



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: KLEBER JEANPIERRE PAZMIÑO CARRERA**

**JOSUE JOB MORANTE ANASTACIO**

**TUTOR: PhD. JUAN CARLOS LATA GARCÍA**

Guayaquil – Ecuador

**2023**

## **CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Kleber Jeanpierre Pazmiño Carrera con documento de identificación 1207736941 y Josué Job Morante Anastacio con documento de identificación 1207961374, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 22 de febrero del año 2023


Atentamente,



---

Kleber Jeanpierre Pazmiño Carrera

1207736941



---

Josué Job Morante Anastacio

1207961374

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.**

Nosotros, Kleber Jeanpierre Pazmiño Carrera con documento de identificación 1207736941 y Josué Job Morante Anastacio con documento de identificación 1207961374, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del Trabajo de titulación: “Estudio de factibilidad de un gasificador de biomasa”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en forma digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de febrero del año 2023

Atentamente,



Kleber Jeanpierre Pazmiño Carrera

1207736941



Josué Job Morante Anastacio

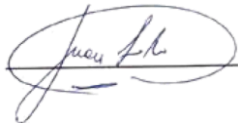
1207961374

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, JUAN CARLOS LATA GARCÍA con documento de identificación 0301791893, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “Estudio de factibilidad de un gasificador de biomasa” realizado por Kleber Jeanpierre Pazmiño Carrera con documento de identificación 1207736941 y Josué Job Morante Anastacio con documento de identificación 1207961374, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de PROYECTO TÉCNICO que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de febrero del año 2023

Atentamente,



---

PhD. JUAN CARLOS LATA GARCÍA

0301791893

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO**

### **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de tesis a mi papá Kleber Pazmiño, a mi mamá Cecilia Carrera, por mantenerse siempre presentes en el transcurso de mi carrera para obtener el título de ingeniero eléctrico, inculcando sus valores en mí, indicando el camino correcto por el cual debía ir, siendo pilares fundamentales a lo largo de mi vida brindando su incondicional apoyo con sus sabios consejos, ellos son testigos del sacrificio y largo camino que he recorrido el cual está llegando a su fin.

Kleber Jeanpierre Pazmiño Carrera

### **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por la vida y salud que me ha brindado, y así haber llegado hasta el final de mi carrera después de 5 años y por sus bendiciones diarias.

Agradezco a mis padres quienes con su apoyo, sacrificio y consejos incondicionales me han ayudado para poder culminar mi carrera universitaria, a nuestro tutor el Ing. Juan Carlos Lata que con sus conocimientos nos supo guiar para la elaboración de este proyecto.

Kleber Jeanpierre Pazmiño Carrera

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de tesis a Dios quien ha sido el que ha dado la fuerza y guía para poder lograr este objetivo en mi vida. A mi familia en general por ser el motor en mi vida y mi gran inspiración, sobre todo a mis padres por sus valores inculcados y enseñanzas de vida que hoy en día me han colocado en este lugar, universidad y carrera para así poder obtener el título de ingeniería eléctrica que un día fue una ilusión hoy ya es una meta realizada.

Josué Job Morante Anastacio

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, me gustaría agradecer a la universidad por pedirme tanto y al mismo tiempo permitirme obtener mi tan anhelado título. Agradezco el trabajo y la gestión de todos los directivos. Sin ella no hay base ni condición para el aprendizaje del conocimiento.

Agradezco mucho la dedicación y paciencia del tutor, sin sus palabras y sus precisas correcciones no habríamos llegado a este caso tan esperado. Gracias por su orientación y todos sus consejos, siempre será recordado en mi futura vida profesional.

Josué Job Morante Anastacio

## **RESUMEN**

En la actualidad la contaminación ambiental es un asunto bastante discutido acerca de los problemas que esta ocasiona, problemas graves que dañan a los seres humanos, el calentamiento global es el principal problema que perjudica al planeta, la huella de carbono, por ejemplo, es el conjunto de emisiones de gases invernadero producidos precisamente por personas, industrias o eventos, que sirve como una valiosa herramienta para llevar el control de las acciones y conductas que aportan a la creación de las emisiones y así poder determinar cómo mejorar y emplear los recursos de una manera más eficiente. Los países que pertenecen al G-8 se colocaron la meta de disminuir el calentamiento global entre los años dos mil diez y dos mil cincuenta a solo dos grados superando los niveles conocidos antes de la revolución industrial. Por tal motivo, han surgido diversas alternativas de solución a estos problemas, una de ellas es utilizar el potencial energético térmico de los residuos sobrantes usando equipamiento como un gasificador de biomasa, que nos permitirá obtener combustible de la incineración de biomasa.

En este proyecto se construyó un prototipo de un gasificador de biomasa, que es un reactor termoquímico donde ocurren varios procesos químicos y físicos complejos, la gasificación es un procedimiento que gracias a él se obtiene un combustible gaseoso mediante un combustible sólido y este combustible sólido puede ser de origen vegetal; aquí, es donde entra la biomasa. El combustible gaseoso que nos resulta del gasificador de biomasa se utilizaría con fines energéticos para la producción de electricidad.

Con los resultados obtenidos en el software Homer Pro después de realizar la simulación de la producción de energía a través del biogás se determinó que es bastante factible con el \$0.134 (\$/kWh) es mayor que el costo convencional, pero estamos hablando de una energía limpia.

### **Palabras claves:**

Contaminación Ambiental, Biomasa, Potencial Energético, Gasificador, Combustible.

## **ABSTRACT**

At present, environmental pollution is a widely discussed topic about the problems it causes, serious problems that harm human beings, global warming is the main problem that harms the planet, the carbon footprint, for example, is the set of greenhouse gas emissions produced precisely by people, industries or events, which serves as a valuable tool to keep track of the actions and behaviors that contribute to the creation of emissions and thus be able to determine how to improve and use the resources of a more efficient way. The countries that belong to the G-8 set themselves the goal of reducing global warming between the years 2010 and 2050 to just two degrees above the levels known before the industrial revolution. For this reason, various alternative solutions to these problems have emerged, one of which is to use the thermal energy potential of excess waste using equipment such as a biomass gasifier, which will allow us to obtain fuel from biomass incineration.

In this project, a prototype of a biomass gasifier was built, which is a thermochemical reactor where several complex chemical and physical processes occur, gasification is a procedure that thanks to it a gaseous fuel is obtained by means of a solid fuel and this solid fuel can be of vegetable origin; This is where the biomass comes in. The gaseous fuel that results from the biomass gasifier would be used for energy purposes for the production of electricity.

With the results obtained in the Homer Pro software after carrying out the simulation of energy production through biogas, it is limited that it is quite feasible with \$0.134 (\$/kWh) is higher than the conventional cost, but we are talking about an energy clean.

### **Keywords:**

Environmental Pollution, Biomass, Energy Potential, Gasifier, Fuel.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iv
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO .....	v
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
ACRÓNIMOS .....	xvii
CAPITULO 1 .....	1
1.1    INTRODUCCIÓN .....	1
1.2    PROBLEMA .....	2
1.3    ANTECEDENTES .....	3
1.4    JUSTIFICACIÓN .....	3
1.5    DELIMITACIÓN .....	3
1.6    BENEFICIARIOS .....	4
1.7    OBJETIVOS .....	4

1.7.1	Objetivo general .....	4
1.7.2	Objetivos específicos .....	4
CAPITULO 2 .....		5
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	5
2.1	Biomasa .....	6
2.2	Proceso de Gasificación .....	8
2.2.1	Poder calorífico de la materia prima.....	10
2.2.1.1	Poder Calorífico Superior o Bruto (HHV): .....	10
2.2.1.2	Poder Calorífico Inferior o Neto (LHV): .....	10
2.3	Etapas de gasificación.....	11
2.3.1	Secado.....	12
2.3.1.1	Secado directo .....	12
2.3.1.2	Secado indirecto .....	12
2.3.2	Pirolisis .....	13
2.3.2.1	Sólido .....	13
2.3.2.2	Líquido .....	13
2.3.2.3	Gaseoso .....	14
2.3.3	Oxidación .....	14
2.3.4	Reducción .....	14
2.4	Tipos de gasificador .....	15
2.4.1	Gasificador de lecho fijo.....	16
2.4.1.1	Gasificador de lecho fijo de flujo descendente:.....	16

2.4.1.2	Gasificador de lecho fijo de flujo ascendente: .....	17
2.4.2	Gasificador de lecho fijo en corriente cruzada .....	17
2.4.3	Gasificador de lecho fluidizado .....	18
2.4.3.1	Gasificador de lecho fluidizado burbujeante .....	19
2.4.3.2	Gasificador de lecho fluidizado circulante .....	19
2.4.4	Gasificador de lecho arrastrado .....	20
2.5	Partes del gasificador .....	20
2.5.1	Contenedor o tolva de combustible (biomasa): .....	20
2.5.2	Hogar .....	21
Capítulo 3	.....	22
3	MARCO METODOLÓGICO .....	22
3.1	Metodología y medios.....	22
3.2	Selección del diseño del prototipo de gasificador .....	23
3.3	Selección de materiales.....	24
3.4	Diseño del prototipo.....	27
3.5	Guías de prácticas .....	30
3.5.1	Práctica #1 proceso de gasificación con cascarilla de maíz .....	30
3.5.2	Práctica #2 proceso de gasificación con cascarilla de maíz .....	32
3.5.3	Práctica #3 proceso de gasificación con virutas de madera.....	33
3.5.4	Práctica #4 proceso de gasificación prototipo 2 .....	35
3.5.5	Prueba #5 proceso de gasificación con viruta de madera .....	37
Capítulo 4	.....	41

4	Pruebas y resultados .....	41
4.1	Resultado: Práctica #1.....	43
4.2	Resultado: Práctica #2.....	43
4.3	Resultado: Práctica #3.....	44
4.4	Resultado: Práctica #4.....	44
4.5	Resultado: Práctica #5.....	45
4.6	Resultado: Práctica #6.....	48
4.7	Gráfico de resultados .....	50
4.8	Estudio de factibilidad .....	51
Capítulo 5	.....	53
5.1	Cronograma .....	53
5.2	Presupuesto .....	57
Capítulo 6	.....	58
6.1	Conclusiones.....	58
6.2	Recomendaciones .....	58
Capítulo 7	.....	59
7.1	Referencias bibliográficas.....	59
Anexos	.....	61

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración No.1: Ubicación Geográfica de la Universidad Politécnica Salesiana .....	3
Ilustración No. 2: Producción de energía eléctrica .....	5
Ilustración No. 3: Etapas de gasificación .....	12
Ilustración No. 4: Proceso de secado .....	13
Ilustración No. 5: Composición del gas en diferentes atmosferas de gasificación.....	15
Ilustración No. 6: Esquema de un gasificador de lecho fijo de flujo descendente .....	16
Ilustración No. 7: Esquema de un gasificador de lecho fijo de flujo ascendente .....	17
Ilustración No. 8: Funcionamiento del gasificador de lecho fijo en corriente cruzada ..	18
Ilustración No. 9: Gasificador de lecho fluidizado burbujeante .....	19
Ilustración No. 10: Gasificador de lecho fluidizado circulante .....	20
Ilustración No. 11: Elaboración del Hogar del gasificador .....	25
Ilustración No. 13: Estructura de la tolva de biomasa .....	26
Ilustración No. 16: Filtro de gas .....	27
Ilustración No. 17: Contenedor o tolva de biomasa .....	28
Ilustración No. 18: Entrada del agente gasificador.....	28
Ilustración No. 19: Hogar del gasificador .....	28
Ilustración No. 20: Diseño final del prototipo del gasificador .....	29
Ilustración No. 21: Filtro de agua .....	30
Ilustración No. 22: Encendido del gasificador primera practica .....	31
Ilustración No. 23: Temperatura primera práctica.....	31
Ilustración No. 24: Resultado de la primera Práctica .....	32

Ilustración No. 25: Temperatura ambiente segunda práctica .....	32
Ilustración No. 26: Resultado segunda práctica .....	33
Ilustración No. 27: Cantidad de biomasa utilizada.....	34
Ilustración No. 28: Medición de temperatura Práctica #3 .....	34
Ilustración No. 29: Desconexión de la Varilla de cobre.....	35
Ilustración No. 30: Segundo prototipo de gasificador .....	35
Ilustración No. 31: Válvula de paso .....	36
Ilustración No. 32: Temperatura ambiente práctica #4 .....	36
Ilustración No. 33: Acople hidráulico .....	37
Ilustración No. 34: Acople hidráulico en la tolva de biomasa.....	37
Ilustración No. 35: Acople hidráulico en el filtro de agua .....	38
Ilustración No. 36: Temperatura ambiente de la práctica #5.....	38
Ilustración No. 37: Ingreso del gas al filtro de agua.....	39
Ilustración No. 38: Llama obtenida en la práctica #5.....	39
Ilustración No. 39: Filtro de agua al finalizar la práctica #5 .....	40
Ilustración No. 40: Tolva de biomasa al finalizar la práctica #5 .....	40
Ilustración No. 41: Tubo de bicicleta .....	41
Ilustración No. 43: Conexión del tubo a la salida de gases .....	42
Ilustración No. 44: Prototipo del gasificador para recolección del gas .....	42
Ilustración No. 46: Recolección del gas con virutas de madera.....	46
Ilustración No. 47: Medición del gas empleando virutas de madera.....	47
Ilustración No. 48: Resultado en PSI con virutas de madera .....	47

