas sobre la garganta



Fuente: Navarro-Abril, W. (2016). Diseño de un gasificador dual para biomasa residual agropecuaria a nivel laboratorio [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. Archivo digital.  
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/103/6/4101228-2016-2-IM.pdf>

Hallando el volumen que debe ocupara la masa del bagazo de la caña de azúcar para media hora de proceso.

$$M = \frac{16,32}{2} \text{ Kg} = 8,16 \text{ Kg}$$

De acuerdo con los datos de la tabla 3 la densidad del material suministrado es de 275 Kg/m<sup>3</sup>

$$M = \rho * V$$

Donde V es:

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{8,16 \text{ Kg}}{275 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0,03 \text{ m}^3$$

Se tiene que el volumen de la tobera será:

$$V_{tobera} = \frac{h * \pi}{12} * (D_1^2 + D_2^2 + D_1 * D_2)$$
$$V_{tobera} = \frac{0,15 * \pi}{12} * (0,22^2 + 0,1^2 + 0,22 * 0,1) = 0,002 \text{ m}^3$$

El volumen del para contener la masa del bagazo será de:

$$V_{total} = V_{tobera} + V_{cilindro}$$
$$V_{cilindro} = 0,03 - 0,002 = 0,027 \text{ m}^3$$

Se encuentra la altura del cilindro a partir de:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h_{cilindro}$$
$$h_{cilindro} = \frac{4 * V_{cilindro}}{\pi * D^2}$$
$$h_{cilindro} = \frac{4 * 0,027}{\pi * 0,22^2} = 0,72 \text{ m}$$

Para tener espacio donde se guarde o almacene el gas como producto antes de la gasificación se adicionará una altura adicional al cilindro para que entre las alturas de la tobera y el cilindro tenga una altura total de 1 m.

$$h_{adicional} = 1 - 0,72 - 0,15$$
$$h_{adicional} = 0,12 \text{ m}$$

### 13.2. Cálculos de transferencia de calor.

*Ilustración 12 Corte de sección del gasificador*

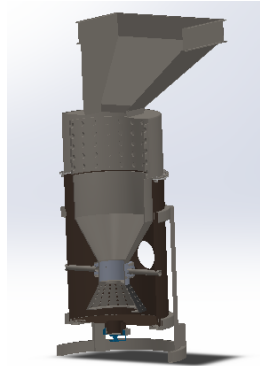
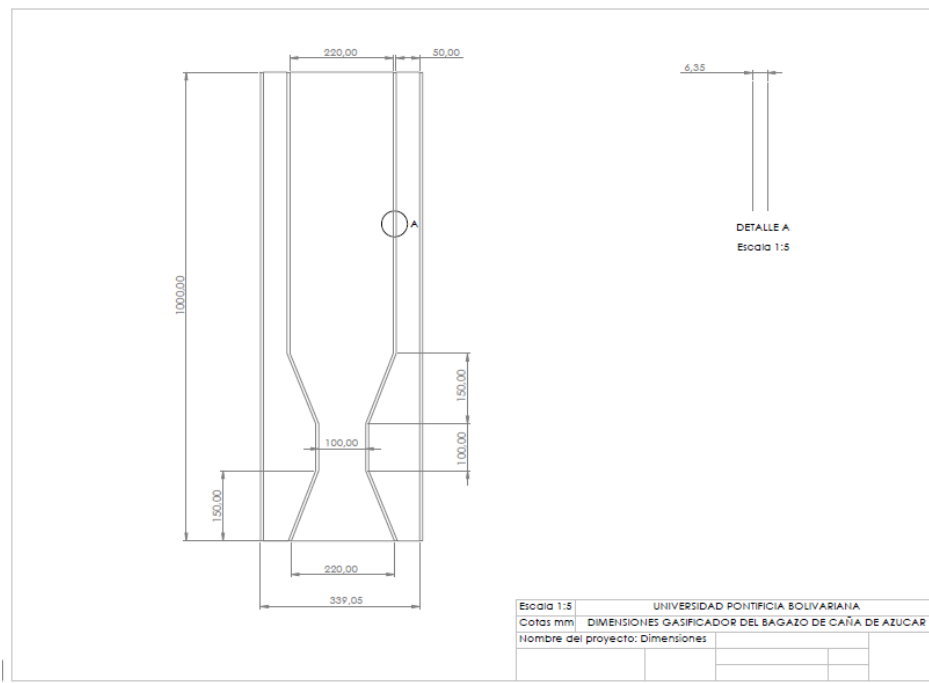


Diagrama de flujo del gasificador, ya que el proyecto es solo diseño no incluye construcción los procesos de manufactura como construcción, compra de materiales, pasos para la fabricación no se tendrán en cuenta en el siguiente diagrama.

*Ilustración 13 Dimensiones del gasificador*



En la ilustración 13 se evidencian las diferentes secciones por donde fluye el calor, y con base en esto se desarrolla el diagrama de resistencias térmicas.

Ilustración 14 Sesiones o resistencias térmicas de transferencia de calor

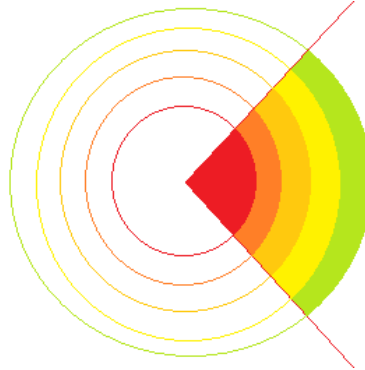
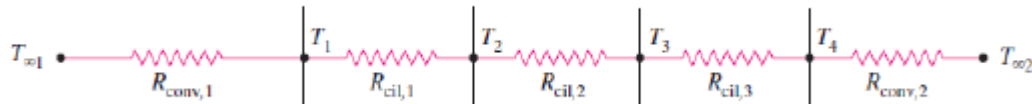


Ilustración 15 Diagrama de resistencias térmicas



Fuente: Cengel, Y. y Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill. <https://itscv.edu.ec/wp-content/uploads/2019/06/Transferencia-de-calor-y-masa-Fundamentos-y-aplicaciones-Cuarta-Edici%C3%B3n.pdf>

Cálculo del calor transferido entre la temperatura interna y el ambiente, este primer cálculo se realiza sin tener en cuenta un aislante térmico que pueda evitar que la superficie exterior del gasificador se encuentre muy caliente.

De acuerdo a la tabla 4 estos cálculos se realizan donde se encuentra el valor más alto de temperatura que en este caso es donde se produce la combustión que alcanza temperaturas de entre 1000 y 1200 °C, recordando que la transferencia de calor se da desde el componente más caliente hacia el más frío.

$$\dot{Q} = \frac{T_{combustion} - T_{ambiente}}{\sum R_{termicas}}$$

Donde:

$\dot{Q}$  = calor transferido (W)

$T_{combustion}$  = temperatura en la zona de combustion (°C)

$T_{ambiente}$  = temperatura ambiente (°C)

$R_{termicas}$  = resistencias termicas involucradas

Datos para realizar los cálculos.

$T_{combustion} = 1200$  °C; se toma la temperatura más alta para no presentar fallas por cálculos.

$k_{bagazo} = 0,383 \frac{W}{m^{\circ}C}$ , conductividad térmica del bagazo de caña de azúcar.

$k_{acero} = 60,5 \frac{W}{m^{\circ}C}$ , conductividad térmica del acero

$k_{aire} = 0,026 \frac{W}{m^{\circ}C}$ , conductividad térmica del aire

Para el factor de convección del aire exterior, se tomará como convección natural ya que el equipo va estar presente en un salón de laboratorio, el valor lo se toma de la tabla 14.

Tabla 16 Valores del factor de convección para distintos fluidos

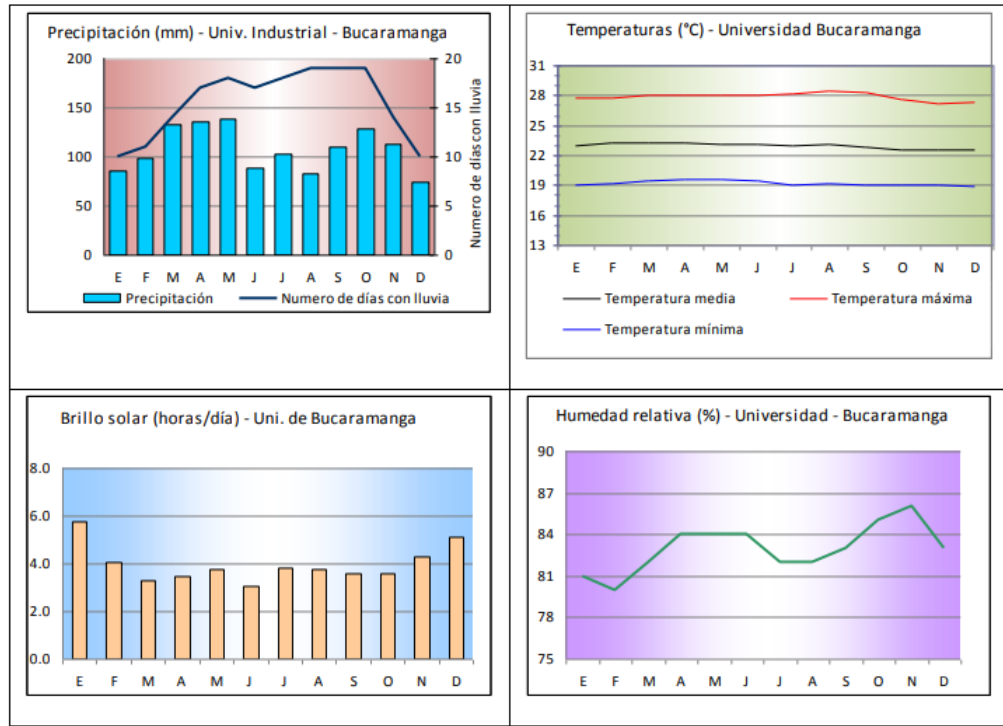
Medio	Coefficiente de transferencia de calor h ( W/m <sup>2</sup> . K)
Aire (convección natural)	5-25
Aire/vapor supercalentado (convección forzada)	20-300
Petróleo (convección forzada)	60-1800
Agua (convección forzada)	300-6000
Agua (en ebullición)	3000-60.000
Vapor (en condensación)	6000-120.000

Fuente: Dassault Systemes. (2011). Coeficiente de transferencia de calor por convección. [http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection\\_Topics/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm)

Para la temperatura ambiente tomaremos la temperatura promedio diaria de Bucaramanga/Santander que es donde se desarrolla el proyecto del diseño de gasificador.

De acuerdo a la figura que se muestra a continuación la temperatura promedio en Bucaramanga es de 24 °C

Ilustración 16 Temperatura promedio en Bucaramanga /Santander



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>

Se tiene que la biomasa debe generar una potencia o calor de salida de 70,4 KW de calor, con esto se encuentra la temperatura de la superficie exterior del gasificador.

Las superficies metálicas del gasificador se construirán con lamina de acero de ¼ de pulgada que son 0,00635 m.

Resistencias térmicas:

$$R_{conduccion} = \frac{\ln\left(\frac{5,00635}{5}\right)}{2 * \pi * 60,5 * 0,00635} + \frac{\ln\left(\frac{10,00635}{5,00635}\right)}{2 * \pi * 0,026 * 0,05} + \frac{\ln\left(\frac{10,01227}{10,00635}\right)}{2 * \pi * 60,5 * 0,00635}$$

$$R_{conduccion} = 0,008785$$

$$\dot{Q} = \frac{T_{combustion} - T_{ex}}{\sum R_{termicas}}$$

Despejando la temperatura exterior del gasificador se tiene:

$$T_{ex} = T_{combustion} - \dot{Q} * \sum R_{termicas}$$

$$T_{ex} = 1200 - 70,4 * 1000 * 0,008785$$

$$T_{ex} = 581,536 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Calculamos el aislante:

Para el aislante se toma lana mineral que tiene una conductividad de 0,035 W/m°C y en el mercado la venden en espesores de 1,5 pulgadas o 0,0381 m. Para tener una superficie exterior de unos 70 °C, cuanto debe ser el espesor del aislante.

Solucionando se tiene que:

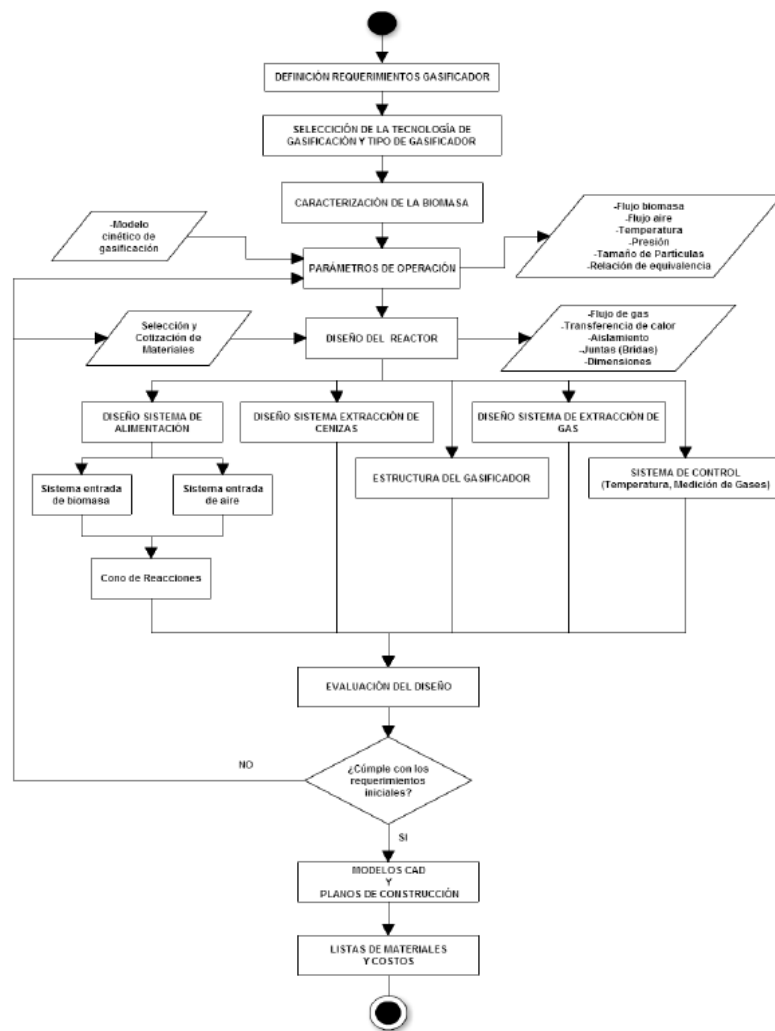
$$70^\circ\text{C} = 581,536 \text{ } ^\circ\text{C} - 70,4 * 1000 * \left( \frac{\ln\left(\frac{10,05037}{10,01227}\right)}{2 * \pi * 0,035 * e_{aislante}} \right)$$

$$e_{aislante} = 0,053848 \text{ m} \approx 6 \text{ cm}$$

## 14. PASO A PASO DEL DISEÑO DE UN GASIFICADOR

En la ilustración 17 se puede apreciar el Esquema del paso a paso del diseño de un gasificador para su posterior manufactura y ensamble. Para mayor claridad de imagen ver el anexo 1.