Ilustración No. 49: Proceso de gasificación con cascarilla de maíz .....	48
Ilustración No. 50: Medición del gas empleando cascarilla de arroz .....	49
Ilustración No. 51: Resultado en PSI con cascarilla de maíz .....	49
Ilustración No. 52: Comparativa de biomosas .....	50
Ilustración No 53: Características del auto generador .....	51
Ilustración No. 54: Cantidad de toneladas de biomasa.....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Componentes del gas producto resultado de la gasificación de biomasa.....	8
Tabla 2: Características de la biomasa .....	10
Tabla 3: Especificaciones del agente de gasificación.....	22
Tabla 4: Especificaciones del gas producto de acuerdo al agente de gasificación .....	23



## ACRÓNIMOS

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

MJ: Mega Julios

MW: Megavatio

CIE: Corporación para la Investigación Energética

INER: Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables

H<sub>2</sub>: Dihidrógeno

CH<sub>4</sub>: Metano

CO: Monóxido de Carbono

N<sub>2</sub>: Nitrógeno

H<sub>2</sub>O: Agua

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

HCN: Cianuro de Hidrógeno

NH<sub>3</sub>: Amoníaco

HCL: Ácido Clorhídrico

NaCL: Cloruro de Sodio

KCL: Cloruro de Potasio

H<sub>2</sub>S: Ácido Sulfhídrico

CS<sub>2</sub>: Sulfuro de Carbono

COS: sulfuro de Carbonilo

SNG: Gas Natural Sintético

HHV: Poder Calorífico Superior o Bruto

LHV: Poder Calorífico Inferior o Neto

AMD: Astillas de madera dura

AMS: Astillas de madera suave

RE: Rango Establecido

Tar = Alquitrán

HC: Hidrocarburo

O<sub>2</sub>: Oxígeno

PSI: Libras por Pulgada Cuadrada

kW: Kilovatio

kWh/day: Kilovatio hora día

## CAPITULO 1

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Cuando se habla del planeta nos damos cuenta de que está en peligro esto tiene que ver con los excesivos por no decir exagerados daños que han afectado a lo extenso de la historia a los seres vivos, localizar una época en la cual los daños causados por nosotros los seres humanos no nos hayan pasado factura es difícil y casi imposible, consecuencias como inundaciones, movimientos sísmicos causadas principalmente por el calentamiento global [1].

Desde el apogeo del petróleo que trajo consigo la quema de combustibles fósiles, ha provocado que el efecto invernadero vaya en aumento gracias a las emisiones de los gases. Con esta visión de las cosas, usar energías renovables es realmente necesario, por ejemplo, podemos aprovechar la biomasa sólida usando una de las tecnologías disponibles como es la gasificación [2].

En la Universidad Politécnica Salesiana específicamente en la carrera para obtener el título de Ingeniero Eléctrico se ha incorporado materias específicamente conectadas con las energías renovables y así optimizar la utilización y generación de las mismas, lo que la universidad busca es generar alternativas eficientes pensando en el impacto ambiental [3].

Para realizar el proceso de transformar de manera termoquímica es necesario desarrollar combustión con carencia de oxígeno que tiene como principal objetivo realizar el cambio de combustible sólido (biomasa) a combustible gaseoso llamado gas de síntesis con un calor de combustión o poder calorífico que varía entre unos cuatro Mega Julios sobre metro cúbico ( $MJ/m^3$ ) y seis Mega Julios sobre metro cubico ( $MJ/m^3$ ) para la gasificación con aire, los motores de combustión interna alternativos pueden usar directamente el gas pobre y con la ayuda de un generador obtener energía eléctrica o mecánica [4].

Dicho gas de síntesis se lo puede usar para generar energía eléctrica, en los hogares como un sistema de calefacción, en el sector automotriz serviría como combustibles de vehículos y en las instalaciones industriales como fuente de calor [5]. Uno de los problemas más significativos de esta tecnología es cuando se forma el alquitrán, que tiene

la capacidad de causar el fallo de la gasificación debido al taponamiento de las válvulas y cañerías, además podría causar el daño de los equipos donde el gas será empleado [6].

Este proyecto conlleva diseñar un prototipo de un gasificador de aire para realizar el estudio del comportamiento del sistema en condiciones diferentes y con diferentes tipos de biomasa, después de realizar visitas técnicas constatamos que en las industrias estaban desperdiciando el recurso por ejemplo en las industrias arroceras el arroz después de ser pilado expulsa un desecho llamado tamo de arroz el cual viene a ser el sobrante agrícola más excesivo en el nuestro mundo con una obtención mundial estimada de un millardo de toneladas gracias a un censo realizado por la FAO [7], en las industrias que visitamos la cascarilla la incineraban en campo abierto, o la tiran en los bordes de las carreteras e incluso la tiran en los ríos cercanos a las industria.

En el capítulo 1 se indica la justificación, el porqué de lo que hacemos; la delimitación, lugar en donde realizamos el proyecto técnico; se define la problemática para la cual se describe la situación de las industrias; beneficiarios, personas que podrían utilizar el gasificador; y los objetivos de este proyecto técnico.

En el capítulo 2 se detalla un estudio bibliográfico de proyectos similares a la propuesta planteada, realizando un levantamiento de información, como es el proceso de gasificación térmica, sus etapas, los tipos de gasificadores y las partes principales de un termogasificador de lecho fijo.

En el capítulo 3 se presenta el diseño del prototipo gasificador de biomasa, cálculos de sus componentes después de realizar la selección de materiales a utilizar y pruebas previo al montaje. En el capítulo 4 se detalla la implementación, resultados obtenidos en las pruebas, los problemas y las ventajas que se no presentaron en el proyecto.

## **1.2 PROBLEMA**

En la actualidad aún existen industrias las cuales desconocen la generación de energía limpia mediante un proceso llamado pirolisis, usando residuos de su producción cotidiana para la obtención de energía limpia utilizando un recurso importante como lo es la biomasa y así evitar la contaminación de centrales eléctricas de generación que utilizan los combustibles fósiles tradicionales y cambiar el impacto ambiental de los mismos.

### 1.3 ANTECEDENTES

Después de realizar visitas técnicas a industrias arroceras, madereras encontramos que el recurso de biomasa proveniente del proceso de producción estaba siendo desperdiciado, debido a esto se va a realizar un estudio de factibilidad para determinar si es factible instalar un gasificador de biomasa para que así los dueños de dichas industrias cuenten con una alternativa de energía limpia.

### 1.4 JUSTIFICACIÓN

Evitar la contaminación de combustibles tradicionales empleados en la generación de energía, cambiar el impacto ambiental de los mismos aprovechando el recurso de biomasa, reducción de ruidos y la reducción de compra de combustibles, realizando un correcto estudio de factibilidad que nos permitirá analizar el beneficio de la biomasa a favor de nuestro planeta.

### 1.5 DELIMITACIÓN

El lugar donde se realizó el prototipo del gasificador de biomasa fue en el Laboratorio de Generación que se encuentra en el edificio E Campus Centenario Sede Guayaquil de la Universidad Politécnica Salesiana como se muestra en la ilustración No. 1, y las pruebas del gasificador se llevaron a cabo en la terraza del mismo Edificio, el tiempo estimado para realizar este proyecto técnico es de seis meses.

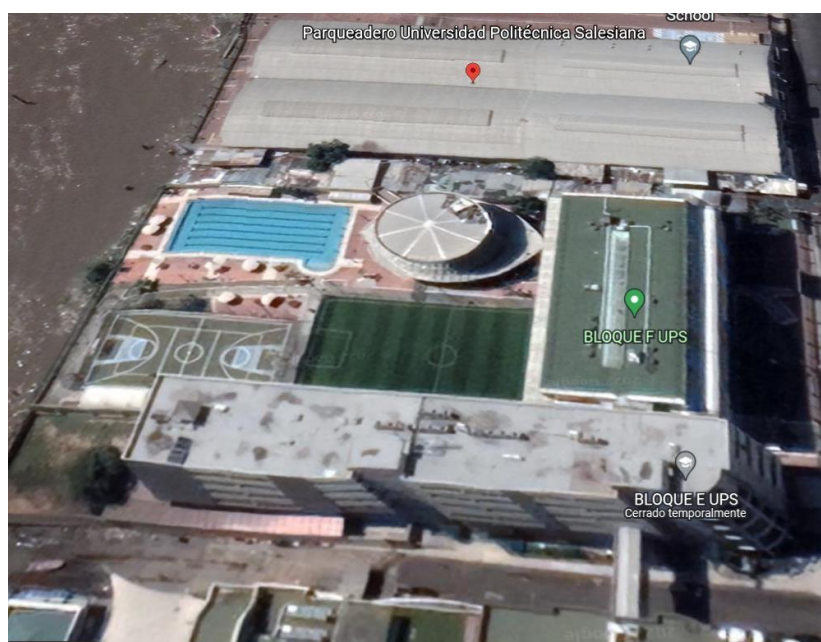


Ilustración No.1: Ubicación Geográfica de la Universidad Politécnica Salesiana.

Fuente: Google Earth

## **1.6 BENEFICIARIOS**

Los propietarios de las industrias, personas interesadas en contar con un servicio energético de su propia biomasa, para así no desperdiciarla sin ningún beneficio y que pueda ser utilizado para fines de producción o fines comerciales. Investigadores e industrias locales serán favorecidas con este proyecto, el cual brindara información experimental y teórica para que tengan conocimiento del gasificador de biomasa y los beneficios que obtendrían en sus industrias.

## **1.7 OBJETIVOS**

### **1.7.1 Objetivo general**

- Dimensionar de forma técnica la producción de un combustible alternativo y realizar el estudio de factibilidad en el proceso de gasificación con diferentes biomosas.

### **1.7.2 Objetivos específicos**

- Diseñar y elaborar un prototipo a escala de un gasificador de biomasa.
- Realizar pruebas en el gasificador con diferentes tipos de biomasa para la obtención de datos.
- Realizar una comparativa de los datos obtenidos para así determinar la eficiencia y factibilidad de la producción de energía mediante biomasa utilizando el programa “Homer Pro”.

## CAPITULO 2

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Como lo plantea Mario Bohórquez en su trabajo [8], la matriz energética con el paso del tiempo se ha diversificado tanto en la utilización de energías renovables como no renovables, destacando la termoeléctrica a partir de combustibles fósiles y de biomasa y la generación hidroeléctrica por ser una mayor fuente energética sostenible (ver ilustración No.2). Cabe recalcar que los altos mandos del gobierno incentivó una alteración radical en el sector energético con el plan de Expansión de Generación Eléctrica en el periodo de los años 2012 a 2021 que contemplo el aumento más revelador de la disposición de generación instalada, gracias a la implementación de grandes proyectos como lo son Delsitanisagua, Coca Codo Sinclair, Sopladora, Molino, Agoyán-San Francisco, Minas San Francisco, Mazar para obtener la cabida total de generación de 2660 MW con un financiamiento que superó los cinco mil millones de dólares.

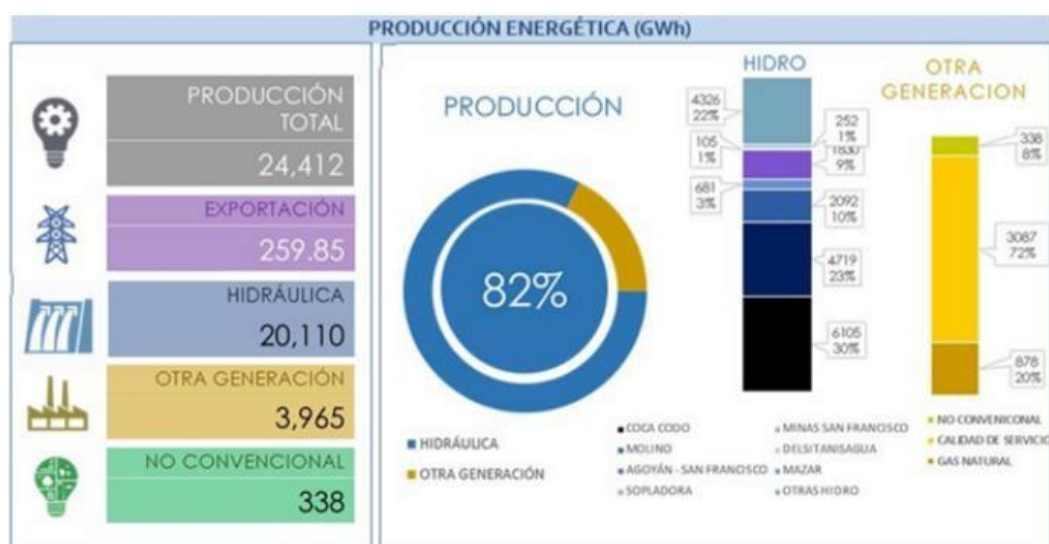


Ilustración No. 2: Producción de energía eléctrica

Fuente: [9]

Los autores K. Im-Orb, L. Simasatitkul, y A. Arpornwichanop [10] indican que la tasa en la actualidad de consumo de combustibles fósiles en el sector energético y el sector del transporte está aumentando rápidamente debido al espectacular crecimiento económico. Este factor disminuye la cantidad global de combustibles fósiles reservados. Además, el gas de emisión de la combustión motores también conduce a problemas de contaminación del aire. Por lo tanto, todos los países industrializados y en desarrollo legislan normas ambientales estrictas, leyes para limitar los niveles de emisión de gases contaminantes.