*Ilustración 17 Esquema del paso a paso en el diseño de un gasificador de bagazo de caña de azúcar*

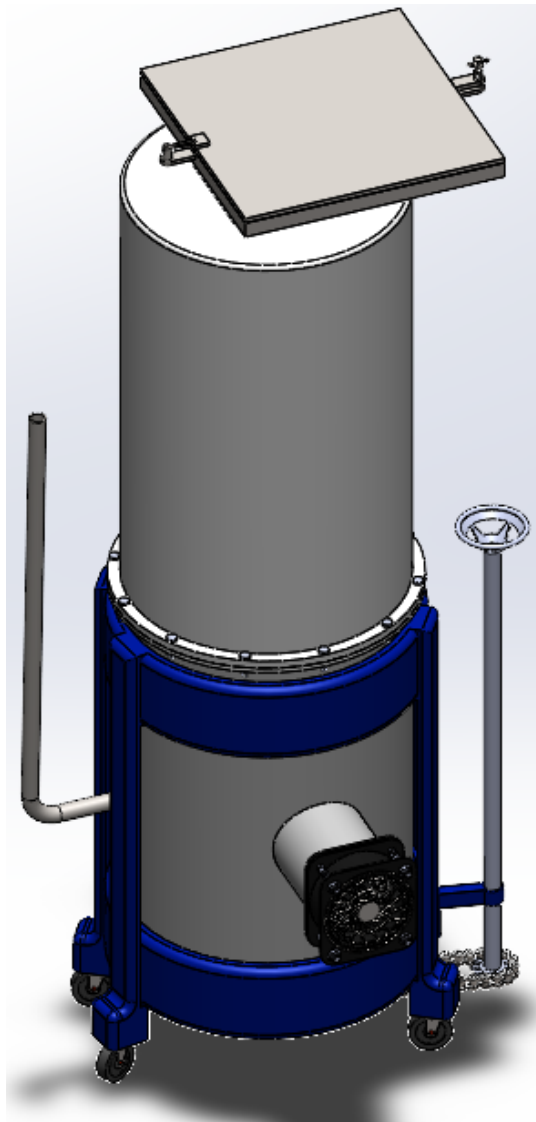


Fuente: Ortiz-Ceron, E. (2015). *Diseño y construcción de un microgasificador para residuos de cosecha de la caña de azúcar* [Tesis de pregrado, Universidad del Valle]. Archivo digital. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/16469/0529033.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

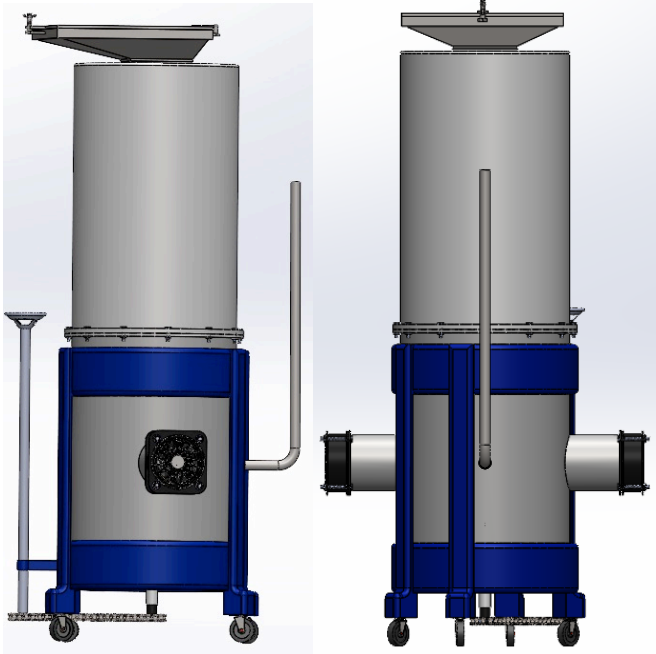
## 15. PLANOS A DETALLE

En la ilustración 18, 19 y 20 se observa el diseño final, contemplando los resultados mínimos en cálculos para la construcción del gasificador de caña de bagazo, su modelamiento CAD y posteriores planos se desarrollaron en la herramienta académica CAD Solid Works, los planos de cada una de las piezas se encuentran en los anexos.

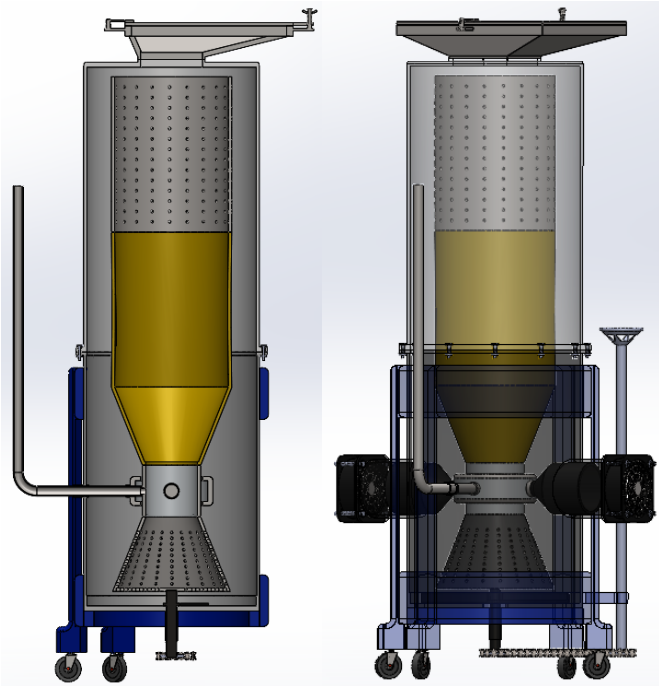
*Ilustración 18 Vista isométrica del diseño del gasificador de bagazo*



*Ilustración 19 Vista frontal y vista lateral del diseño del gasificador de bagazo*



*Ilustración 20 Vista de corte y vista de transparencia de cilindros externos del diseño del gasificador de bagazo*



## 16. ESQUEMA Y DEFINICIONES EN LA MANUFACTURA DE COMPONENTES PARA GASIFICADOR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

Todo proceso de manufactura de un equipo o maquina empieza en el diseño del mismo, este diseño se hace teniendo en cuenta las futuras operaciones de manufactura, así abordando la reducción de costos, para esta manera llegar a un ensamble idóneo, económico y con un funcionamiento correcto. En la ilustración 21 y 22 se observa el diagrama de manufactura para el diseño de los componentes del gasificador, a su vez este proceso lineal ayuda a denotar cuáles son sus componentes más importantes y nos ayuda a tener una idea general de los procesos necesarios y sub procesos a la hora de pensar en costos de fabricación.

Para mejor observación del diagrama de operaciones de ensamble y manufactura de cuerpo tanto interior como exterior, ver el anexo 2 y 3.

*Ilustración 21 Diagrama de operaciones de ensamble y manufactura para cuerpo exterior*

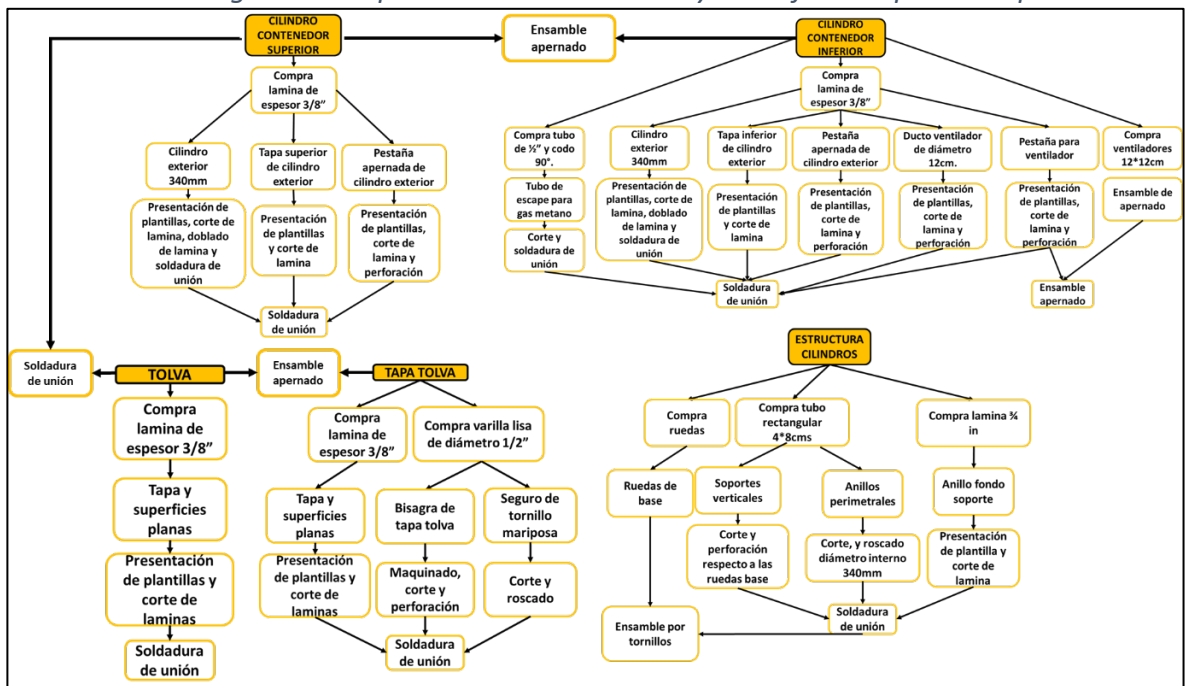
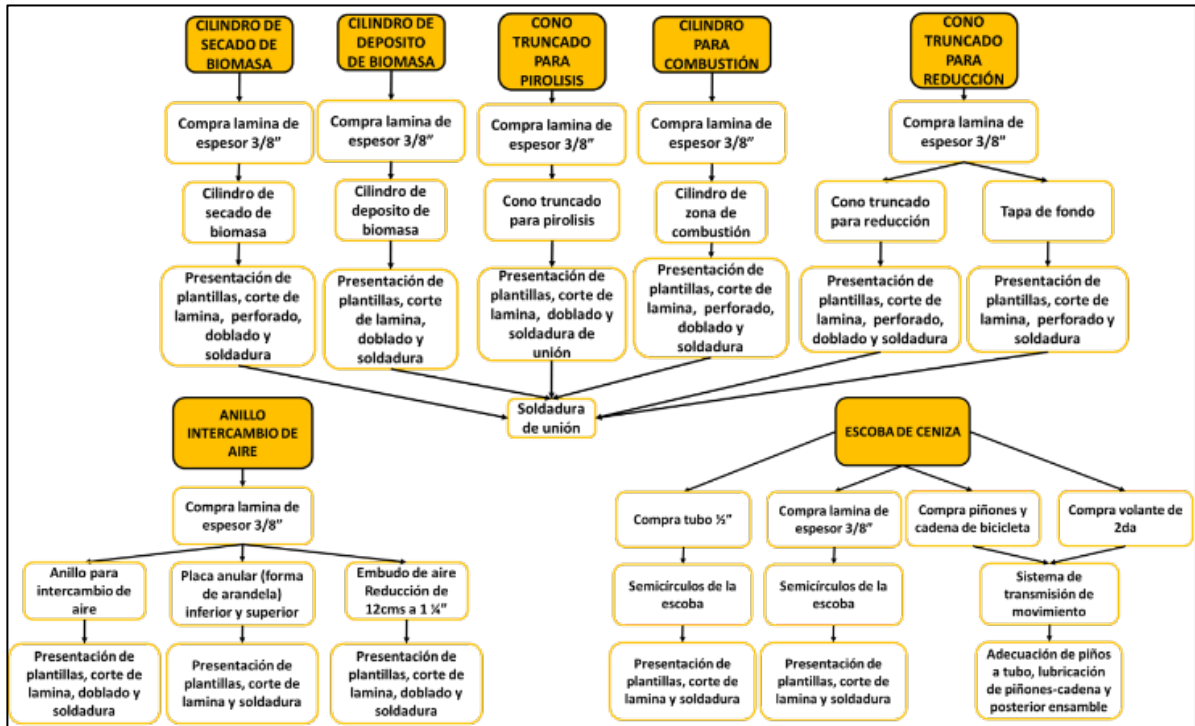


Ilustración 22 Diagrama de operaciones de ensamble y manufactura para cuerpo interior



## 16.1. DEFINICIÓN DE OPERACIONES

**Compras:** En el ejercicio de diseño se planteó para todas las superficies planas una lámina de espesor de 3/8" (o 1/4") como material principal se plantea el acero al carbono o si existe holgura de presupuesto directamente acero inoxidable. también para las superficies cilíndricas una varilla de diámetro 1/2" y un tubo de diámetro 1/2" para los soportes verticales se plantea un tubo cuadrado de perfil 4\*8cms y para el sistema de transición de movimiento se establece que no afecta mucho su configuración de dimensiones o diámetros, se plantea el uso de dos piñones de bicicleta y una cadena de la misma. Se establece que mediante operaciones de manufactura complementarias tales como maquinado, corte, pulido, perforado, soldadura, etc. Se pueda llegar a un ensamble óptimo del gasificador.