Así, buscando nuevos combustibles derivados de recursos energéticos renovables ha sido el foco de extensas investigaciones.

En este sentido, los autores I. Tobío-Pérez, Y. Díaz-Domínguez, M. Pfeil, D. Denfeld, R. Piloto-Rodríguez, y S. Pohl [11] plantean que con la biomasa la producción de energía es una elección tentadora, esto puede ayudar a reducir significativamente en sociedades en desarrollo el volumen de biomasa. La biomasa tiene un gran potencial de suministro energético, puesto que en muchos sectores de la industria agrícolas el proceso produce residuos sensibles a transformaciones termoquímicas y bioquímicas. La biomasa muestra un provecho sobre los combustibles derivados de petróleo, la cual es que ofrecen un constante abastecimiento de materia prima. Puede ser incinerada o gasificarse de manera muy parecida a los combustibles fósiles, usando parecidas tecnologías y especiales adaptaciones.

Para conseguir un sistema energético sostenible es necesario que los recursos energéticos sean maximizados para así lograr una eficiencia mayor y manejo de fuentes de energía renovables. Dicha Biomasa desde la antigüedad ha sido utilizada como fuente de calor por los seres humanos. Su elemento energético es originado por la disposición de los seres vivos para realizar la transformación de la energía producida por el sol en materia viva mediante el proceso de fotosíntesis y así constituirse como combustible.

Como menciona C. Espinoza en su trabajo [12], la biomasa simboliza una opción factible para el uso eléctrico en calderas de vapor, se realiza esta afirmación con el fundamento de que existen organismos que llevan a cabo indagaciones sobre este recurso, dichos organismos son la CIE y el INER; un modelo de lo mencionado anteriormente es el artículo llamado “Aprovechamiento energético de biomasa residual del piñón” el cual busca eliminar progresivamente el consumo de los procedentes del petróleo en la provincia de Galápagos ubicada al oeste de la costa ecuatoriana utilizando biomasa en la producción de biodiesel [2].

## **2.1 Biomasa**

La biomasa comprende un grupo variado de materias orgánicas, ya sea por su naturaleza como por su origen. En el ámbito energético, el concepto de biomasa se utiliza para nombrar una fuente renovable de energía que se fundamenta en la utilización de materia orgánica que se forma de manera biológica en un periodo continuo. Se considera a la



biomasa como energía renovable debido a que su capacidad energética procede al final de la energía solar que se fija gracias a los vegetales en el proceso de la fotosíntesis. La energía que es liberada cuando se rompen los enlaces de los compuestos orgánicos cuando ocurre el proceso de combustión, para obtener como resultado final agua y dióxido de carbono [13].

Por tal razón, se denomina biocombustibles a los productos utilizados para fines energéticos que proceden de la biomasa que pueden ser tanto eléctricos como térmicos. La biomasa viene a ser una elección formidable por dos motivos. La primera, porque se acomoda perfectamente en todos los parámetros de los usos actuales de los combustibles tradicionales; y la segunda es que, gracias a la biomasa se puede lograr conseguir una gran variedad de productos. Para que ocurra todo esto se debe llevar un proceso que es conocido como gasificación.

La biomasa fue la fuente primordial de energía para la humanidad hace solo 150 años, era de uso doméstico, industrial, etc. El consumo de este combustible fue disminuyendo progresivamente con el uso de carbón como y posteriormente reemplazado por el petróleo, teniendo en cuenta que este tipo de combustibles tienen un impacto en el medioambiente de manera negativa en los últimos años hemos visto como se ha restaurado el interés por el potencial energético de la biomasa y los beneficios que esta ofrece en el impacto ambiental.

Indicado en la investigación realizada por Chávez M [14], la biomasa es material orgánico compuesto por materia biológica en la cual presenta carbono, oxígeno, hidrogeno, nitrógeno en baja cantidad y una cantidad variable de ceniza esta composición varía dependiendo del origen de la biomasa utilizado para fines energéticos en su mayoría y producción de calor.

En su composición el contenido de azufre es sumamente baja en comparación con otro tipo de combustible como lo puede ser el carbón, este tipo de característica son favorables para el uso de generación de energía por su baja emisión de gases de efecto invernadero, esta representa una de sus principales desventajas es su baja producción por unidad de área por lo que se eleva de manera exponencial el costo de producción, transporte y acopio de la biomasa, generalmente el lugar de producción y el de consumo de la biomasa son lugares distintos por lo que se elevan los costos aún más.

## 2.2 Proceso de Gasificación

Es una de las nuevas tecnologías utilizables para realizar un proceso termoquímico con un reactor con el objetivo de convertir biomasa sólida que puede ser de origen vegetal en un gas combustible con la contribución de un elemento gasificante que puede ser oxígeno, vapor de agua o aire [15]. La biomasa es expuesta a una atmósfera de grandes temperaturas en el interior del reactor en donde se produce el calentamiento la materia prima a tal punto de producirse la descomposición térmica.

En el artículo de E. Gutiérrez, J. Almeida & J. Arzola [16], indican que la calidad de gas que producen los gasificadores Down draft depende del agente gasificante usado que podría ser oxígeno, vapor de agua o aire, del diseño del reactor y de la biomasa utilizada que en este caso en nuestro trabajo sería de origen vegetal sin olvidarse de los parámetros de operación, por eso los modelos matemáticos son de esencial importancia en como predecimos el comportamiento del equipo en su operación puesto que permiten pronosticar cómo se comporta la instalación energética.

El Ingeniero Mecánico Mario Bohórquez en su trabajo [8], plantea que el producto de las reacciones termoquímicas se lo conoce con el término de “gas producto”, en la tabla 1 se indican los componentes principales del gas producto resultado de la gasificación de biomasa, por otro lado está el gas que se usa cuando el principal agente de gasificación es el aire se lo conoce como “gas pobre”. Cabe señalar, que el “gas de síntesis” se produce cuando el agente de gasificación es el oxígeno o vapor de agua, todos estos gases son productos del reactor de gasificación.

**Tabla 1: Componentes del gas producto resultado de la gasificación de biomasa**

<b>Elementos de interés</b>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO
<b>Elementos inertes (no-combustibles)</b>	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>
<b>Contaminantes</b>	HCN, NH <sub>3</sub> y diferentes compuestos orgánicos de nitrógeno.
	HCL, NaCL, y partículas de KCL

<b>Fracción condensable</b>	Alquitrán, hetero-orgánicos, Benceno, Tolueno, agua y Xileno (BTX).
<b>Partículas / residuos</b>	Cenizas, sales minerales, carbonilla y material particulado.

Fuente: [8]

Por otro lado, el agente de gasificación se lo escoge reconociendo de la composición del gas producto deseado, como ya los mencionamos anteriormente que puede ser el aire, el vapor de agua, el oxígeno o una aleación de los tres, aire-oxígeno-vapor de agua. También existe la posibilidad de la utilización de dióxido de carbono considerando que este no es bastante común su aplicación. En un inicio, también es posible convertir el carbono en gases haciendo reaccionar los sólidos con el hidrógeno este proceso tiene el nombre de hidro gasificación, o mezclando el vapor de agua con el hidrogeno formando la hidro gasificación y vapor de agua. Por lo general el último proceso se lo utiliza cuando se desea obtener gas natural sintético con sus siglas (SNG) y no disponemos de oxígeno.

Como es de suponerse el aire es el agente de gasificación más común puesto que es prácticamente gratis y está disponible con facilidad. Sin embargo, usar este agente de gasificación presenta el problema de la disgregación del producto gaseoso con el nitrógeno atmosférico y aumentara la creación de óxidos nitrosos, dando como resultado bajo poder calorífico en el gas producto. Viendo de una manera puramente química las variables a tomar en consideración en el proceso más importantes de la gasificación son:

**Contenido de humedad de la materia prima:** Tiene una considerable variación que depende del tipo de biomasa usada y el tipo de almacenamiento. En algunos casos, la biomasa debe secarse antes de quemarse para así poder mantenerla. Como un aumento en el contenido de la humedad, aumenta el tiempo de residencia requerido en la cámara de combustión, reduce la temperatura máxima posible y por lo tanto reduce el espacio para las emisiones por combustión incompleta.

## **2.2.1 Poder calorífico de la materia prima:**

Es una función de las propiedades inherentes de cada material y relacionadas con la energía, puede liberarse en forma de calor cuando está se quema por completo. Se expresa en dos:

### **2.2.1.1 Poder Calorífico Superior o Bruto (HHV):**

Definido como la calorina que se libera durante la incineración por cantidad de combustible o unidad de masa con ciertas limitaciones de que el agua que se forma mientras ocurre la combustión se encuentra en forma líquida y los gases de combustión y el agua cuentan con temperatura similar. Este poder es practico en los cálculos caloríficos en combustibles en el cual la reacción de la condensación de los productos es netamente práctica, adicional tiene en consideración el calor latente del agua cuando se produce la vaporización en productos de combustión.

Los combustibles de biomasa por lo general tienen un poder calorífico superior o bruto de entre 18 y 22 [MJ/kg (d.b.)]. Sin embargo, para obtener de manera exacta el poder calorífico superior o bruto, se usa procedimientos estandarizados en la norma ASTM D-2015 y una bomba calorimétrica.

### **2.2.1.2 Poder Calorífico Inferior o Neto (LHV):**

Definido como la calorina que se libera mientras ocurre la incineración por cantidad de combustible o unidad de masa con ciertas limitaciones de que el agua que se forma mientras ocurre la combustión está en forma líquida y que los gases de combustión y el agua cuentan con temperatura similar. El poder calorífico inferior o neto se lo puede tasar a partir del poder calorífico superior teniendo presente el contenido de hidrogeno y de humedad del combustible.

Los autores S. van Loo y J. Koppejan en su trabajo [17] nos muestran en la tabla 2 las características de diferentes tipos de biomasa, entre las características se encuentra el poder calorífico superior, el poder calorífico inferior, contenido de humedad, densidad de energía de combustibles de biomasa y la densidad aparente.

**Tabla 2: Características de la biomasa**

<b>Biomasa</b>	<b>HHV</b> [ $\frac{MJ}{kg \text{ d.b.}}$ ]	<b>LHV</b> [ $\frac{MJ}{kg \text{ w. b.}}$ ]	<b>M.C.</b> [wt% w.b.]	<b>Densidad de energía</b> [ $\frac{MJ}{m^3}$ ]	<b>Densidad Aparente</b> [ $\frac{kg \text{ w. b.}}{m^3}$ ]
<b>Aserrín</b>	19.8	8	50	1920	240
<b>Madera peletizada</b>	19.8	16.4	10	9840	600
<b>AMD</b>	19.8	8	50	3600	450
<b>AMD (pre secada)</b>	19.8	12.2	30	3900	320
<b>AMS</b>	19.8	8	50	2800	350
<b>AMS (pre secada)</b>	19.8	12.2	30	3050	250
<b>Corteza de árbol</b>	20.2	8.2	50	2620	320
<b>Pasto</b>	18.4	13.7	18	2740	200
<b>Cereal</b>	18.7	14.5	15	2540	175
<b>Trigo</b>	18.7	14.5	15	1740	120
<b>Residuos de oliva</b>	21.5	6.1	63	6890	1130

Fuente: [17]

AMD: Astillas de madera dura

AMS: Astillas de madera suave

### 2.3 Etapas de gasificación

Las etapas de gasificación se derivan en varias etapas las cuales van dependiendo del método de degradación térmica a la cual se quiera someter a la biomasa para la adquisición de gas de síntesis/gas pobre.

Como lo menciona el ingeniero Alegría Castellanos en su artículo [18], la biomasa se encuentra comúnmente en estado sólido lo cual para un fin de gasificación dificulta el proceso. Un método para contrarrestar esta condición de la biomasa es someterla a procesos termoquímicos o biológicos que la convierten en conductor energético en el estado deseado. El proceso de gasificación cuenta con 4 etapas: pirólisis, secado, reducción y oxidación repartidas por regiones en el caso de los gasificadores de lecho fijo que serán descritas a continuación (ver ilustración No. 3).