**Cortes:** Como consejo principal se recomienda hacer todos los cortes o al menos los más pequeños y precisos con láser, si no existe la viabilidad económica se recomienda con plasma y pulir con pulidora de 4 1/2. se recomienda hacerlo a bajas temperaturas/voltajes, ya que esto comprometería la integridad estructural del material.

**Roscado:** Para toda operación de roscado se recomienda hacerse en torno industrial con buril de punta de tungsteno.

**Soldadura:** Para toda unión soldada se recomienda soldadura de arco revestido con electrodo 7018 de 1/8 o 7010 1/16 para material de aporte.

**Pulir:** Para todo proceso de pulir se recomienda llevar el material a metal blanco (sin corrosión, oxido o recubrimientos) mediante sandblasting o técnicas similares, si se decide hacer con lija manual se recomienda empezar con valores de lija 80-150-400-800 hasta lograr metal blanco. Se recomienda todos los bordes filosos pulir y las esquinas dejarlas redondeadas aproximadamente a 5°.

**Pintura:** No se aplicará pintura al ser un equipo en constante elevación de temperatura, ya que esta puede agregar químicos no deseados a la combustión, se

recomienda el uso de aislamiento anteriormente mencionado en la zona de compras.

## **16.2. ORDEN LÓGICO DE ENSAMBLE**

Ya que el cuerpo exterior del tanque funge como una concha o protección al cuerpo interior, se recomienda seguir el siguiente orden lógico.

- cuerpo interior.
- Se puede instalar la tolva con su respectiva tapa al cuerpo superior sin problema en este paso.
- luego ensamblar el sistema de barrido.
- proseguir con la instalación de los embudos de aire al anillo de intercambio de aire.
- A continuación, con la parte inferior del cuerpo exterior del cuerpo interior.
- Instalar los ventiladores y el primer piñón al sistema de barrido.
- Instalación de la parte superior del cuerpo exterior.
- Apriete de espárragos, tanto de ventiladores como cuerpo exterior.
- Ensamble del sistema volante-tubo-piñón y la cadena de bicicleta.
- Finalmente se recomienda la instalación de sellos plásticos y del aislante térmico elegido.

**16.2.1. Cuerpo interior del gasificador:** en esta etapa se ensamblan mediante soldadura a tope (se recomienda los pases necesarios para formar un buen deposito dependiendo del diámetro del material de aporte) los componentes denominados:

- Cilindro de secado
- Cilindro de deposito
- Cono truncado para pirolisis
- Cilindro para combustión
- Cono truncado para reducción

**16.2.2. Cuerpo exterior del gasificador:** Este ensamble se hace mediante espárragos con apriete mecánico, se recomienda mucho cuidado con las manos y el uso de epps.

**16.2.3. Sistema de transmisión de movimiento:** Este es un ensamble sencillo se recomienda dejar la cadena con un poco de holgura para que en caso que la escoba se atasque no tienda a fallar la cadena.

**16.2.4. Ensamble final:** Se hace montando todos los componentes prácticamente a presión, el cilindro exterior se deposita en la estructura de soporte y el cuerpo interior descansa como en pedestal en el tubo que tiene la escoba de barrido, se recomienda hacer un desgaste en la parte inferior del cono truncado de reducción para hacer un ajuste más preciso.

## 17. ANÁLISIS DE COSTOS

En el ejercicio del diseño del gasificador para bagazo de azúcar, se sacó una lista de materiales base y se cotizo a mes de agosto del año 2021, para así llevar el ejercicio del diseño un paso mas adelante y dar una idea clara y real de un estimado de fabricación, en adicional se hizo el ejercicio de cotizar con una empresa ya establecida y estas dos propuestas son plasmadas a continuación.

### 17.1. PROPUESTA PROPIA

En este inciso se tomó el trabajo de cotizar en diversos almacenes proveedores de diferentes materiales y terminar agregando a la tabla los mas económicos, posteriormente se dio paso a la investigación en diversos talleres de manufactura en base a las operaciones que se debían hacer para llegar al ensamble final, dando como resultado un estimado plasmado en la tabla 17.

*Tabla 17 Cotización al por menor hecha por estudiantes*

COTIZACIÓN DE MATERIALES Y MANO DE OBRA					
COSTOS POR MECANIZADO					
MATERIAL	DIMENSION	PRECIO UN (\$)	Cantidad	Valor total	
Lamina 3/8	1,20m x 2,40m	\$ 1.430.000	2	2860000	
Ventilador 12 CM	12 x 12 2,5 cm	\$ 18.500	2	37000	
3/8"	Tornillo	1 in de largo	\$ 400	10	4000
	Tuerca	NA	\$ 150	10	1500
	Guaza	NA	\$ 200	10	2000
	Arandela	NA	\$ 100	10	1000
5/8"	Tornillos	1 in de largo	\$ 2.000	15	30000
	Tuerca	NA	\$ 1.000	15	15000
	Guaza	NA	\$ 400	15	6000
	Arandela	NA	\$ 900	15	13500
Tubo circular 1/2" con codo de 90	calibre 14 - 6m	\$ 37.700	1	37700	
Tubo rectangular 4*8 cms	calibre 14 - 6m	\$ 157.000	1	157000	
<b>Total</b>		<b>\$ 1.648.350</b>		<b>\$ 3.164.700</b>	
COSTOS POR MECANIZADO					
TIPO MECANIZADO				PRECIO (\$)	
Cordón de soldadura 7010, pase de relleno en toda estructura				\$ 360.000	
Doblar lámina de Acero HR de 3/8 a un diametro de 34 cm				\$ 350.000	
Perforación de 1/2" (12 huecos) en lamina de Acero HR 3/8				\$ 30.000	
Perforación de 3/4" (8 huecos) en lamina de Acero HR 3/8				\$ 30.000	
Corte de Lamina Acero HR				\$ 150.000	
Corte de tubería				\$ 300.000	
<b>Total</b>				<b>\$ 1.220.000</b>	
<b>TOTAL FINAL</b>				<b>\$ 4.384.700</b>	

## 17.2. PROPUESTA DE EMPRESA

Se cotizó con la empresa Influmax S.A.S, ya que esta provee un servicio integral entre la mano de obra, la materia prima, correcciones a planos necesarias y entrega de planos finales. En la ilustración 23 se ve la cotización completa para mejor visualización ver anexo 17 y 18.

Ilustración 23 Cotización completa de empresa Influmax



Bucaramanga, 12 de Agosto de 2021  
Cotización

**Ing. Jonathan Rojas**  
Universidad Pontificia  
Bucaramanga

**Asunto:**  
Propuesta de construcción de gasificador para bagazo de caña de azúcar.

**Alcance:**

1. Suministro de material de acuerdo a los planos enviados por el diseñador.
2. Construcción de componentes internos y externos del sistema gasificador.
3. Montaje de componentes de acuerdo a planos de ensamble suministrados por el cliente.
4. Entrega de equipo en sede UPB Bucaramanga (Floridablanca).

**Condiciones comerciales**

**Valor Total:** \$ 9.520.000 – (VALORES CON IVA).  
**Forma de pago:** 50% para inicio de construcción  
50% contra entrega  
**Tiempo de entrega:** 6 semanas  
**Garantías:** 6 meses por defectos o rotura de partes  
**Lugar de entrega:** Floridablanca

**Exclusiones y Notas aclaratorias:**

1. Los componentes cotizados en la presente propuesta, son de acuerdo a los planos suministrados por el cliente, materiales, dimensiones y tolerancias.
2. El ensamble del equipo, será de acuerdo a las indicaciones suministradas por el cliente.
3. No se generaran pruebas de gasificación, esto será a cargo del cliente
4. El equipo se entregara en sitio UPB Floridablanca
5. Cualquier cambio a los requerimientos presentados modificará la cotización.

**Validez de la oferta:**  
30 Días contados a partir de la fecha de entrega de este documento.

Esperamos la propuesta aquí expresada sea de su agrado y de igual manera cumpla a satisfacción los requerimientos que ustedes desean.

Saludos Cordiales.  
Atentamente



**Omar Fernando Gómez Landazábal**  
Gte. Ger. INFLUMAX SAS  
Nit 900.885.460-7  
Cel: 3168200182 / 6826420

PROPUESTA COMERCIAL					
ITEM	CANT	UNIDAD	DESCRIPCION	V. UNIT	V. TOTAL
1	1	glb	Construcción de gasificador para bagazo de caña de azúcar, de acuerdo a diseño y materiales especificados en planos de 1 al 12 suministrados por el cliente. Plano 1: Cono truncado zona de reducción Plano 2: Embudo de aire Plano 3: Soporte cilindros exterior Plano 4: Tapa tolva Plano 5: Tolva piramidal Plano 6: Anillo de salida de aire Plano 7: Barredora Plano 8: Cilindro de combustión Plano 9: Cilindro de depósito y cono truncado de pirolisis. Plano 10: Cilindro de secado Plano 11: Cilindro inferior externo Plano 12: Cilindro superior externo	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$ 8.000.000</b>	<b>\$ 8.000.000</b>
<b>IVA</b>				<b>\$ 1.520.000</b>	<b>\$ 1.520.000</b>
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 9.520.000</b>	<b>\$ 9.520.000</b>

## 17.3. CONCLUSIÓN DE COSTOS

De este ejercicio de cotización de costos estimados a fecha de agosto 2021 se pueden sacar varias conclusiones, que a continuación serán citadas.

- Debido al paro y la actual crisis económica todos los insumos de materia prima y mano de obra se encuentran en un estado elevado, por ende, el ejercicio de solo el diseño del gasificador, es idóneo ya que en la situación actual del país se estaría sobre pagando el costo de manufactura casi al doble.
- Siempre será mucho más económico construir o al menos involucrarse en los procesos de manufactura de una forma más presente, pero también se debe tener en cuenta que este proceso de estar presente conlleva gastos de transporte, tanto de el estudiante que se encuentre a cargo del proceso de cotización y vigía de construcción, como del posterior transporte del gasificador final (teniendo en cuenta su peso seria complicado el desplazamiento del mismo aun con ruedas).

## 18. CONCLUSIONES

- Se diseñó un gasificador de lecho fijo para procesar gas de síntesis a partir de los residuos producidos en la en la siembra, fabricación de azúcar como panela (bagazo de la caña de azúcar) para propósitos de laboratorio utilizando los conocimientos adquiridos durante nuestra fase como estudiantes aplicando, cálculos mecánicos, térmicos y termodinámicos.
- Se establecieron características fisicoquímicas del bagazo de la caña de azúcar para el proceso de gasificación de este.
- En el proceso de diseño se seleccionó el tipo de gasificador más adecuados para el requerimiento de laboratorio donde se pueden estudiar las características más importantes en el proceso de gasificación de biomasa, desde el inicio que en este caso sería la adición del combustible o del bagazo, posterior a esto las diferentes reacciones que ocurren e la gasificación y por último los productos directos del proceso.
- Por medio de software se diseñó un modelo del gasificador como de cada componente de este, también se realizaron los planos de las diferentes piezas para su posterior fabricación.
- En base al diseño y modelación del gasificador se tiene el área del acero para diseñar el gasificador y la cantidad de ,material para construir el bastidor con ángulo de acero, en base a esto a los resultados de la modelación y precios comerciales se obtuvo el valor aproximado del costos de los materiales para la fabricación del gasificador, adicionalmente se debería tener en cuenta la

mecanización (cortes, juntas por soldadura) de los materiales, mano de obra entre otros gastos al momento de la construcción del gasificador.

## 19. RECOMENDACIONES

- Se recomienda en la etapa de manufactura en un posterior proyecto reciclar todos los retazos de tubería, para reutilizarlo en la estructura de soporte del gasificador exterior, también se recomienda con los retazos de lámina sobrante hacer proceso de doblado y fabricar piezas como el ducto de aire entre otros.
- Se recomienda una tubería de diámetro interior mínimo ya que la compresión del gas ayuda a que el poder calorífico se concentre y por ende no existan tantas fugas, lo cual dará una gasificación más eficiente.
- Se recomienda aplicar el aislante térmico mencionado en los cálculos para evitar pérdidas de calor por convección y posibles quemaduras, adicional a esto se recomienda la fabricación de sellos en las partes donde los cilindros van atornillados o en la tapa superior para evitar posibles fugas de gas por los espacios que puedan quedar en la posterior fabricación.

## 20. REFERENCIAS

- [1] Ruíz, M. (2020, enero 30). Planes para reducir el uso de leña al cocinar y disminuir impacto en salud y ambiente. La República. <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/planes-para-reducir-el-uso-de-la-lena-al-cocinar-y-disminuir-el-impacto-en-la-salud-y-medio-ambiente-2958214>
- [2] García N, J. y Yanez A, E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. Revista Palmas, 31(02), 41-48. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1477>.
- [3] Galán Borrás, D. (2012). Gasificación de bagazo de caña de azúcar con aire y vapor para la producción de bio-combustible [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Archivo digital. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11638/u608780.pdf?sequence=1>
- [4] Navarro-Abril, W. (2016). Diseño de un gasificador dual para biomasa residual agropecuaria a nivel laboratorio [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. Archivo digital. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/103/6/4101228-2016-2-IM.pdf>
- [5] Flórez, D. (2016). Obtención de gas de síntesis a partir de la gasificación de cuesco de palma de aceite peletizado [Tesis de maestría, Nacional de Colombia]. Archivo digital. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/60817/1016047776.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] Lopes-Motta, I., Toscano-Miranda, N., Maciel-Filho, R. y Wolf-Maciel, M. (2019). Gasificación de bagazo de caña de azúcar: simulación y análisis de

diferentes parámetros operativos, medios fluidizantes y tipos de gasificadores, *Biomass and Bioenergy*, 122, 433-445. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.051>