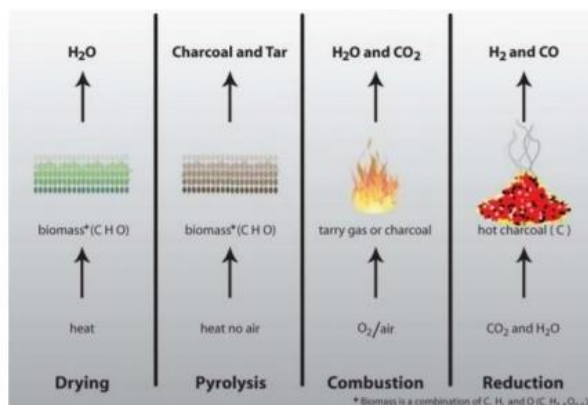


Ilustración No. 3: Etapas de gasificación

Fuente:[19]

### 2.3.1 Secado

En su mayoría la biomasa tiene la característica de presentar un grado de humedad alto por lo que dificulta su utilización para fines de generación eléctrica en este caso para el proceso de gasificación. El secado natural y el secado forzado son los 2 métodos más comunes utilizados para la biomasa. El secado natural se fundamenta en las condiciones climáticas favorables e infraestructura adecuada para un deshumedecimiento eficaz de la materia prima, cuando la humedad obtenida mediante este proceso no es la esperada es conveniente recurrir al secado forzado, que se clasifica en dos según lo plantean Giménez P y Bonilla M en su investigación realizada en la Universidad Politécnica de Madrid [20].

#### 2.3.1.1 Secado directo

Este se produce mediante el contacto directo del material y los gases a altas temperaturas.

#### 2.3.1.2 Secado indirecto

Para este método el intercambio de calor se produce mediante un conductor de calor y uno de los modelos que mejor resultados tiene es el de un tambor rotatorio conocido como “trommel” (ver ilustración No.4).

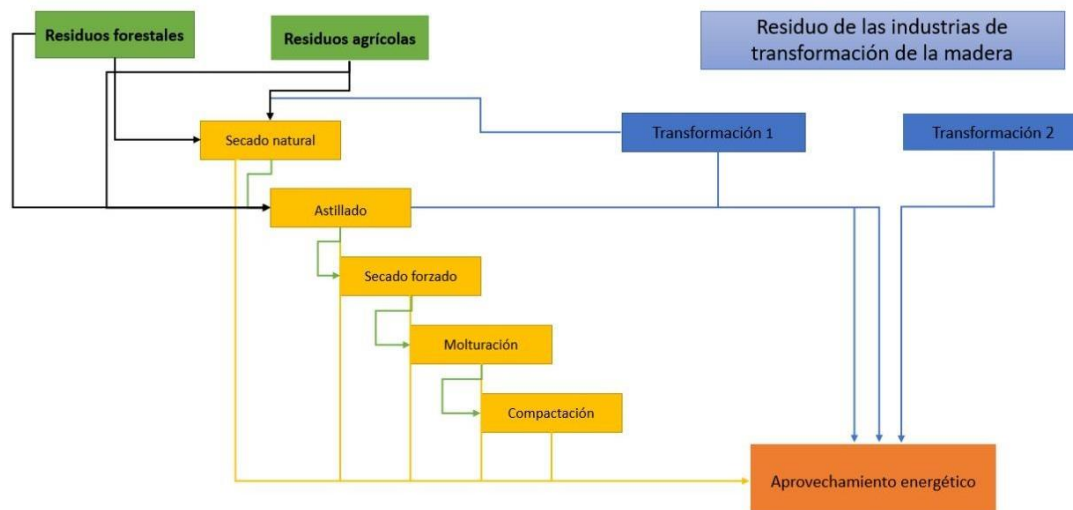


Ilustración No. 4: Proceso de secado

Fuente: [20]

### 2.3.2 Pirolisis

De acuerdo a la investigación realizada por el reconocido ingeniero Gallardo I y a los profesores de la Universidad Tecnológica de Pereira Augusto C y Zapata A [19], [21], nos plantea que este proceso es una descomposición química (térmica) que se lleva a cabo a elevadas temperaturas (200°C- 500°C) de la materia orgánica en carencia de oxígeno, por lo que mencionadas sustancias se degradan gracias al calor sin que exista combustión, este proceso involucra cambios simultaneos tantos químicos como físicos inalterables. La pirolisis generalmente se divide en pirolisis rápida y pirolisis lenta, en el proceso de pirolisis lenta el producto de biomasa es atraído hacia las esquinas mientras que en el proceso de pirolisis rápida este se desplaza hacia el eje central de manera contraria al anterior proceso las cuales dan lugar a su disgregación en tres diferentes estados [8].

#### 2.3.2.1 Sólido

Llamado coque de pirolisis este material carbonoso casi puro fusionado a residuos pasivo que estuviesen presente en el proceso. Este se lo utiliza como carburante o para la elaboración de carbono activo.

#### 2.3.2.2 Líquido

Este es un fluido de alquitrán o a su vez un aceite que en sus compuestos reporta hidrocarburos oxigenados complejos, metanol, ácido acético, acetona.

### **2.3.2.3 Gaseoso**

Va compuesto de monóxido de carbono, hidrogeno, metano y diversos gases ligeros no concentrables [18].

Un resultado significativo de realizar la pirolisis es el alquitrán viene a ser una mezcla color oscura de hidrocarburos y demás materias orgánicas que se forman de la condensación del vapor que se produce mientras se lleva a cabo el proceso. Al ser una sustancia líquida viscosa y pegajosa, el alquitrán produce una considerable cantidad de inconvenientes en la utilización industrial que le damos al producto de la gasificación. El alquitrán es una sustancia cancerígena capaz de inducir en animales y humanos.

### **2.3.3 Oxidación**

Posterior al proceso de pirolisis la oxidación o también conocida combustión es controlada mediante suministro controlado de aire u otro tipo de oxígeno, el suministro de oxígeno debe cumplir un rango establecido (RE) entre  $RE=0.2$  y  $RE=0.4$  así lo muestra Gallardo I en su investigación[19]. Los resultantes de este proceso son el  $H_2O$  y  $CO_2$  a partir de la degradación térmica de la biomasa el cual es realizado en temperaturas entre 700-2000 grados Celsius [21].

### **2.3.4 Reducción**

Esta etapa es una de las más complejas ya que esta establece la composición final del gas producto y a su vez es producida simultáneamente y posterior al proceso de oxidación, en la zona de reducción existen reacciones químicas numerosas a temperaturas elevadas entre  $CO_2$ ,  $HC$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ , Y  $H_2O$ . En la ilustración No. 5 se muestra la composición del gas en diferentes atmosferas de gasificación.



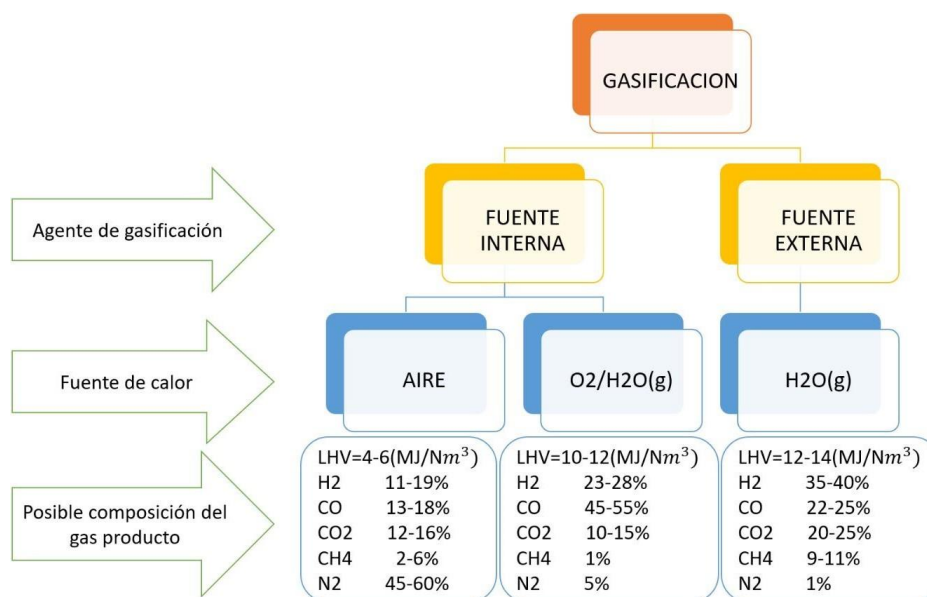


Ilustración No. 5: Composición del gas en diferentes atmosferas de gasificación

Fuente: [8]

## 2.4 Tipos de gasificador

El gasificador es un equipo en el cual sucede un cambio de materia, de combustible sólido a gaseoso naturalmente sin la utilización de fuentes de calorífica externa. Para el proceso de gasificación existen un amplio mercado de gasificadores, se deben considerar varios factores para su elección teniendo en cuenta que se busca la menor perdida posible de energía, siendo los principales: El grado de humedad, granulometría, el grado de castidad del gas de síntesis.

Teniendo en cuenta estos parámetros el gasificador ideal sería aquel que se adecue a cada tipo de necesidad o combustible gasificante, por ello se han intentado diseñar gasificadores universales pero los resultados de eficiencia y factibilidad no han sido los esperados ya que el combustible gasificante se puede derivar en 2 principales categorías: “combustibles dispensado de alquitrán”, “combustible emisor de alquitrán”, por ello es que existen un amplio mercado de gasificadores que van de acuerdo a cada necesidad del usuario y a cada tipo de combustible gasificante.

- **Combustible libre de alquitrán:** Para este tipo de combustible el gasificador opera con un espacio en el que se incinera hasta  $CO_2$  con una rápida degradación de  $CO_2$  a CO por trabajo del material gasificante incandescente como lo puede ser el carbón vegetal y el coque.

- **Combustible emisor de alquitrán:** En este tipo de material el gasificador deberá operar con un espacio destinado para la combustión/reducción y otro en el cual el material gasificante se seca y posteriormente se piroliza por consecuencia de las altas temperaturas.

### 2.4.1 Gasificador de lecho fijo.

Este gasificado tiene la característica de que la biomasa se mantiene de manera estática en el centro del reactor y en el proceso de pirolisis se consume progresivamente y el gas de trabajo se desplaza hacia el reactor a una velocidad moderada evitando que las partículas del interior sean elevadas a una altura notable y posteriormente caen por principios de la gravedad en consecuencia el flujo de gases va de manera ascendente (agente gasificante/gas producto), los gasificadores de lecho fijo como se indica en la investigación hecha por Alegría P en [22] se ramifican en:

#### 2.4.1.1 Gasificador de lecho fijo de flujo descendente:

En este modelo de gasificador las corrientes se distribuyen en sentido paralelo y directo a la zona de oxidación ya que el sólido (biomasa) es introducido por la parte de arriba por tal motivo el vapor producido sale por la parte de abajo vapor y el oxidante lleven consigo las partículas de carbón mediante el proceso en el cual los gases con impurezas pasen por la zona con mayor actividad calorífica conformado en su mayoría por combustible (biomasa) y sean transformadas en dióxido de carbono, metano, hidrógeno y monóxido de carbono, por otro lado las impurezas como alquitranes y ácidos son degradados en su mayoría [23], [24]. En la ilustración No. 6 se muestra el esquema de un gasificador de lecho fijo de flujo descendente.

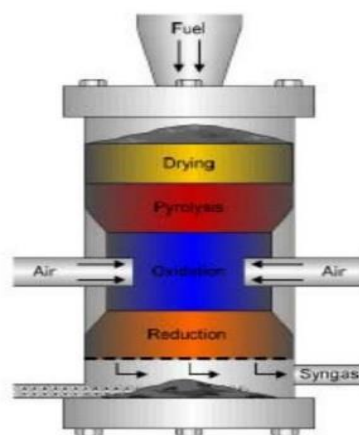


Ilustración No. 6: Esquema de un gasificador de lecho fijo de flujo descendente

Fuente: [19]

### 2.4.1.2 Gasificador de lecho fijo de flujo ascendente:

El combustible es dispuesto por la parte superior y va descendiendo de manera progresivamente lenta y en contracorriente con el flujo del gas ya que este es inyectado desde el fondo del gasificador así lo indica Vigouroux R en su trabajo de investigación [25]. En la ilustración No. 7 se indica el esquema de un gasificador de lecho fijo de flujo ascendente.

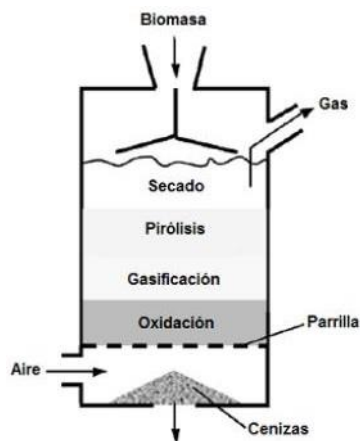


Ilustración No. 7: Esquema de un gasificador de lecho fijo de flujo ascendente

Fuente: [8]

### 2.4.2 Gasificador de lecho fijo en corriente cruzada

En este modelo de gasificador destaca las ventajas y desventajas de sus 2 modelos similares de lecho fijo, la dirección de flujo del material gasificante es de manera descendente, el agente oxidante realiza movimientos unidireccionales de lado a lado del gasificador este proceso hace posible la obtención de un gas de síntesis rico en alquitrán a 800- 900 °C. En la ilustración No. 8 se muestra el funcionamiento del gasificador de lecho fijo en corriente cruzada.