- [7] Awais, M., Li, W., Munir, A., Mubashar-Omar, M., & Ajmal, M. (2021). Experimental investigation of downdraft biomass gasifier fed by sugarcane bagasse and coconut shells. *De Biomasa Bioref*, 11, 429-444. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-020-00690-5>
- [8] Sahoo, A. & Ram, K. (2015). Gasifier performance and energy analysis for fluidized bed gasification of sugarcane bagasse. *Energy*, 90, 1420-1425. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.096>
- [9] Parthasarathy, P. & Narayanan, S. (2015). Effect of combined slow pyrolysis and steam gasification of sugarcane bagasse on hydrogen generation. *Korean J. Chem. Eng.*, 32(11), 2236-2246, 2015. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11814-015-0038-6>
- [10] Anukam, A., Mamphweli, S., Reddy, P., Meyer, E., & Okoh, O. (2016). Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 66, 775-801. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046>
- [11] Lesmen-Jaén, R., García-Faure, L., Oliva-Ruiz, L., Pajarín-Rodríguez, J. y Revilla-Suárez, D. (2016) «Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso», *Tecnología Química*, 36(2), 161-172, 2016. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852016000200002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000200002)
- [12] Arteaga-Pérez, L., Casas-Ledón, Y., Cabrera-Hernández, J. y Rodríguez-Machín, L. (2015). Gasificación de biomasa para la producción sostenible de

energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. *Afinidad*, 72(570), 138-145.  
[https://www.researchgate.net/publication/264541344\\_Gasificacion\\_de\\_biomasa\\_para\\_la\\_produccion\\_sostenible\\_de\\_energia\\_Revision\\_de\\_las\\_tecnologias\\_y\\_barreras\\_para\\_su\\_aplicacion](https://www.researchgate.net/publication/264541344_Gasificacion_de_biomasa_para_la_produccion_sostenible_de_energia_Revision_de_las_tecnologias_y_barreras_para_su_aplicacion)

- [13] Chong Obando, H. (2018) Análisis para la obtención de energía eléctrica utilizando un Gasificador de Biomasa [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Archivo digital. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/11351/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-148.pdf>
- [14] CEUPE Maganize. (2020). ¿Qué es la gasificación?. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-gasificacion.html> (accedido oct. 15, 2020).
- [15] Castells Elias, X. y Velo, E. (2012). La Gasificación (Esta monografía es un capítulo del libro TRATAMIENTO Y VALORIZACION ENERGETICA DE RESIDUO. Madrid: Ediciones Diaz de Santos. 436.
- [16] González, J., Gutierrez, F., Del Río, P., San Miguel, M., Bahillo, A., Sánchez, J., Ballesteros M., Vásquez, J., Arancil, J. y Rodríguez L. (2015). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Ediciones Mundi-Prensa. [https://books.google.com.co/books?id=k9ISCgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=k9ISCgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [17] Sierra, H., Arellano L., Dorado, A., Fortuny M., Gabriel, D., Gamisans, S., González, A., Hernández. S., Lafuente, F., Monroy, O., Mora, M. y Revah, S. (2017). Purificación y usos del biogás. [https://www.researchgate.net/publication/316656176\\_Purificacion\\_y\\_usos\\_d\\_el\\_biogasPurification\\_and\\_use\\_of\\_biogas](https://www.researchgate.net/publication/316656176_Purificacion_y_usos_d_el_biogasPurification_and_use_of_biogas)

- [18] Estrada, C. y Zapata-Meneses, A. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia Et Technica*, 2(25), 155-159. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7229>
- [19] Ramirez-Rubio, S., Sierra, F. y Guerrero, C. (2011). Gasificación de materiales orgánicos residuales. [Online], 31(3), 17-25. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0120-56092011000300003&lng=es&nrm=.pf&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-56092011000300003&lng=es&nrm=.pf&tlng=es)
- [20] Mundo Compresor. (2020). Gas de síntesis. <https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/gas-de-sintesis>
- [21] Aguilar-Rivera, N. (2011). Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(2), 189-197. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432011000200008](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432011000200008)
- [22] Becerra-Quiroz, A., Buitrago-Coca, A., y Pinto-Baquero, P. (2016). Sostenibilidad del aprovechamiento de caña de azúcar en el Valle Del Cauca, Colombia. *Ingeniería Solidaria*, 12(20), 133-149, 2016. <http://dx.doi.org/10.16925/in.v12i20.1548>
- [23] Diez-Torres, F. y Garrido-Carralero, N. (2012). Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante? Dos casos de estudio. *Ingeniería Química*, 44(506), 76-85. <https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiba/Consulta/verDoc.aspx?num=532>
- [24] Carrasco-Venegas, L. (2015). Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. Archivo digital.

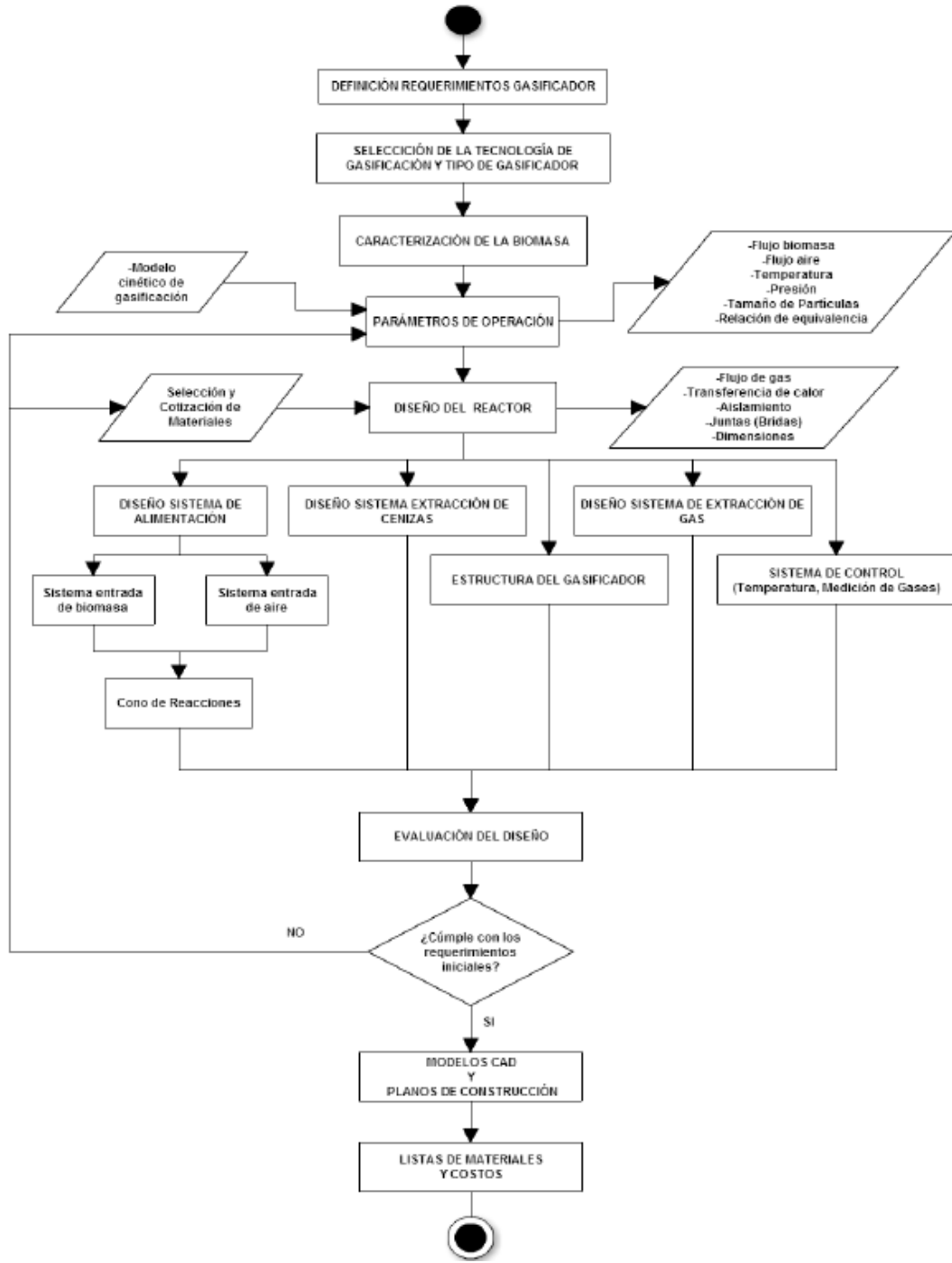
[https://issuu.com/jcalvay/docs/disen\\_o\\_y\\_construccion\\_de\\_un\\_gasifi](https://issuu.com/jcalvay/docs/disen_o_y_construccion_de_un_gasifi)

- [25] Neri, F., Sandoval, R., Arias, E., Salinas, J., Delgado, D., López A. y Collins, V. (2004). Pirolisis a baja temperatura del bagazo de caña de azúcar para la producción de combustible líquidos. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1291/1/XSMH156PIROLISIS%20A%20BAJA%20TEMPERATURA%20DEL%20BAGAZO%20DE%20CA%C3%91A%20DE%20AZ%C3%9ACAR%20PARA%20LA%20PRODUCCI%C3%93N%20DE%20COMBUSTIBLES%20LIQUIDOS.pdf>
- [26] Maradey, F. (2017) Termodinámica aplicada. <https://pdfcoffee.com/termodinamica-aplicada-francisco-maradey-uispdf-2-pdf-free.html>
- [27] Zumalacáguerri, L., Pérez, O., Lombardi, G., Rodríguez, P. y Zumalacárregui B. (2008). Cálculo del beneficio ambiental de la caña de azúcar para la producción de etanol combustible. *Ingeniería y Competitividad*, 10(1), 65-71. <https://www.redalyc.org/pdf/2913/291323474005.pdf>
- [28] Peña, J., Martínez, P., Cortés, M., Chirivi, N., y Mendoza Geney, L. (2017). Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación. *Revista De Investigación*, 10(2), 165-181. <https://doi.org/10.29097/2011-639X.89>
- [29] Lesme-Jaén, R., Viera-Andrade, R., Silva-Lora, E., & Martínez, J. (2011). Evaluación teórico experimental de un sistema avanzado gasificador de biomasa/motor reciprocante para la generación de electricidad. *Tecnología Química*, 31(2), 203-2016. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v31n2/rtq07211.pdf>
- [30] Jara-Acuña, R. (2012). Determinación de la conductividad térmica de la pulpa del yacón (*smallanthus sonchifolius*) en función de la humedad y la temperatura [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Archivo digital.

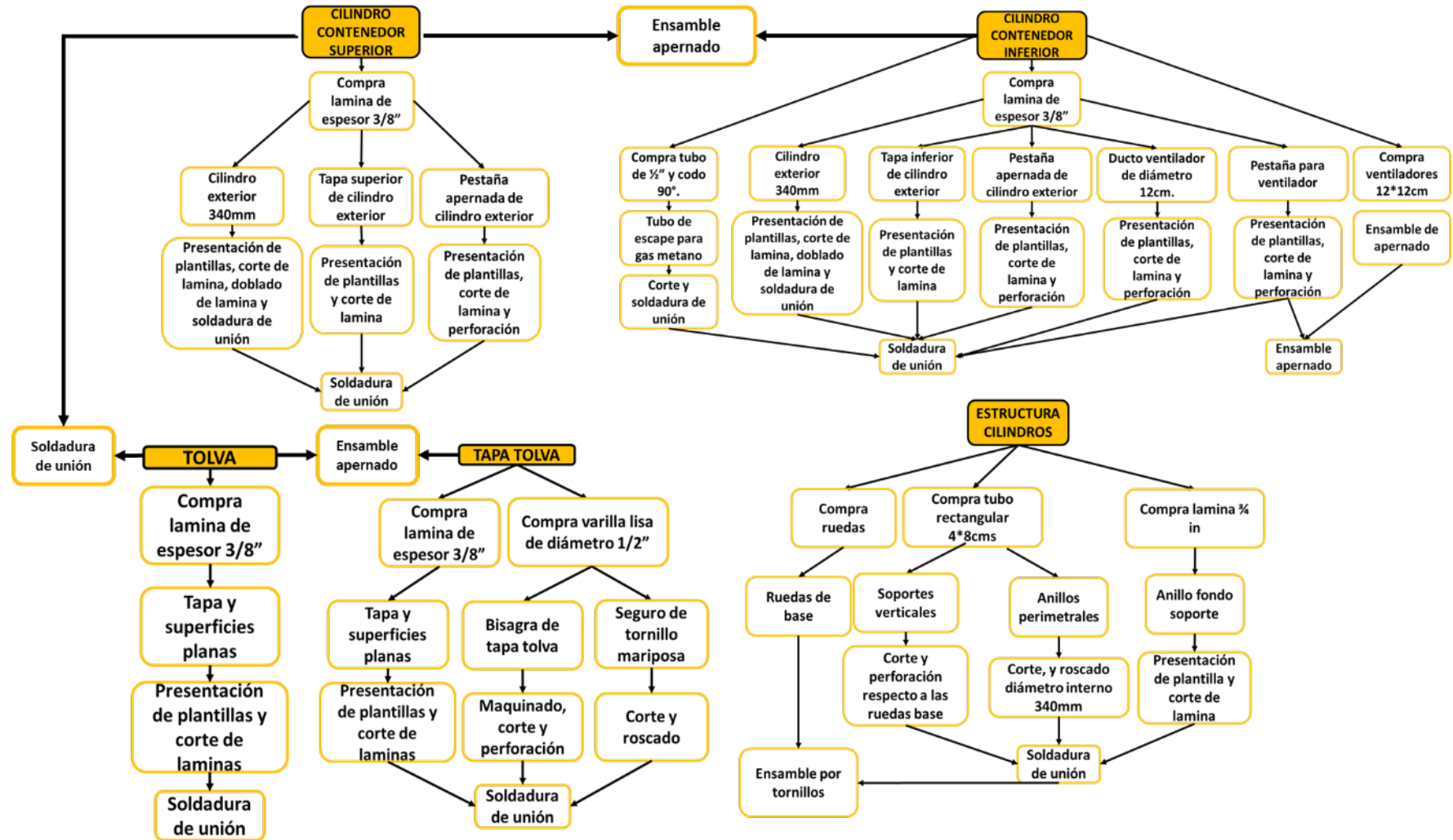
<http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/268/FIA189.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## 21. ANEXOS