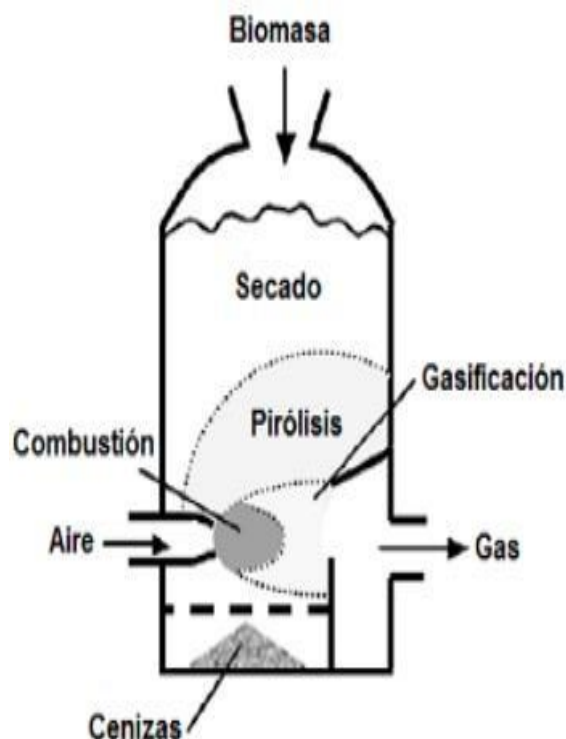


Ilustración No. 8: Funcionamiento del gasificador de lecho fijo en corriente cruzada

Fuente: [22]

### 2.4.3 Gasificador de lecho fluidizado

Este modelo de gasificador en diferencia de modelo anterior presentado tiene una rapidez de ingreso del gas agente al centro de gasificación. Como está indicado en el proyecto técnico de Alegría P [22], la rapidez de entrada del agente de fluidez y el constante abastecimiento de biomasa son una parte fundamental para el proceso de gasificación ya que de este depende la calidad y producción del mismo y también el nivel o altura dependen de este mismo flujo.

En el reactor de lecho fluidizado el agente se suministra desde la región inferior a la entrada de alimentación del reactor y el gas producto es expulsado por la parte superior, siendo así el proceso se podría decir que el recorrido que hace el agente gasificante es de manera circular y ascendente a su vez, ayudando así a que en el interior del reactor exista una constante transferencia de materia y energía entre la biomasa y el gas [18].

Para este tipo de gasificador de lecho fluidizado se encuentran 2 modelos:

### 2.4.3.1 Gasificador de lecho fluidizado burbujeante

En este modelo de gasificador el agente gasificante/fluidizante produce una aceleración sumamente baja que tiene como resultado que el sólido no tenga una circulación relevante dentro del reactor tal que se comporta como un líquido burbujeante de viscosidad baja. En la ilustración No. 9 se muestra el gasificador de lecho fluidizado burbujeante.

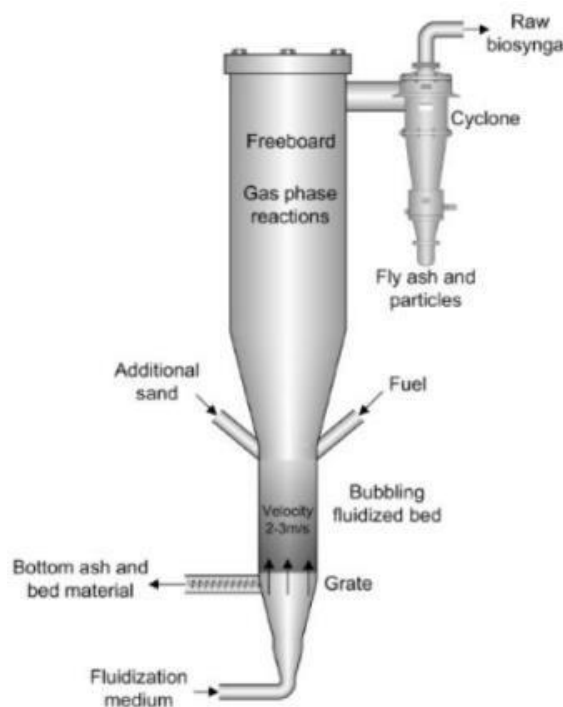


Ilustración No. 9: Gasificador de lecho fluidizado burbujeante

Fuente: [19]

### 2.4.3.2 Gasificador de lecho fluidizado circulante

Este gasificador de tipo circulante como su nombre lo menciona hace que el producto gasificante (biomasa) junto con el gas producto pase por un proceso por el cual las partículas del lecho fijo son separadas mediante un ciclón y luego llevado hacia la superficie del reactor de manera circular y posteriormente sea regresado a la base del mismo, ha este proceso se lo denomina recirculación planteado por Alegría C en su trabajo [18], en el interior del reactor la temperatura permanece de manera uniforme no por encima de los 1000 °C y la rapidez del agente gasificante es inclusive mayor al modelos anteriormente mencionados de lecho fluidizado burbujeante (5-10 m/s) siendo así de mayor eficiencia y teniendo un alto contenido de alquitrán. En la ilustración No. 10 se indica el gasificador de lecho fluidizado circulante.

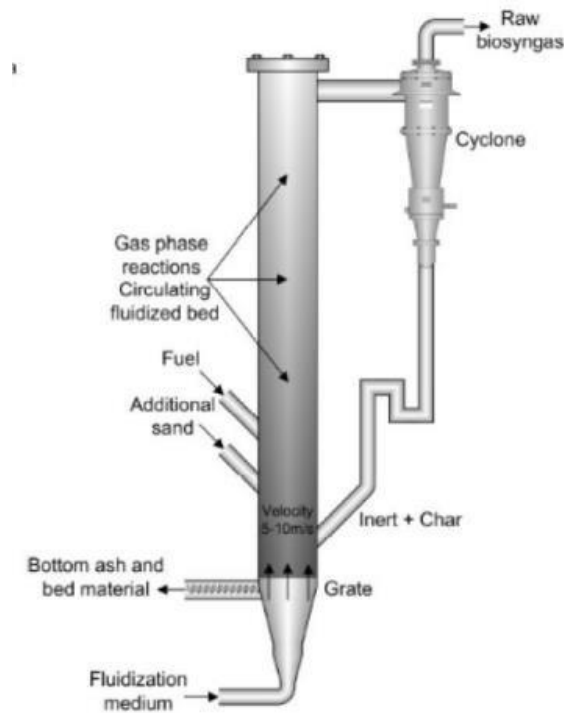


Ilustración No. 10: Gasificador de lecho fluidizado circulante

Fuente: [19]

#### 2.4.4 Gasificador de lecho arrastrado

Este modelo de gasificadores operan de una manera compleja ya que poseen poca flexibilidad al momento de realizar el proceso de gasificación, similar a las calderas de carbón pulverizado que trabaja con partículas de tamaño reducido ya que permanecen por muy escaso tiempo en el reactor por esta razón el material gasificante debe ser tratado previamente. Este modelo opera a elevadas temperaturas dando como producto conversiones muy rápidas y una presencia de alquitrán muy baja en el gas producto.

### 2.5 Partes del gasificador

#### 2.5.1 Contenedor o tolva de combustible (biomasa):

Es el sitio cilíndrico grande en donde se almacena la biomasa que se va a ir convirtiendo en ceniza a medida que ocurra la pirolisis o también llamada combustión lenta, en dicho contenedor se determina el peso de biomasa utilizada en el gasificador. En su interior el contenedor está en contacto con los gases generados. Dichos gases contienen ácidos, específicamente ácido acético, que es una sustancia líquida cristalina, con olor característico, presenta propiedades irritantes y corrosivas, por lo que en el interior de la

superficie debe estar elaborada de un material resistente para que no sea corroída. El contenedor de biomasa suministra un apartado para la condensación, la parte inferior no tiene que estar distante del interior por paredes con un exagerado grosor, para así lograr la prevención de la circulación del gas entre el compartimiento en donde se produce la condensación y el espacio para el combustible.

### **2.5.2 Hogar**

Durante el proceso termoquímico, la biomasa es reducida hasta la parte inferior por debajo de la toma de aire para así conseguir la suficiente temperatura alta para que se produzca una total combustión y que se forme el craqueo de los gases de alquitrán, el craqueo es el proceso químico en el cual fragmentan las moléculas de en este caso el alquitrán. En esta parte del gasificador es donde ocurren los procesos de reducción y oxidación, la zona de combustión es precisamente la zona de oxidación, parte del carbón que se produce y los gases combustibles se queman con el agente de gasificación [8].

## Capítulo 3

### 3 MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Metodología y medios

Para la realización de este estudio de factibilidad fue necesaria la implementación de un prototipo de gasificador de biomasa, con dicho prototipo se procedió a realizar las pruebas para dimensionar de forma técnica la producción de un combustible alternativo. El diseño del prototipo del gasificador implica el proceso termoquímico que se va a realizar y los equipos y materiales a utilizar. El tamaño del reactor para así obtener el correcto rendimiento del producto, los componentes estructurales como la mesa, el cilindro en donde va la biomasa para proceder con la pirolisis, el conducto por donde es enviado el gas y el envase en donde se enfría el conducto por donde circulan los gases, en todo esto se tiene que centrar para poder realizar el prototipo del gasificador de biomasa.

Adicional a la implementación del prototipo, el proyecto técnico se centró recopilación de especificaciones técnicas para obtener el óptimo funcionamiento de gasificador, como las del agente gasificador, también en los diferentes tipos de biomasa que se podría emplear, biomasa que no sea utilizada para sacar ningún provecho y que beneficie a la industria que la produce.

Para proceder con la implementación del prototipo primero se tuvo que determinar cuál iba a ser el agente de gasificación, como lo mencionamos anteriormente el agente de gasificación puede ser el aire, el oxígeno o vapor de agua. Se escogió el aire como agente de gasificación por el motivo de que se podría decir que es más fácil de obtener. A continuación, en la tabla 3 se muestran las especificaciones del agente de gasificación.

**Tabla 3: Especificaciones del agente de gasificación**

<b>Agente de Gasificación:</b>	<b>Aire Atmosférico</b>
<b>Temperatura [°C]:</b>	28
<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]:</b>	1.172
<b>Presión Atmosférica [kPa]:</b>	100.8
<b>Humedad Relativa [%]:</b>	72



<b>Humedad absoluta [%]:</b>	2
------------------------------	---

Para obtener la especificación del gas producto es necesario conocer el rango de poder calorífico inferior que este depende del agente de gasificación que vamos a utilizar para realizar las pruebas, en este caso es el aire, a continuación, en la tabla 4 se indica las especificaciones del gas producto de acuerdo a los agentes de gasificación:

**Tabla 4: Especificaciones del gas producto de acuerdo al agente de gasificación**

<b>Tipo de agente de gasificación</b>	<b>Rango del LVH [MJ/Nm<sup>3</sup>]</b>
<b>Aire</b>	4 - 7
<b>Vapor de agua</b>	10 - 18
<b>Oxígeno</b>	12 - 28

Fuente: [8]

### **3.2 Selección del diseño del prototipo de gasificador**

Para determinar el tipo de gasificador que se construyó, se realizó la selección de los tipos descritos anteriormente que son de lecho fijo que se clasifican de flujo descendente, ascendente y cruzado, el de lecho fluidizado que a su vez se clasifica en fluidizado burbujeante y fluidizado circulante y por último el de lecho arrastrado. En el capítulo 2 se detalla el proceso de gasificación, así como sus etapas, puesto que se va a realizar el prototipo para realizar pruebas y determinar si es factible un gasificador de biomasa, se optó por elegir el de lecho fijo, ya que estos tipos de gasificadores se adapta de manera correcta a la demanda indicada.

Después de elegir el tipo de gasificador que mejor se adaptó tenemos que elegir el modelo de flujo ya sea ascendente, descendente y cruzado, para esto se toma en cuenta diversos factores que son el tipo de materia prima es decir con que biomasa va a trabajar el gasificador, la disponibilidad de modificaciones por si queremos realizar una modificación para mejorar el gasificador ya sea en su rendimiento o en el contenedor, costos, se podría decir que este es el ítem más importante porque de este ítem va a depender si los costos de inversión, operación y mantenimiento nos resultan factible para el diseño del gasificador, la elaboración, aquí se pensó en la disponibilidad de materiales

y el grado de complejidad de cada tipo de gasificador, mantenimiento y la operación, conocer la confiabilidad del proceso de gasificación y cuan compleja es su operación, y para finalizar se tuvo que conocer el rendimiento para conocer la cantidad de gas producto y así determinar su eficiencia y productibilidad.

Teniendo en cuenta todos estos factores y después de revisar el estado del arte de los tipos de gasificadores determinamos que el más idóneo y que mejor se adaptaba a nuestras necesidades teniendo en cuenta los bajos costos de construcción fue el gasificador de lecho fijo flujo ascendente por lo tanto este tipo de gasificador se realizó para hacer las pruebas correspondientes para poder la elaboración de este proyecto técnico.