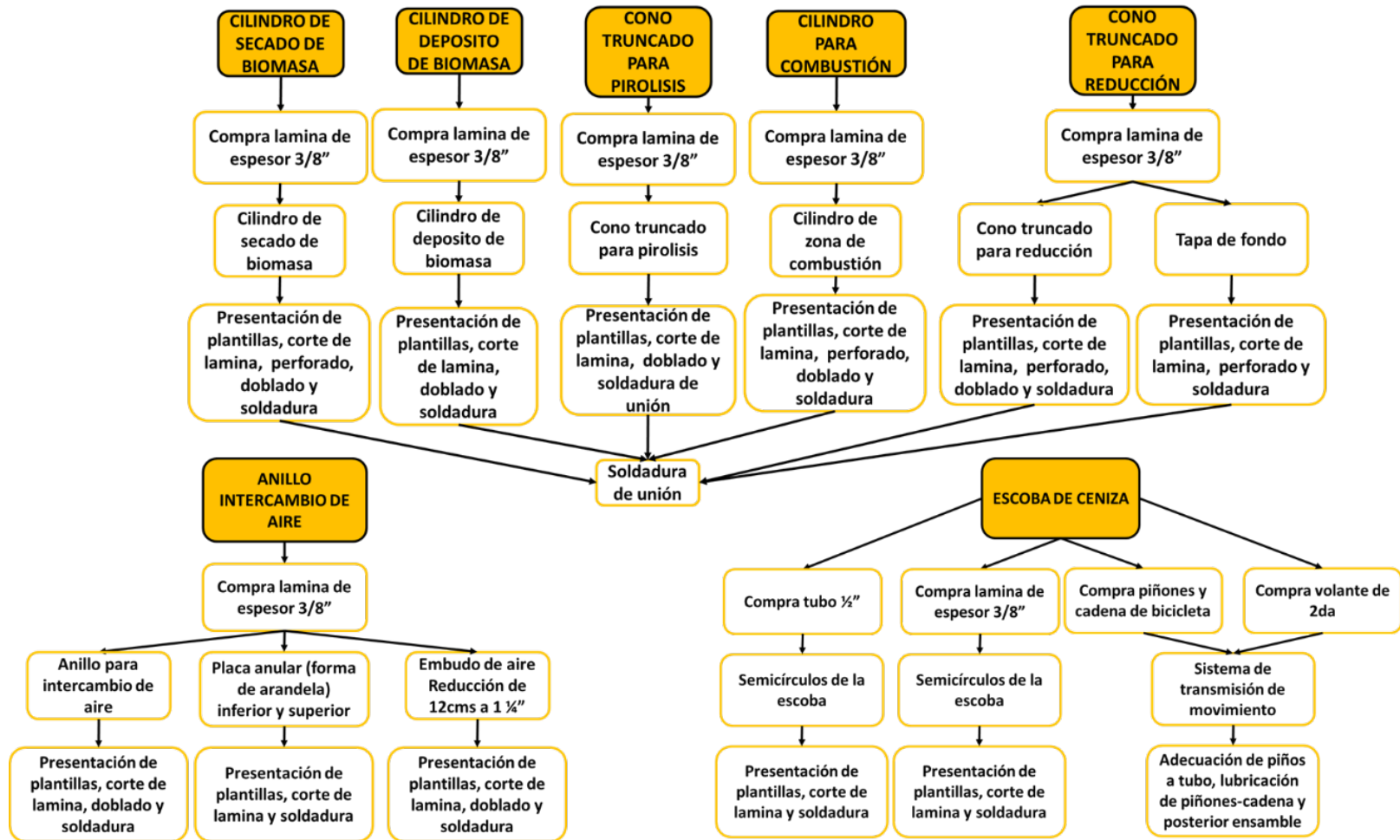
Anexo 1 Esquema del paso a paso en el diseño de un gasificador de bagazo de caña de azúcar



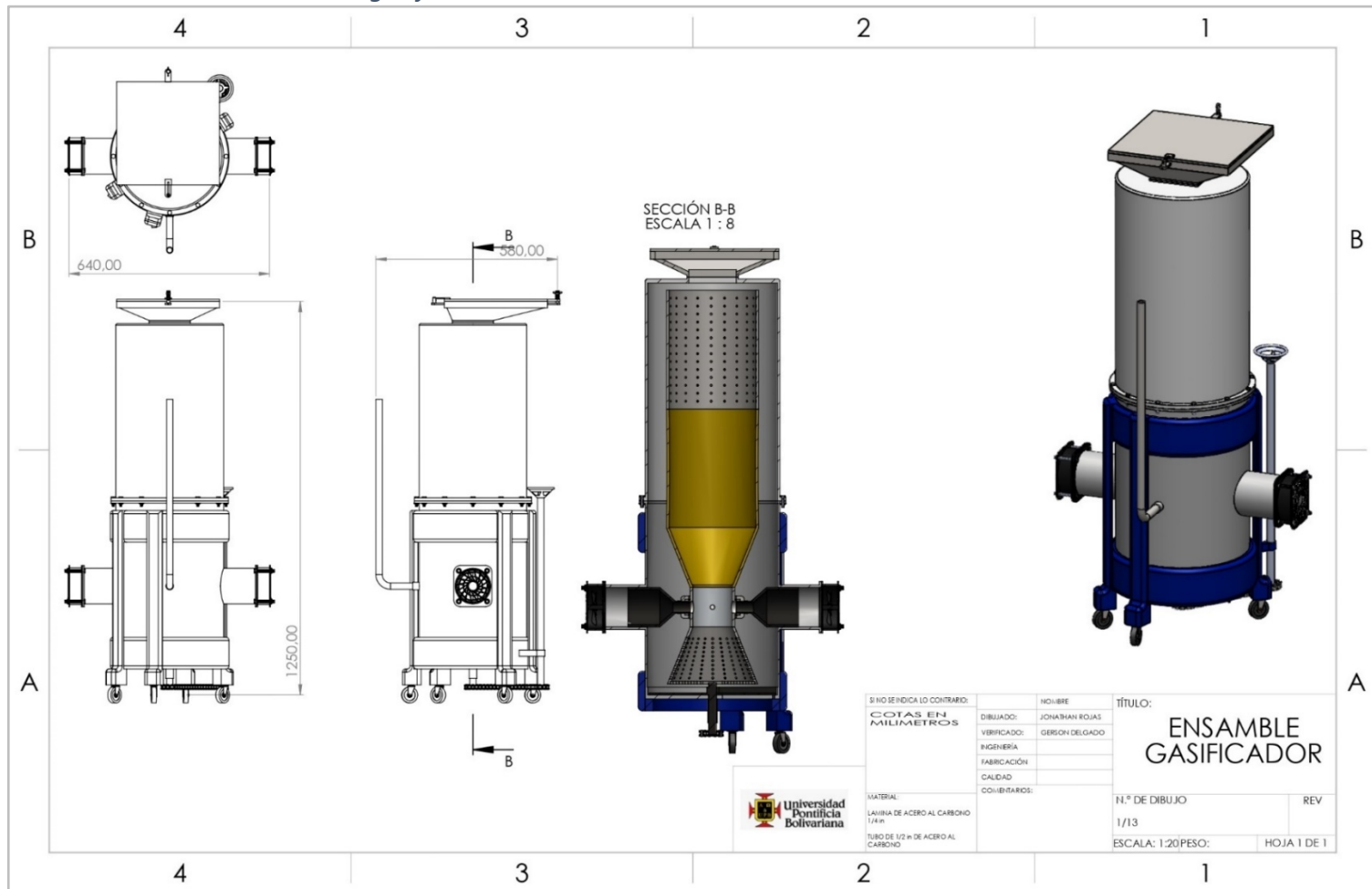
Anexo 2 Diagrama de operaciones de ensamble y manufactura para cuerpo exterior



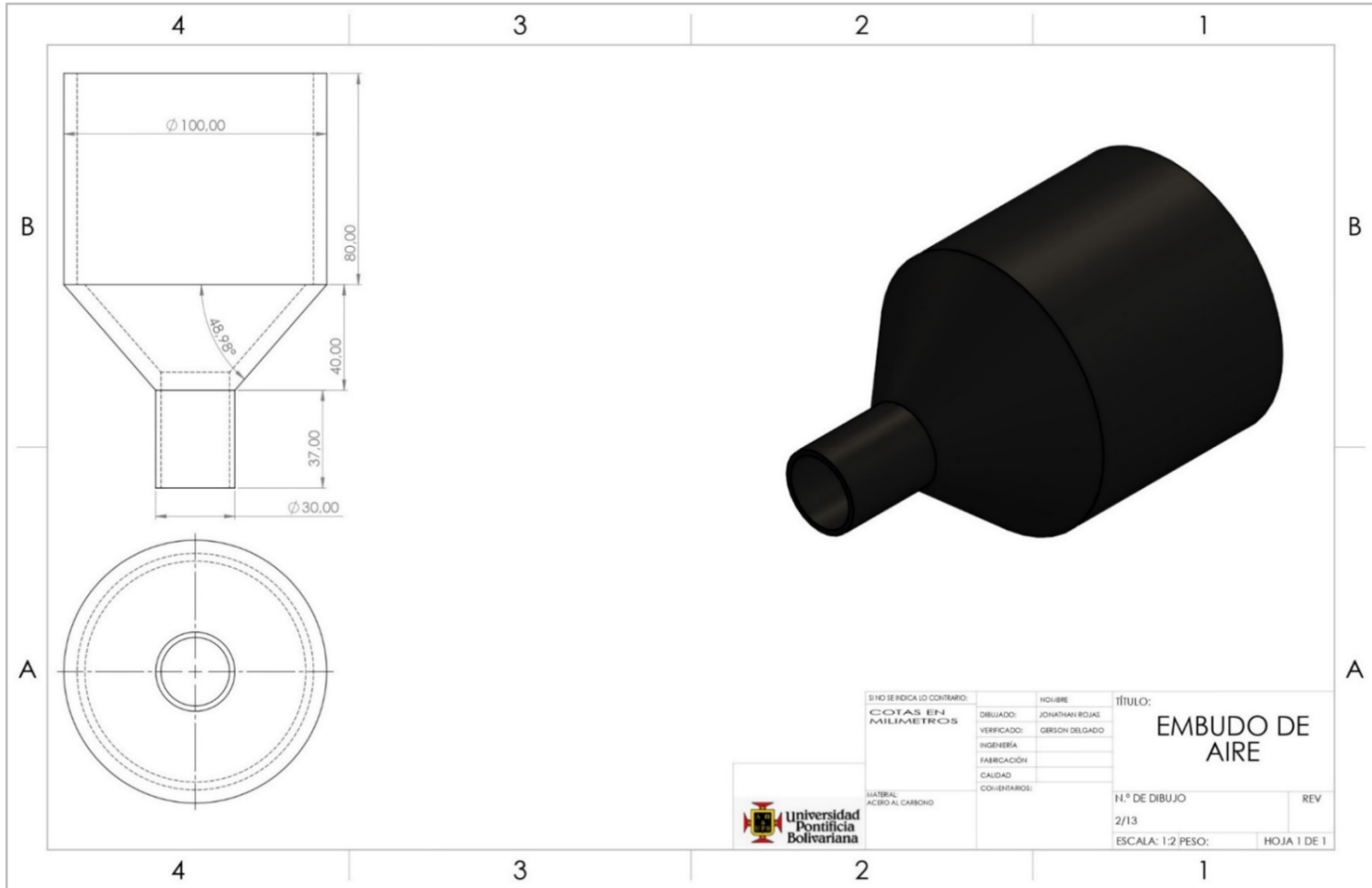
Anexo 3 Diagrama de operaciones de ensamble y manufactura para cuerpo interior



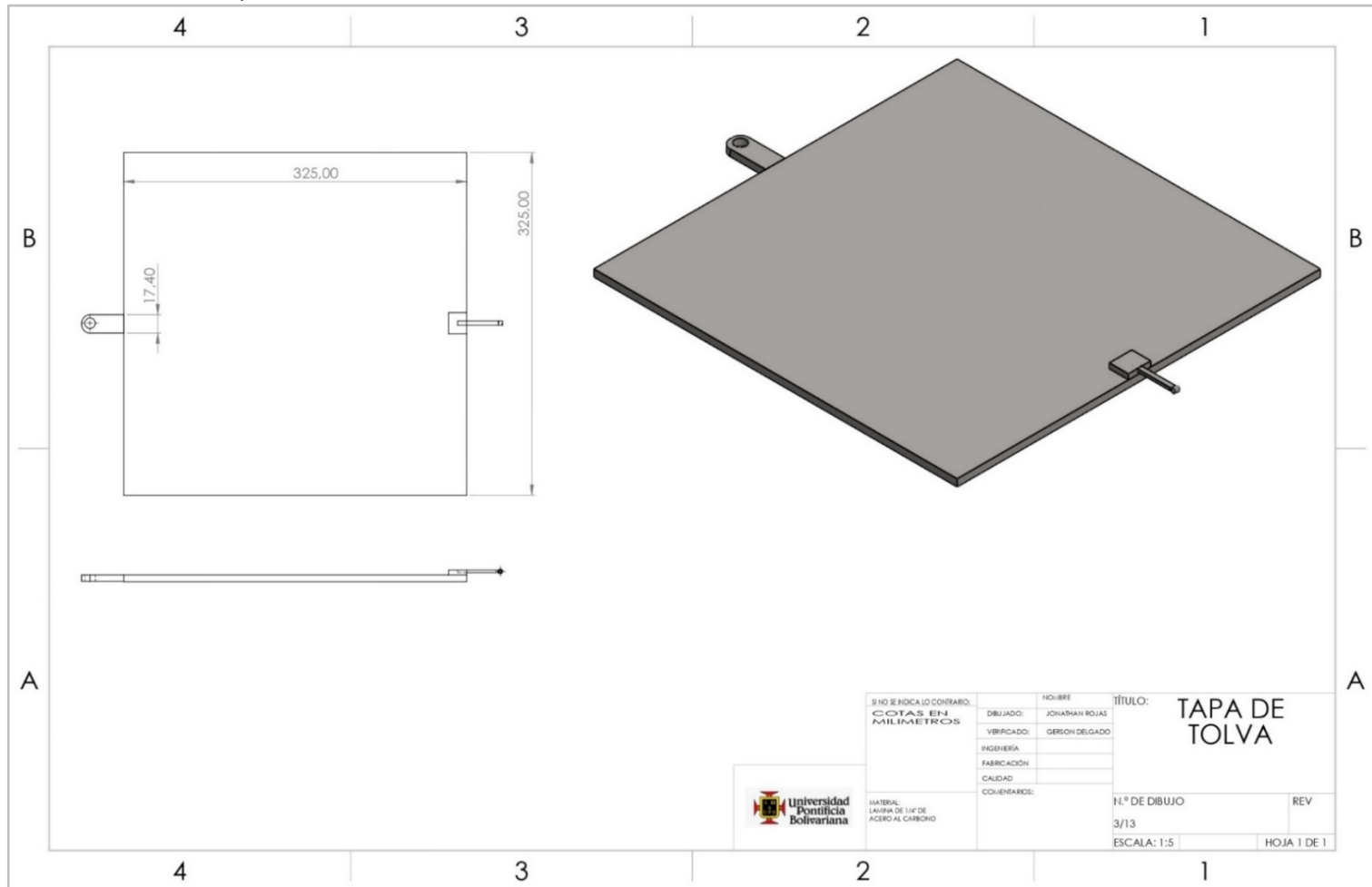
Anexo 4 Planos CAD de ensamble de gasificador