### **3.3 Selección de materiales**

Hay que tener en cuenta que un gasificador trabaja a elevadas temperaturas, por lo tanto, los materiales tienen que ser elegidos de manera correcta sin dejar de tener en cuenta que es un proyecto técnico por lo que el gasificador será a escala y con recursos limitados.

El sitio cilíndrico grande en donde se almacena la biomasa para ser incinerada y el contenedor de biomasa son los sitios que más expuestos están a las elevadas temperaturas e incluso por donde va a ingresar el agente de gasificación por lo tanto deben estar elaborados de un material resistente preferiblemente acero o lata gruesa.

La estructura que viene a ser el hogar del gasificador fue construida con un envase cilíndrico que fue cortado la parte superior para poder introducir la biomasa para su posterior incineración y a su vez colocar en el interior la tolva de biomasa tal como se muestra en la ilustración No. 11.

Cabe indicar que también se colocó sobre la mesa la idea de que el hogar del gasificador sea realizado con el tanque de gas que se suministra a los aires acondicionados, pero después se descartó la idea por el motivo de que era un espacio muy reducido e iba a ser muy difícil colocar la biomasa para una correcta incineración.



Ilustración No. 11: Elaboración del Hogar del gasificador

Fuente: Autores

El hogar que es el envase cilíndrico grande lleva la entrada del agente de gasificación, el cual se procedió a realizar un corte a la medida exacta de la entrada de aire para posteriormente sea soldada como se muestra a continuación en la ilustración No. 12.



Ilustración No. 12: Colocación de la entrada del agente gasificador

Fuente: Autores

Para el contenedor o tolva de biomasa va en el interior del hogar sobre una estructura de varilla de media pulgada como se muestra en la ilustración No. 13, para que se produzca

una correcta incineración y sacar el máximo provecho a la biomasa que se encuentra en la tolva.



Ilustración No. 13: Estructura de la tolva de biomasa

Fuente: Autores

De la parte superior de la tolva que en el caso del prototipo fue realizada de un tacho de pintura de lata, en la lata se realizó un orificio con la ayuda de un taladro para colocar la unión que es un acople hidráulico (ver ilustración No.14) conectado a la varilla de cobre por donde circulara el gas hacia en envase de vidrio que también está conectado con un acople hidráulico al interior del envase, dentro del envase se coloca agua que funciona como filtro del gas y que posteriormente sale por una manguera al exterior el gas producto, dicha manguera esta pegada con un pegamento para su correcta fijación como se muestra en la ilustración No. 15.



Ilustración No. 14: Entrada y salida del filtro de agua

Fuente: Autores



Ilustración No. 15: Filtro de agua

Fuente: Autores

### 3.4 Diseño del prototipo

El diseño del prototipo previamente seleccionado fue elaborado en AutoCAD, en la ilustración No. 11 nos muestra el gasificador que fue construido para realizar el estudio.

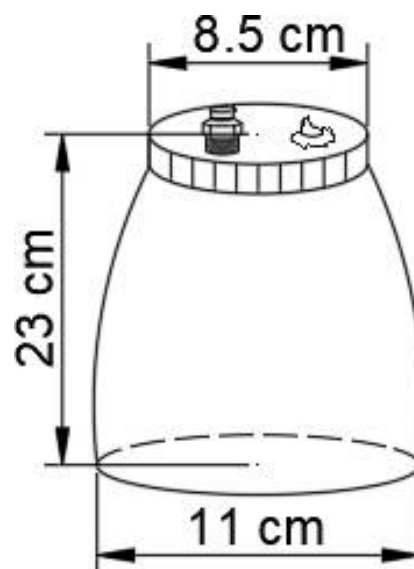


Ilustración No. 16: Filtro de gas

Fuente: Autores

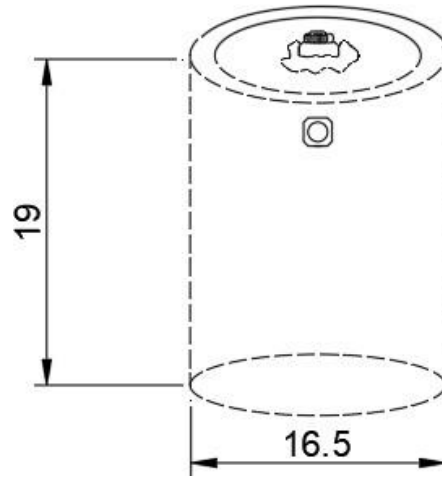


Ilustración No. 17: Contenedor o tolva de biomasa

Fuente: Autores

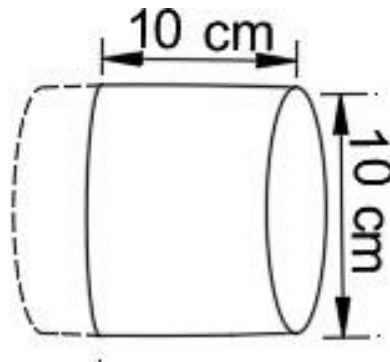


Ilustración No. 18: Entrada del agente gasificador

Fuente: Autores

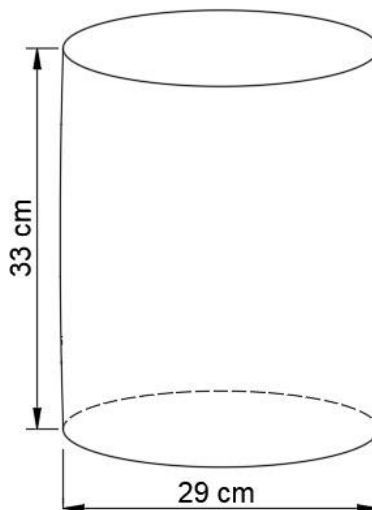


Ilustración No. 19: Hogar del gasificador

Fuente: Autores

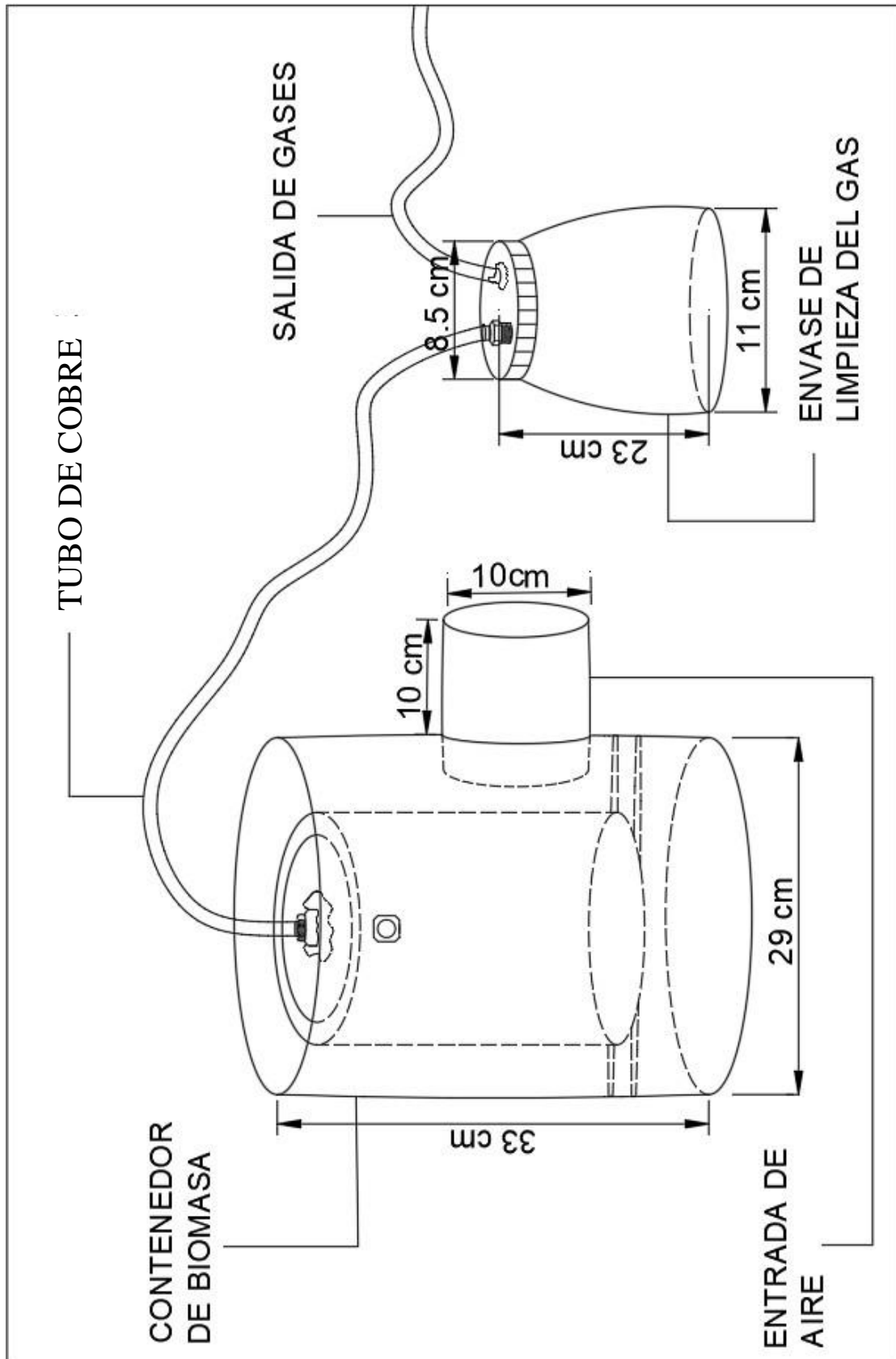


Ilustración No. 20: Diseño final del prototipo del gasificador

Fuente: Autores

## 3.5 Guías de prácticas

### 3.5.1 Práctica #1 proceso de gasificación con cascarilla de maíz

La primera práctica una vez terminado el prototipo del gasificador fue realizada con cascarilla de maíz, que es lo que recubre la mazorca de maíz y es incinerada sin sacar ningún provecho en los terrenos de los agricultores, por ello visitamos un terreno de cultivo de maíz y allí se recolectó la biomasa en un saquillo para realizar las pruebas.

Para la realización de esta prueba se necesitó 1.2 kilogramos de cascarilla de maíz la cual anteriormente paso por un proceso de secado antes de ser utilizada en la gasificación de la misma, de los 1.2 kilogramos de cascarilla de arroz se utilizaron 0.8 kilogramos como combustible térmico para lograr la temperatura ideal para que comience el proceso de pirolisis, posteriormente la tolva que va colocado en el interior del reactor principal o también llamado contenedor de la biomasa, el cual fue llenado con 0.4 kilogramos de cascarilla de maíz sobrante, luego de ser llenado los reactores tanto la tolva como el hogar.

La tolva de biomasa es sellada herméticamente y conectada mediante un tubo de cobre y sellador térmico en pasta al filtro y disipador de temperaturas el cual es llenado con 350 mililitros de agua como se muestra en la ilustración No. 21, el tubo conductor del gas producto el cual fue sumergido aproximadamente de 2 a 3 centímetros por debajo del agua para que así al ingresar al filtro el gas producto sea purificado y disminuya su temperatura, a su vez este cuenta con una salida el cual es colocado una manguera de caucho con punta de cobre de 2 centímetros de largo por el cual sale el gas producto.



Ilustración No. 21: Filtro de agua

Fuente: Autores



Posteriormente de tener todo el equipo gasificador listo para el proceso, el reactor principal llamado hogar es encendido (ver ilustración No. 22) hasta alcanzar temperaturas superiores a 650 grados centígrados aproximadamente donde el reactor secundario empieza a producir el gas alternativo y es llevado hasta el filtro en donde se baja su temperatura y es filtrado de partículas que son producto de la gasificación. Cabe indicar que el agente gasificador fue el aire a una temperatura ambiente de 29.5° la cual fue medida con la ayuda de un termómetro digital marca “OMRON” como se muestra en la ilustración No. 23.



Ilustración No. 22: Encendido del gasificador primera práctica

Fuente: Autores



Ilustración No. 23: Temperatura primera práctica

Fuente: Autores

En esta práctica el contenido de cascarilla de maíz del hogar que es el contenedor donde se introduce la biomasa que será utilizada como combustible térmico fue muy poco puesto que la cascarilla de maíz estaba seca y se produjo la combustión muy rápida por lo que no se alcanzó la correcta pirolisis de la tolva de biomasa y no salió la cantidad suficiente de gas para alcanzar la llama (ver ilustración No. 24).



Ilustración No. 24: Resultado de la primera práctica

Fuente: Autores

### 3.5.2 Práctica #2 proceso de gasificación con cascarilla de maíz

En esta prueba se aumentó la cantidad de biomasa en el hogar, con la finalidad de que esta vez sí obtengan resultados positivos, se aumentó el doble de la biomasa utilizada en la primera práctica, es decir, en la primera práctica utilizamos 0.8 kilogramos de biomasa de cascarilla de maíz, para esta práctica se empleó 1.6 kg de cascarilla de maíz, en la tolva de biomasa si se mantuvo la misma cantidad de biomasa. Esta prueba se realizó con una temperatura ambiente de 28.5°C (ver ilustración No. 25).



Ilustración No. 25: Temperatura ambiente segunda práctica

Fuente: Autores

La cascarilla de maíz estaba almacenada en un saquillo por lo que con el paso de las 24 horas la biomasa generó humedad y no se incineraba correctamente (ver ilustración No. 26).



Ilustración No. 26: Resultado segunda práctica

Fuente: Autores

### 3.5.3 Práctica #3 proceso de gasificación con virutas de madera

Para esta práctica se procedió a cambiar de biomasa, visitamos una industria maderera en donde solicitamos la venta de la viruta de madera al dueño del establecimiento pero después de contarle para que iba a ser utilizada el muy amablemente nos dijo que nos regalaba la cantidad necesaria para nuestro estudio, en esta prueba se necesitó un promedio de 1.9 kilogramos de viruta de madera previamente secada para un mayor grado de eficiencia de estos 1.9 kilogramos se utilizarán en la tolva de biomasa 0.5 kilogramos (ver ilustración No. 27) y los 1.4 restantes se colocan en el hogar, la tolva es sellada herméticamente y conectado mediante el tubo de cobre hacia el filtro y disipador de calor el cual es llenado con 350 mililitros de agua.



Ilustración No. 27: Cantidad de biomasa utilizada

Fuente: Autores

Se procedió a encenderlo con una temperatura ambiente de  $30.4^{\circ}\text{C}$  (ver ilustración No. 28), esperando alcanzar una temperatura alrededor de 700 grados centígrados, temperatura en la cual se obtiene el gas producto de una manera más estable con una llama constante.



Ilustración No. 28: Medición de temperatura Práctica #3

Fuente: Autores

Presentamos el problema de que la pasta térmica no aguantó tan elevada temperatura y se desconectó de la tolva de biomasa produciendo que el gas se saliera antes de pasar por el filtro de agua como se aprecia en la ilustración No 29.



Ilustración No. 29: Desconexión de la Varilla de cobre

Fuente: Autores

### 3.5.4 Práctica #4 proceso de gasificación prototipo 2

Para esta prueba optamos por cambiar el prototipo para realizar una comparativa de factibilidad y eficiencia puesto que con el anterior prototipo obtuvimos inconvenientes con las uniones (ver ilustración No. 30), para este prototipo colocamos una bombona de gas con una entrada circular de aire de aproximadamente 9 centímetros y una salida de gas en la parte superior con una válvula de paso (ver ilustración No. 31).



Ilustración No. 30: Segundo prototipo de gasificador

Fuente: Autores

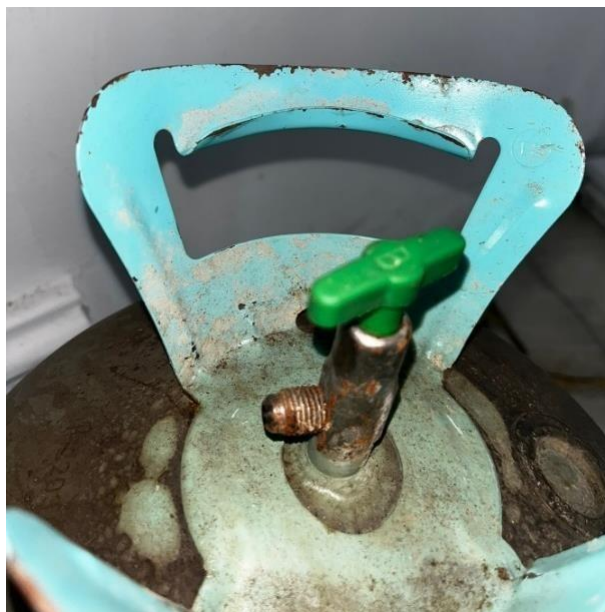


Ilustración No. 31: Válvula de paso

Fuente: Autores

Para esta prueba realizamos el llenado del gasificador con 1.5 kilogramos de biomasa en su interior, se realizó la conexión hacia el filtro y disipador de calor mencionado en la prueba anterior. Para esta prueba se trabajó con una temperatura ambiente de 29.7°C (ver ilustración No. 32)

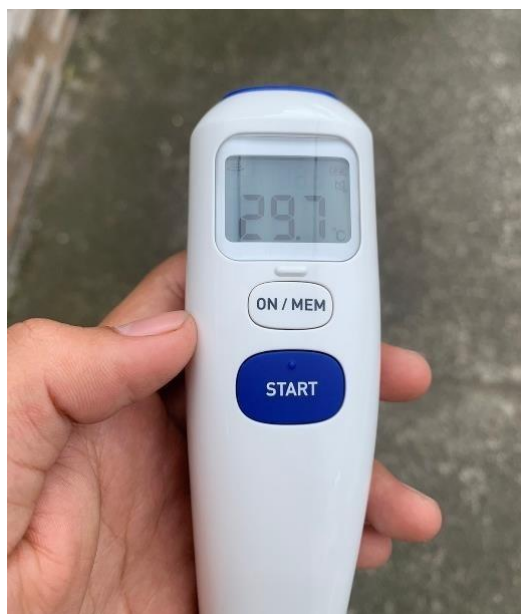


Ilustración No. 32: Temperatura ambiente práctica #4

Fuente: Autores

No se obtuvo resultados positivos por lo que el tamaño era muy reducido y la cantidad de biomasa necesaria para la obtención del gas ocupaba mucho espacio y producía que como la bombona era pequeña se apague sin lograr la correcta combustión de la biomasa.

### **3.5.5 Prueba #5 proceso de gasificación con viruta de madera**

Para realizar esta prueba retomamos al prototipo anterior ya que tuvimos mayor grado de eficiencia con el modelo # 1, pero esta vez le consultamos a nuestro tutor el Doctor Juan Carlos Lata sobre cómo se podría realizar la unión de la varilla de cobre a la tolva de biomasa y nos dio la idea de acoples hidráulicos, con este consejo se procedió a buscar el acople hidráulico a la medida de la varilla de cobre (ver ilustración No. 33) adicionalmente se necesitó abrazaderas las cuales impedirían fugas en el proceso de gasificación. En la ilustración No. 5 se aprecia el acople hidráulico en la tolva de biomasa.



Ilustración No. 33: Acople hidráulico

Fuente: Autores



Ilustración No. 34: Acople hidráulico en la tolva de biomasa

Fuente: Autores

También colocamos un acople hidráulico con su respectiva abrazadera en el filtro de agua por precaución para que no exista fuga de gas producto como se puede apreciar en la ilustración No. 35.



Ilustración No. 35: Acople hidráulico en el filtro de agua

Fuente: Autores

Se realizó una nueva prueba ahora con 1.5 kilogramos de biomasa colocado en el hogar y 0.8 kilogramos colocados en la tolva, es decir un total de 2.3 kilogramos de biomasa. Para esta prueba tuvimos la visita de docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, incluyendo al Dr. Juan Carlos Lata, para la observación y análisis del funcionamiento del prototipo con mayor eficiencia. Para esta prueba se trabajó con una temperatura ambiente de 29.9 °C (ver ilustración No. 36).



Ilustración No. 36: Temperatura ambiente de la práctica #5

Fuente: Autores



Para esta prueba si se obtuvieron resultados positivos, si se produjo una correcta combustión y no se escapaba el gas gracias a los acoples hidráulicos, en la ilustración No. 37 se logra apreciar como ingresa el gas al filtro de agua para posteriormente salir por la manguera de caucho con punta de cobre de dos centímetros de largo por el cual sale el gas producto para obtener la llama producida en la prueba que duro aproximadamente unos dos minutos encendida con la cantidad de biomasa utilizada (ver ilustración No.38).



Ilustración No. 37: Ingreso del gas al filtro de agua

Fuente: Autores



Ilustración No. 38: Llama obtenida en la práctica #5

Fuente: Autores

El filtro de agua al finalizar la prueba quedo con residuos de cenizas y de color café oscuro en la parte inferior y en la parte superior un café más claro, adicionalmente el filtro subió su nivel de agua puesto que toda la humedad que se encontraba en la biomasa de la tolva de biomasa era expulsada hacia el filtro por la varilla de cobre (ver ilustración No. 39), después de que se dejó enfriar el prototipo del gasificador se procedió a abrir la tolva de biomasa para poder apreciar como quedo la biomasa después de producir el gas y nos encontramos con la biomasa con un tono oscuro la parte de abajo que estaba más expuesta al calor de la combustión producida en el hogar del gasificador y la parte de arriba se encontró biomasa totalmente seca por estar expuesta a tan altas temperaturas (ver ilustración No. 40).



Ilustración No. 39: Filtro de agua al finalizar la práctica #5

Fuente: Autores



Ilustración No. 40: Tolva de biomasa al finalizar la práctica #5

Fuente: Autores

## Capítulo 4

### 4 Pruebas y resultados

Se realizaron las prácticas con el prototipo del gasificador con diferentes biomásas y condiciones medioambientales que se nos presentaron en la ciudad de Guayaquil, para obtener los resultados utilizamos como se muestra en la ilustración No. 41 un tubo de bicicleta #26 para realizar la recolección del gas y con un medidor de presión de neumático como se aprecia en la ilustración No. 42 para conocer cuanto gas obteníamos después de la gasificación de la biomasa.



Ilustración No. 41: Tubo de bicicleta

Fuente: Autores



Ilustración No. 42: Medidor de presión de neumático

Fuente: Autores

El tubo de bicicleta en donde recolectamos el gas estaba conectado a la salida del gas con cinta aislante como se muestra en la ilustración No. 43 y en la ilustración No. 44.



Ilustración No. 43: Conexión del tubo a la salida de gases

Fuente: Autores



Ilustración No. 44: Prototipo del gasificador para recolección del gas

Fuente: Autores

#### 4.1 Resultado: Práctica #1

<b>Práctica #1 proceso de gasificación</b>	
<b>Biomasa:</b>	Cascarilla de maíz
<b>Cantidad Total Utilizada:</b>	1.2 kg
<b>Cantidad como combustible térmico:</b>	0.8 kg
<b>Cantidad en tolva de biomasa:</b>	0.4 kg
<b>Temperatura ambiente:</b>	29.5°C
<b>Resultado:</b>	En esta práctica el contenido de cascarilla de maíz del hogar que es el contenedor donde se introduce la biomasa que será utilizada como combustible térmico fue muy poco puesto que la cascarilla de maíz estaba seca y se produjo la combustión muy rápida por lo que no se alcanzó la correcta pirolisis de la tolva de biomasa y no ingreso el gas al tubo de bicicleta.

#### 4.2 Resultado: Práctica #2

<b>Práctica #2 proceso de gasificación</b>	
<b>Biomasa:</b>	Cascarilla de maíz
<b>Cantidad Total Utilizada:</b>	2 kg
<b>Cantidad como combustible térmico:</b>	1.6 kg
<b>Cantidad en tolva de biomasa:</b>	0.4 kg
<b>Temperatura ambiente:</b>	28.5°C
<b>Resultado:</b>	Esta práctica fue realizada el siguiente día, la cascarilla de maíz estaba almacenada en un saquillo por lo que con el paso de las 24 horas la biomasa generó humedad y no se incineraba

	correctamente, no ingreso gas al tubo de bicicleta.
--	---

### 4.3 Resultado: Práctica #3

<b>Práctica #3 proceso de gasificación</b>	
<b>Biomasa:</b>	Virutas de madera
<b>Cantidad Total Utilizada:</b>	1.9 kg
<b>Cantidad como combustible térmico:</b>	1.4 kg
<b>Cantidad en tolva de biomasa:</b>	0.5 kg
<b>Temperatura ambiente:</b>	30.4°C
<b>Resultado:</b>	En esta práctica presentamos el problema con el pegamento que no aguantó las elevadas temperaturas, los que nos llevó a generar cambios en el prototipo.