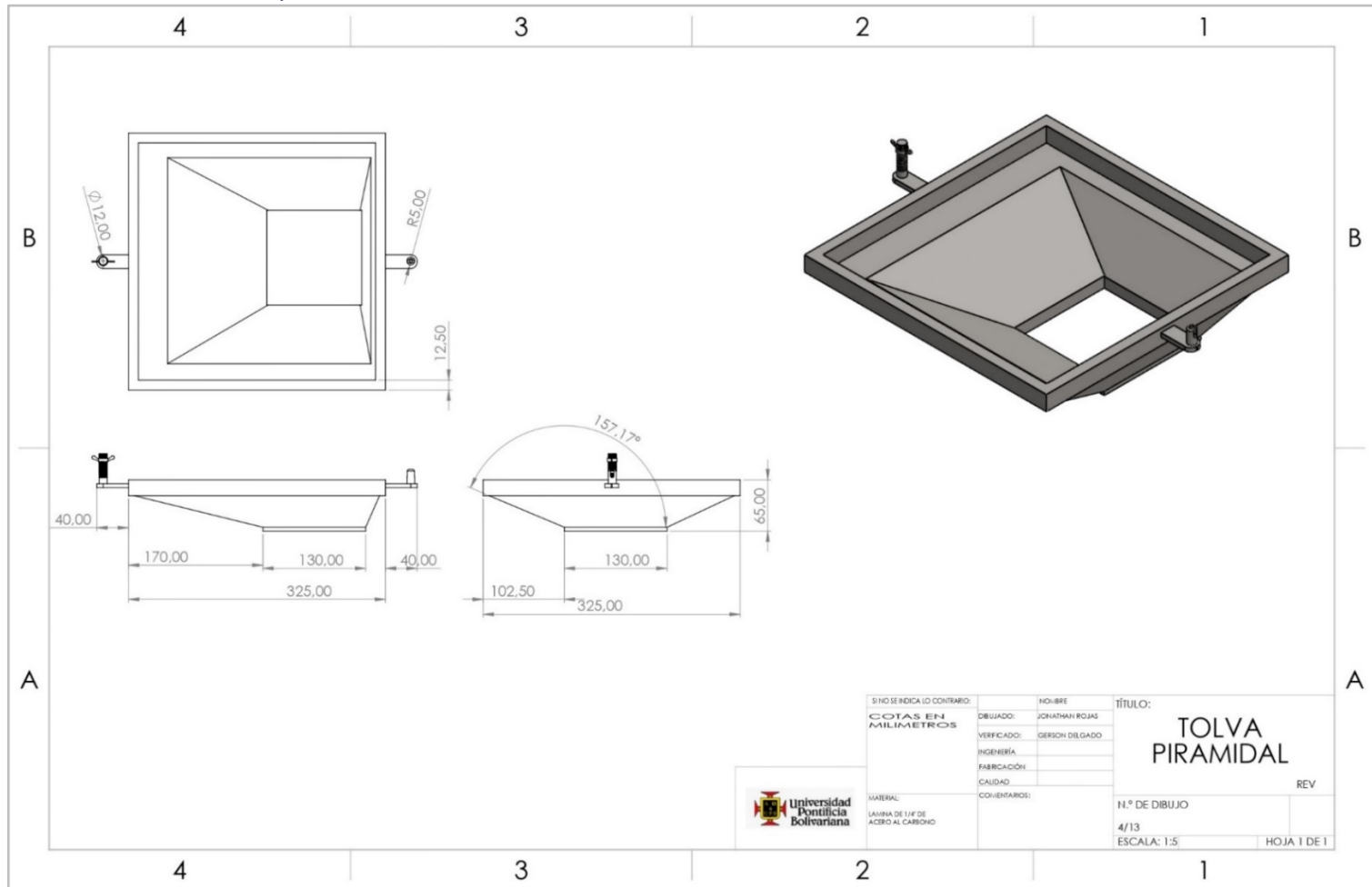
Anexo 5 Planos CAD de embudo de aire



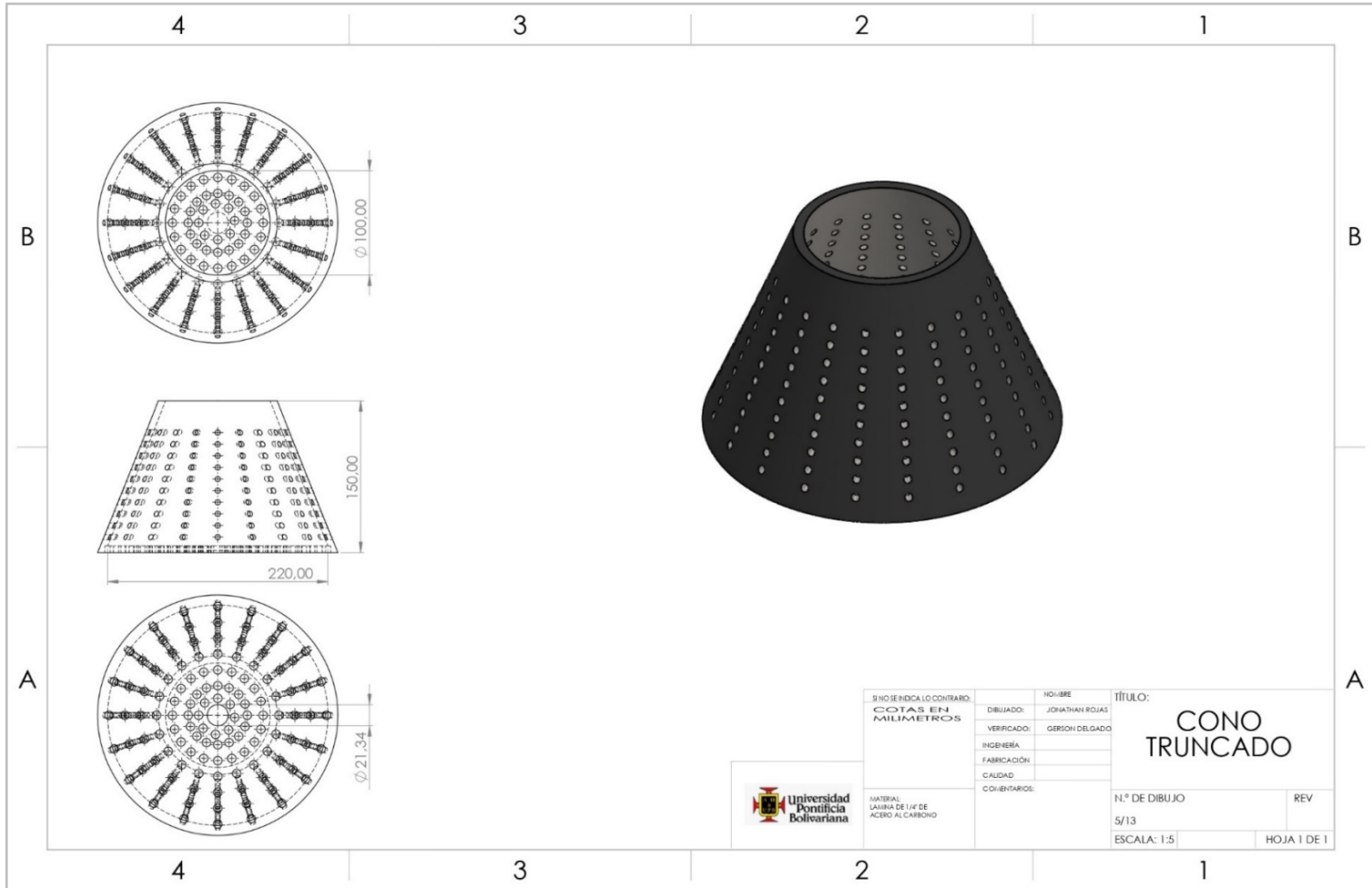
Anexo 6 Planos CAD de tapa de tolva



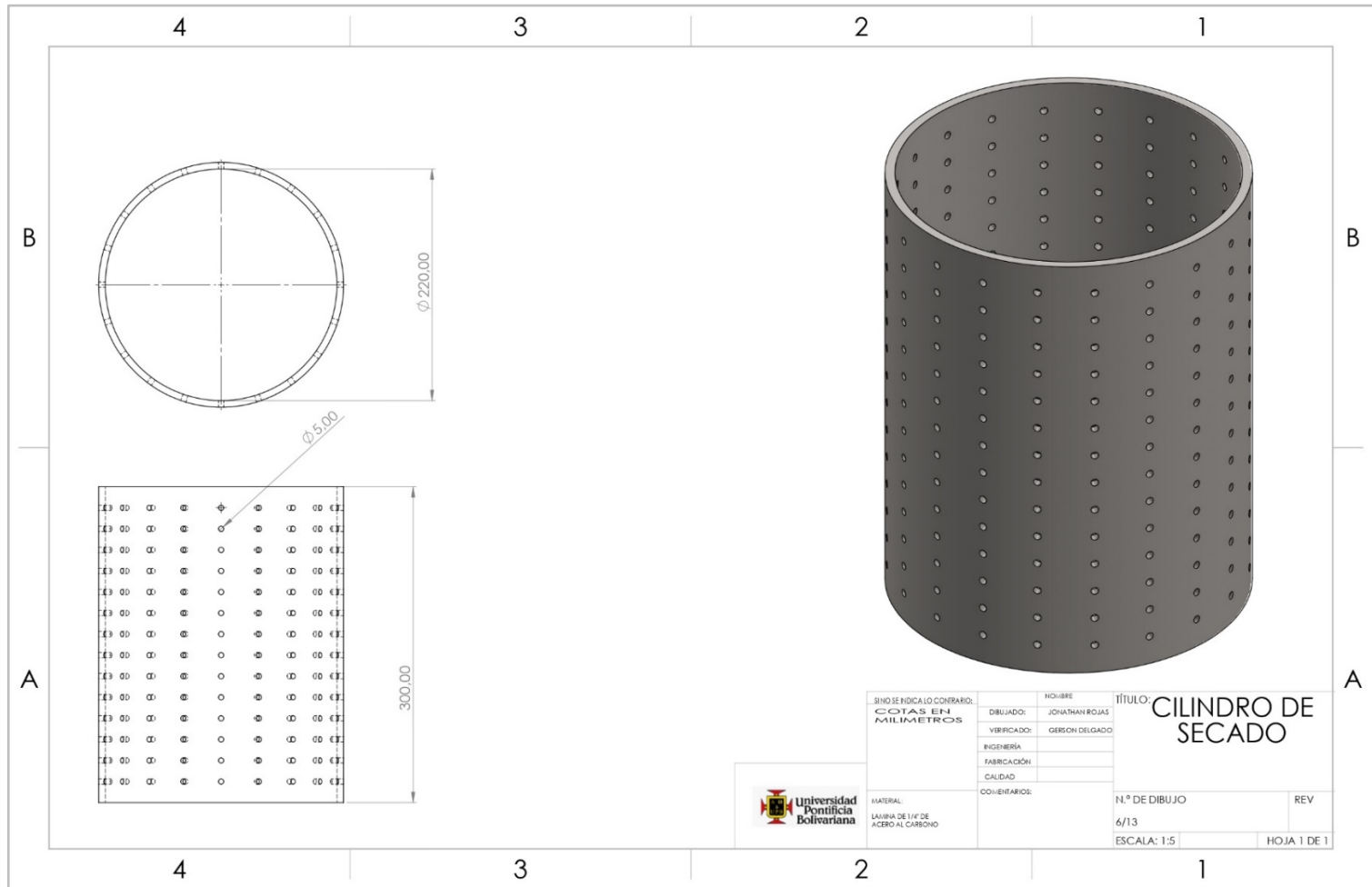
Anexo 7 Planos CAD de tolva piramidal



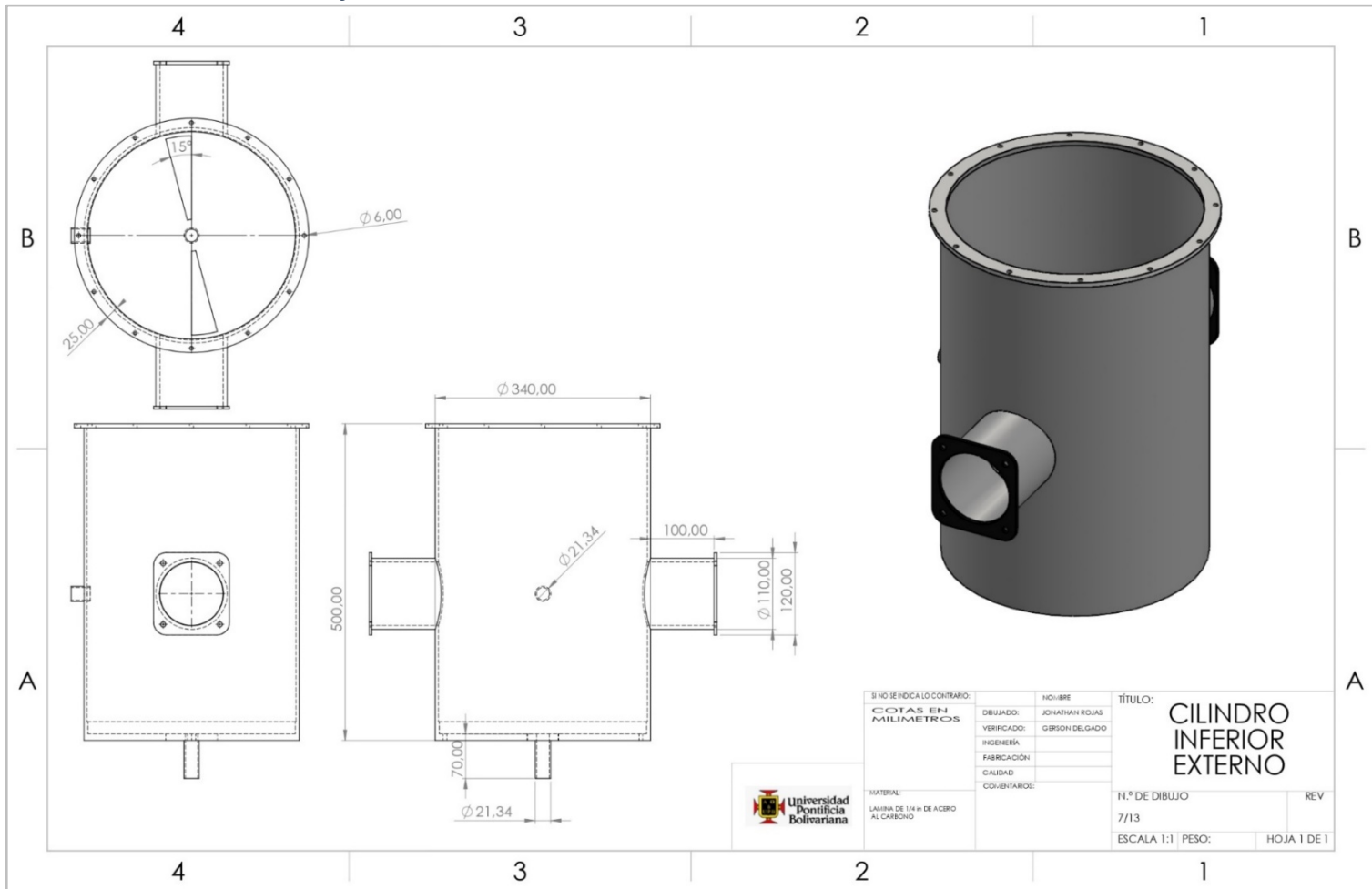
Anexo 8 Planos CAD de cono truncado



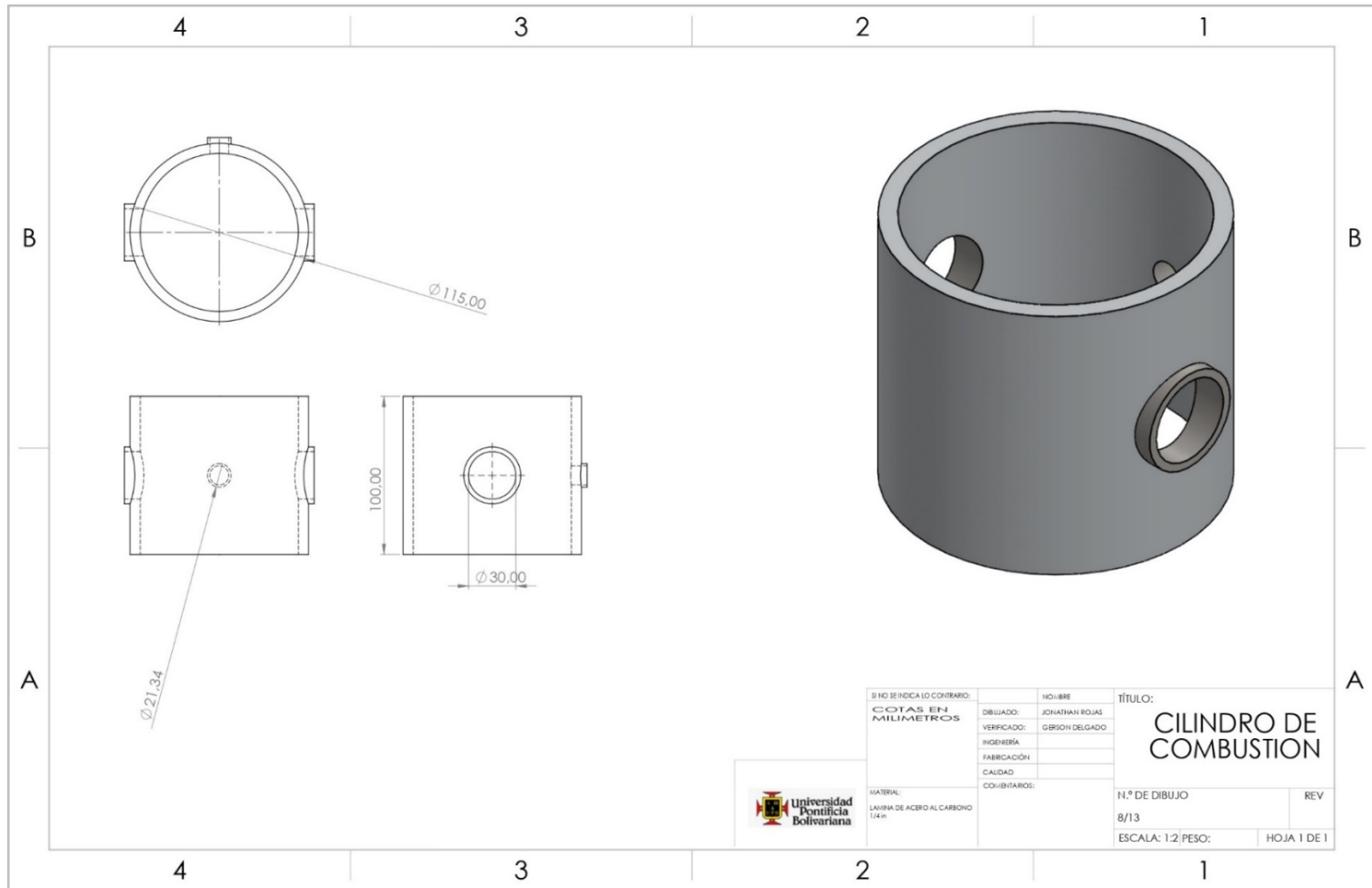
Anexo 9 Planos CAD de cilindro de secado



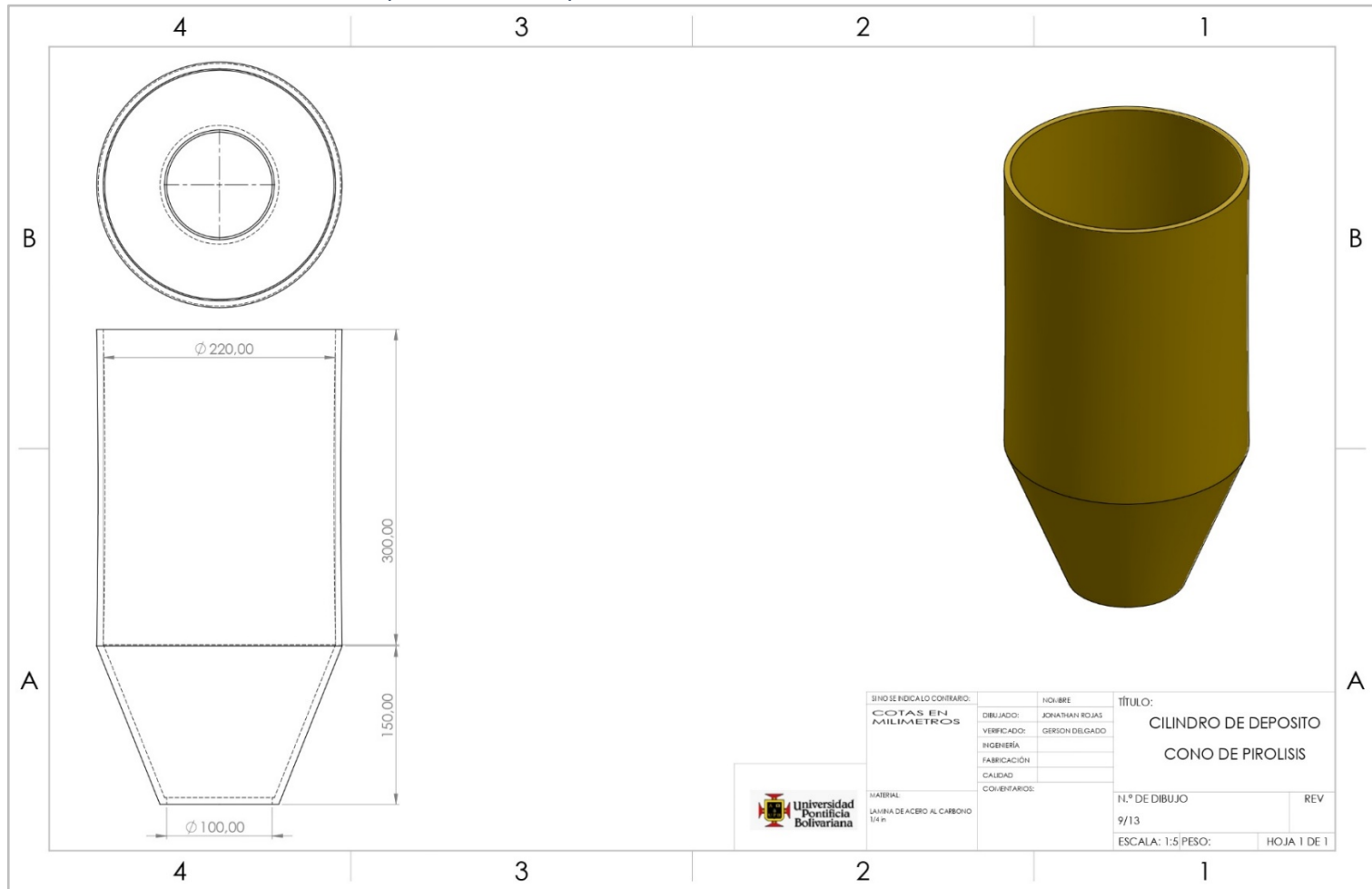
Anexo 10 Planos CAD de cilindro inferior externo



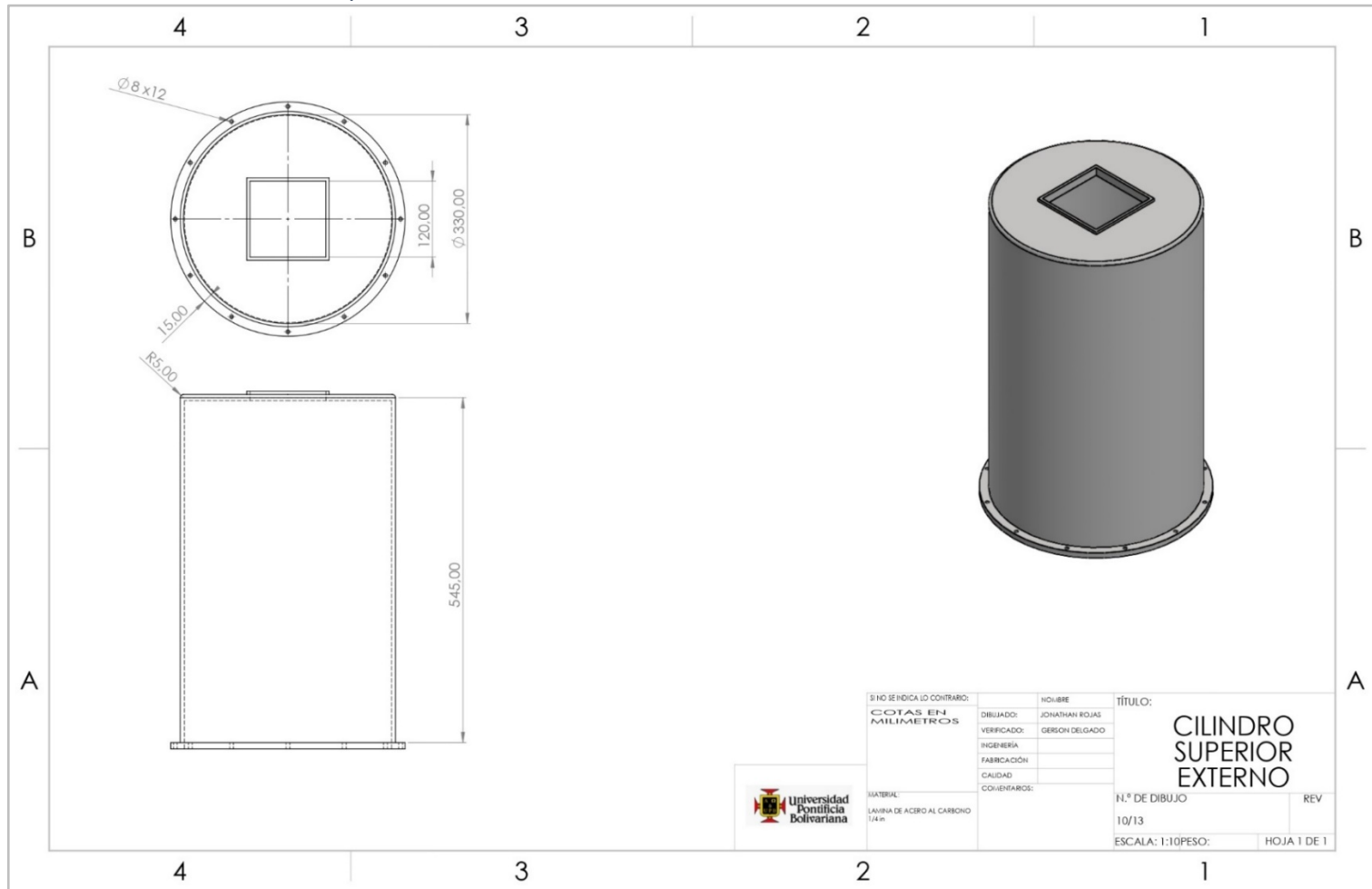
Anexo 11 Planos CAD de cilindro de combustión



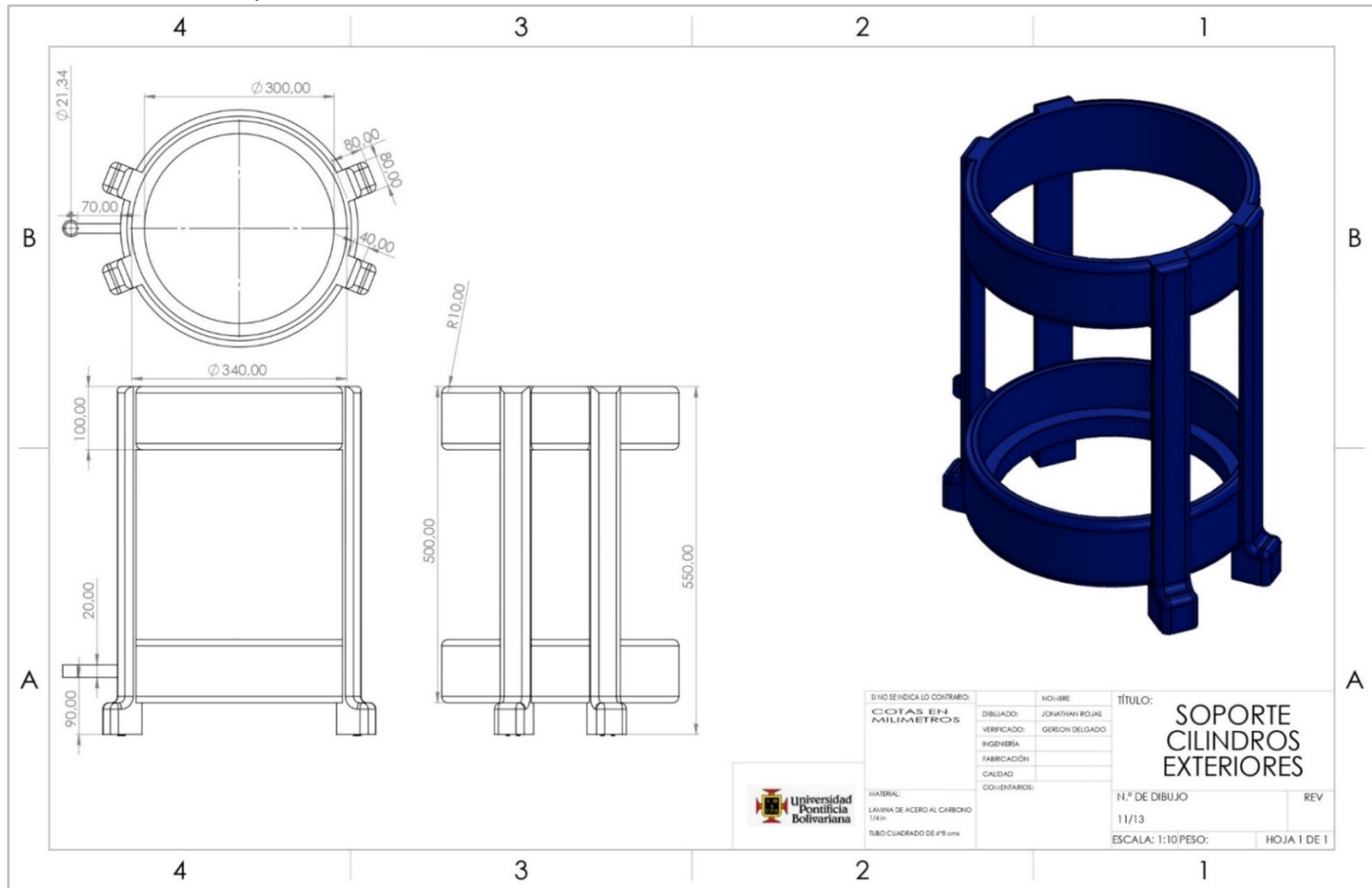
Anexo 12 Planos CAD de cilindro de depósito-cono de pirolisis



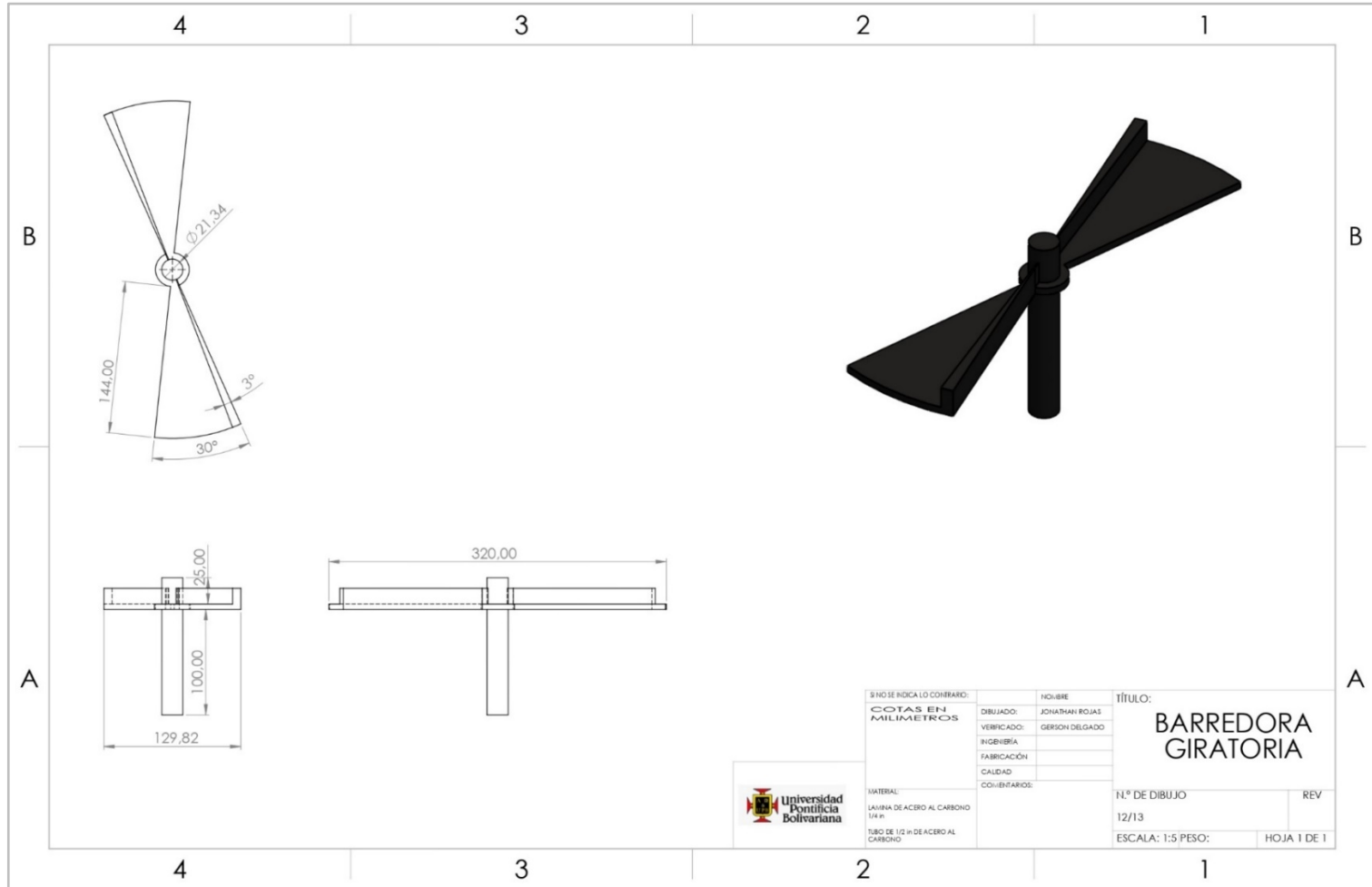
Anexo 13 Planos CAD de cilindro superior externo



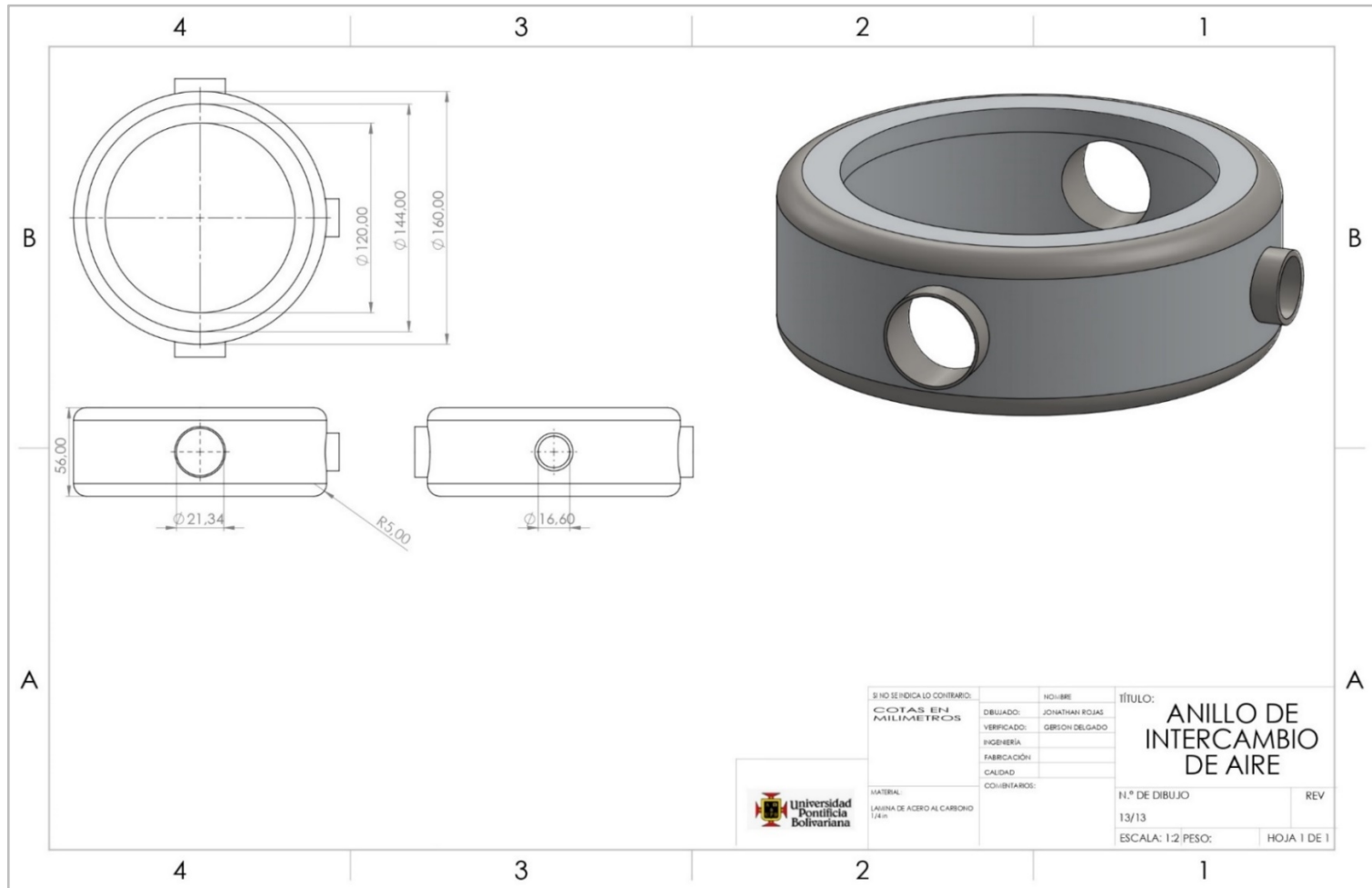
Anexo 14 Planos CAD de soporte cilindros exteriores



Anexo 15 Planos CAD de barredora giratoria



Anexo 16 Planos CAD de anillo de intercambio de aire



Anexo 17 Cotización completa de empresa Influmax parte 1



Bucaramanga, 12 de Agosto de 2021  
Cotización

**Ing. Jonathan Rojas**  
**Universidad Pontificia**  
**Bucaramanga**

**Asunto:**

Propuesta de construcción de gasificador para bagazo de caña de azúcar.

**Alcance:**

1. Suministro de material de acuerdo a los planos enviados por el diseñador.
2. Construcción de componentes internos y externos del sistema gasificador.
3. Montaje de componentes de acuerdo a planos de ensamble suministrados por el cliente.
4. Entrega de equipo en sede UPB Bucaramanga (Floridablanca).

**Propuesta Comercial:**

PROPUESTA COMERCIAL					
ITEM	CANT	UNIDAD	DESCRIPCION	V. UNIT	V. TOTAL
1	1	glb	Construcción de gasificador para bagazo de caña de azúcar, de acuerdo a diseño y materiales especificados en planos de 1 al 12 suministrados por el cliente. Plano 1: Cono truncado zona de reducción Plano 2: Embudo de aire Plano 3: Soporte cilindros exterior Plano 4: Tapa tolva Plano 5: Tolva piramidal Plano 6: Anillo de salida de aire Plano 7: Barredora Plano 8: Cilindro de combustión Plano 9: Cilindro de depósito y cono truncado de pirolisis. Plano 10: Cilindro de secado Plano 11: Cilindro inferior externo Plano 12: Cilindro superior externo	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$ 8.000.000</b>	<b>\$ 8.000.000</b>
<b>IVA</b>				<b>\$ 1.520.000</b>	<b>\$ 1.520.000</b>
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 9.520.000</b>	<b>\$ 9.520.000</b>

Anexo 18 Cotización completa de empresa Influmax parte 2



**Condiciones comerciales**

<b>Valor Total:</b>	\$ 9.520.000 – (VALORES CON IVA).
<b>Forma de pago:</b>	50% para inicio de construcción 50% contra entrega
<b>Tiempo de entrega:</b>	6 semanas
<b>Garantías:</b>	6 meses por defectos o rotura de partes
<b>Lugar de entrega:</b>	Floridablanca

**Exclusiones y Notas aclaratorias:**

1. Los componentes cotizados en la presente propuesta, son de acuerdo a los planos suministrados por el cliente, materiales, dimensiones y tolerancias.
2. El ensamble del equipo, será de acuerdo a las indicaciones suministradas por el cliente.
3. No se generaran pruebas de gasificación, esto será a cargo del cliente
4. El equipo se entregara en sitio UPB Floridablanca
5. Cualquier cambio a los requerimientos presentados modificará la cotización.

**Validez de la oferta:**

30 Días contados a partir de la fecha de entrega de este documento.

Esperamos la propuesta aquí expresada sea de su agrado y de igual manera cumpla a satisfacción los requerimientos que ustedes desean.

Saludos Cordiales.

Atentamente



Omar Fernando Gómez Landazábal  
Gte Gral INFLUMAX SAS  
Nit 900.885.460-7  
Cel: 3168200182 / 6826420