### 4.4 Resultado: Práctica #4

<b>Práctica #4 proceso de gasificación</b>	
<b>Prototipo 2</b>	
<b>Biomasa:</b>	Virutas de madera
<b>Cantidad Total Utilizada:</b>	1.5 kg
<b>Cantidad como combustible térmico:</b>	1.5 kg
<b>Temperatura ambiente:</b>	29.7°C
<b>Resultado:</b>	Procedimos con el cambio de prototipo de gasificador de biomasa por los problemas presentados con el prototipo 1

	<p>en la práctica 3, pero en este caso el prototipo era de tamaño reducido por lo que con la cantidad necesaria de biomasa para la obtención del gas ocupaba mucho espacio lo que provocaba que no se encienda correctamente.</p>
--	---

#### 4.5 Resultado: Práctica #5

<b>Práctica #5 proceso de gasificación</b>	
<b>Biomasa:</b>	Virutas de madera
<b>Cantidad Total Utilizada:</b>	2 kg
<b>Cantidad como combustible térmico:</b>	1.5 kg
<b>Cantidad en tolva de biomasa:</b>	0.5 kg
<b>Temperatura ambiente:</b>	29.9°C
<b>Resultado:</b>	<p>Con el prototipo mejorado si obtuvimos un correcto funcionamiento (ver ilustración No. 45), con la implementación del tubo de bicicleta recolectamos el gas y después de que terminó el proceso de gasificación cuando se consumió toda la biomasa del hogar se realizó la medición con el medidor de presión neumática obteniendo como resultado el valor en PSI que significa libras por pulgada cuadrada. En las ilustraciones No. 46 – 47 – 48 se indica todo el proceso realizado.</p>
<b>PSI:</b>	10 PSI
<b>Tiempo de recolección:</b>	30-35 minutos



Ilustración No. 45: Proceso de gasificación con virutas de madera  
Fuente: Autores

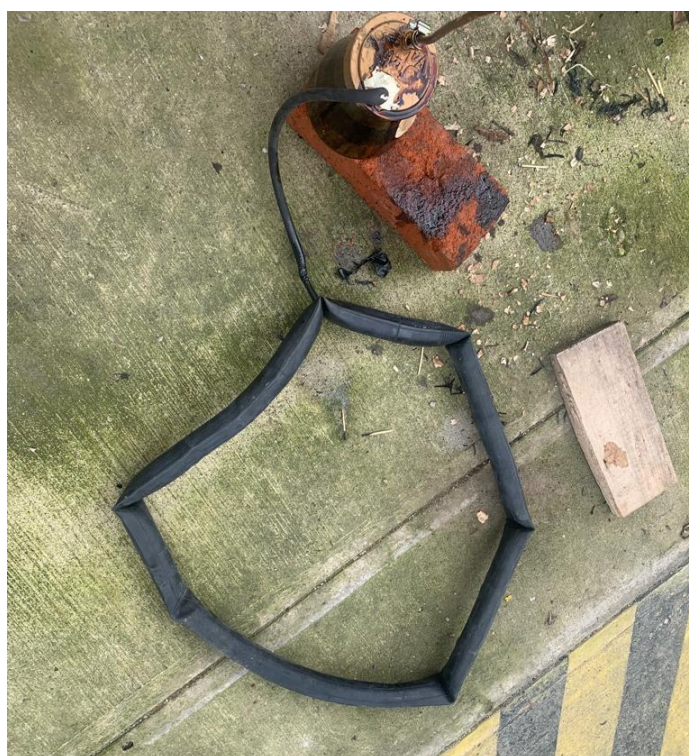


Ilustración No. 46: Recolección del gas con virutas de madera  
Fuente: Autores





Ilustración No. 47: Medición del gas empleando virutas de madera

Fuente: Autores



Ilustración No. 48: Resultado en PSI con virutas de madera

Fuente: Autores

Se realizó una práctica adicional esta vez con el prototipo mejorado y cambiando la biomasa, de virutas de madera a cascarilla de maíz, adicional a esto la cascarilla de maíz la secamos con ayuda del sol para eliminar la humedad que nos causó problema en la práctica #2, y para obtener una idea clara de si con la cascarilla de maíz se tendría los mismos resultados positivos que los conseguimos con las virutas de madera.

#### 4.6 Resultado: Práctica #6

<b>Práctica #6 proceso de gasificación</b>	
<b>Biomasa:</b>	Cascarilla de maíz
<b>Cantidad Total Utilizada:</b>	1.7 kg
<b>Cantidad como combustible térmico:</b>	1.2 kg
<b>Cantidad en tolva de biomasa:</b>	0.5 kg
<b>Temperatura ambiente:</b>	29.9°C
<b>Resultado:</b>	Terminada la práctica #5 esperamos que toda la biomasa sea consumida y retiramos la ceniza y la biomasa que era virutas de madera y se cambió por cascarilla de maíz, tanto en el hogar como en la tolva de combustible. Así mismo esperamos que ocurra todo el proceso de gasificación y se procedió con la medición del gas.
<b>PSI:</b>	8 PSI
<b>Tiempo de recolección:</b>	30-35 minutos

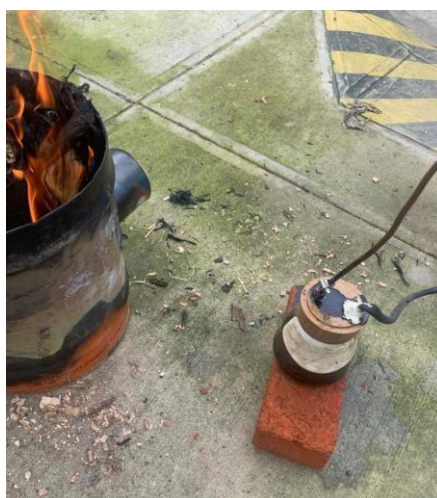


Ilustración No. 49: Proceso de gasificación con cascarilla de maíz

Fuente: Autores



Ilustración No. 50: Medición del gas empleando cascarilla de arroz

Fuente: Autores



Ilustración No. 51: Resultado en PSI con cascarilla de maíz

Fuente: Autores

## 4.7 Gráfico de resultados

En la siguiente ilustración No. 52 se indica la cantidad de gas en PSI obtenida después del proceso de gasificación, se muestra los resultados de ambas biomásas tanto de la cascarilla de maíz y de las virutas de madera.

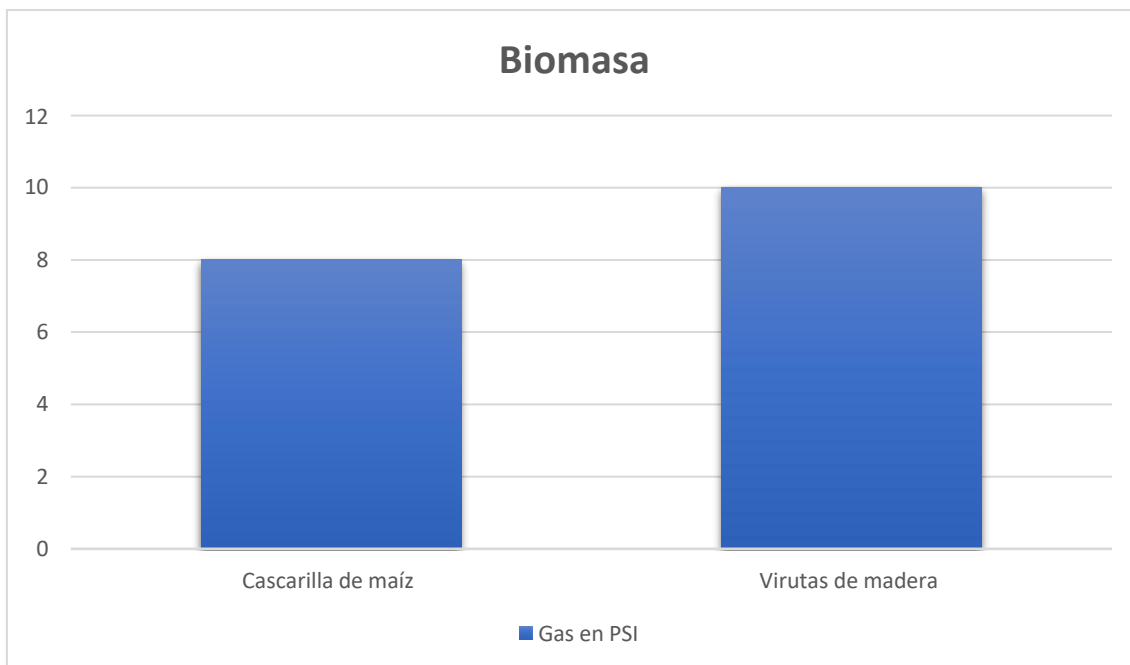


Ilustración No. 52: Comparativa de biomásas

Fuente: Autores

Se refleja que se obtuvo mayor cantidad de gas con virutas de madera, después de haber realizado el proceso de gasificación y teniendo en cuenta todos los factores que se nos presentaron en cada práctica, cabe indicar que con ambas biomásas se utilizó la misma cantidad de volumen en la tolva, dando la obtención de un mejor resultado con virutas de madera que con la cascarilla de maíz se debe a que la cascarilla de maíz se incinera más rápido haciendo que toda la biomasa se convierta en ceniza más rápido que las virutas de madera, por otro lado, las virutas de madera también arden rápido porque hay mayor superficie de contacto con el oxígeno del aire lo que hace más rápida la reacción de combustión pero adicional entre las virutas habían trozos de madera pequeños pero que hacían que la llama no se apague fácilmente y se mantenga por más tiempo que con la cascarilla de maíz.

## 4.8 Estudio de factibilidad

Se hizo el análisis de la producción de energía mediante la biomasa con el programa “Homer Pro” donde colocaron los siguientes datos:

<b>Promedio de consumo diario</b>	11.26 (kWh/day)
<b>Potencia Pico</b>	0.86 (kW)
<b>Factor de Carga</b>	0.55

Se utilizó un auto generador con las características que se muestran en la ilustración No. 53.

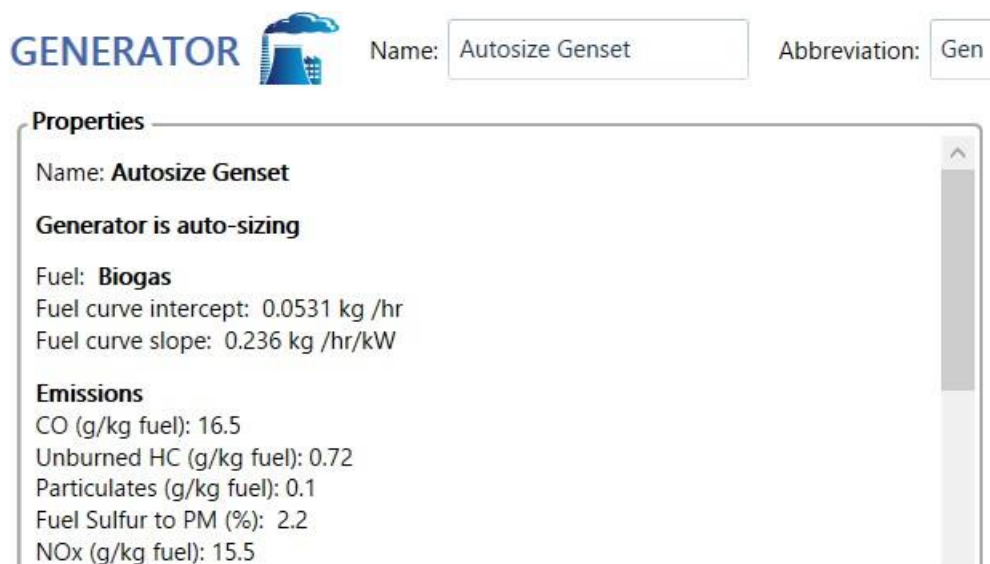


Ilustración No 53: Características del auto generador

Fuente: Autores

La biomasa que nos pide el programa es de un promedio de 1.2 (toneladas/ día) para todos los meses como se muestra en la ilustración No.54.

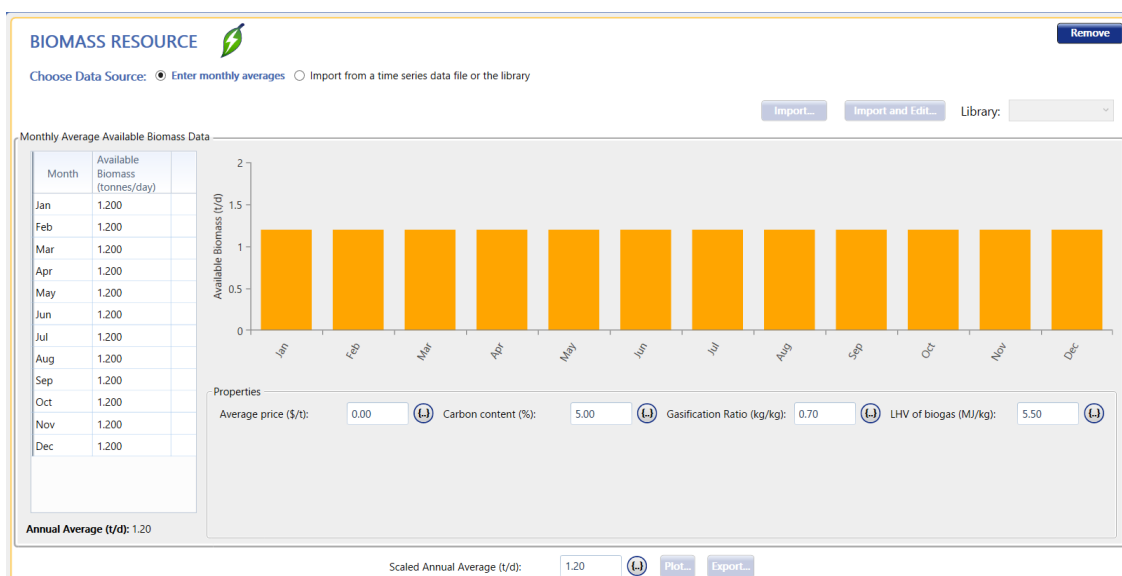


Ilustración No. 54: Cantidad de toneladas de biomasa

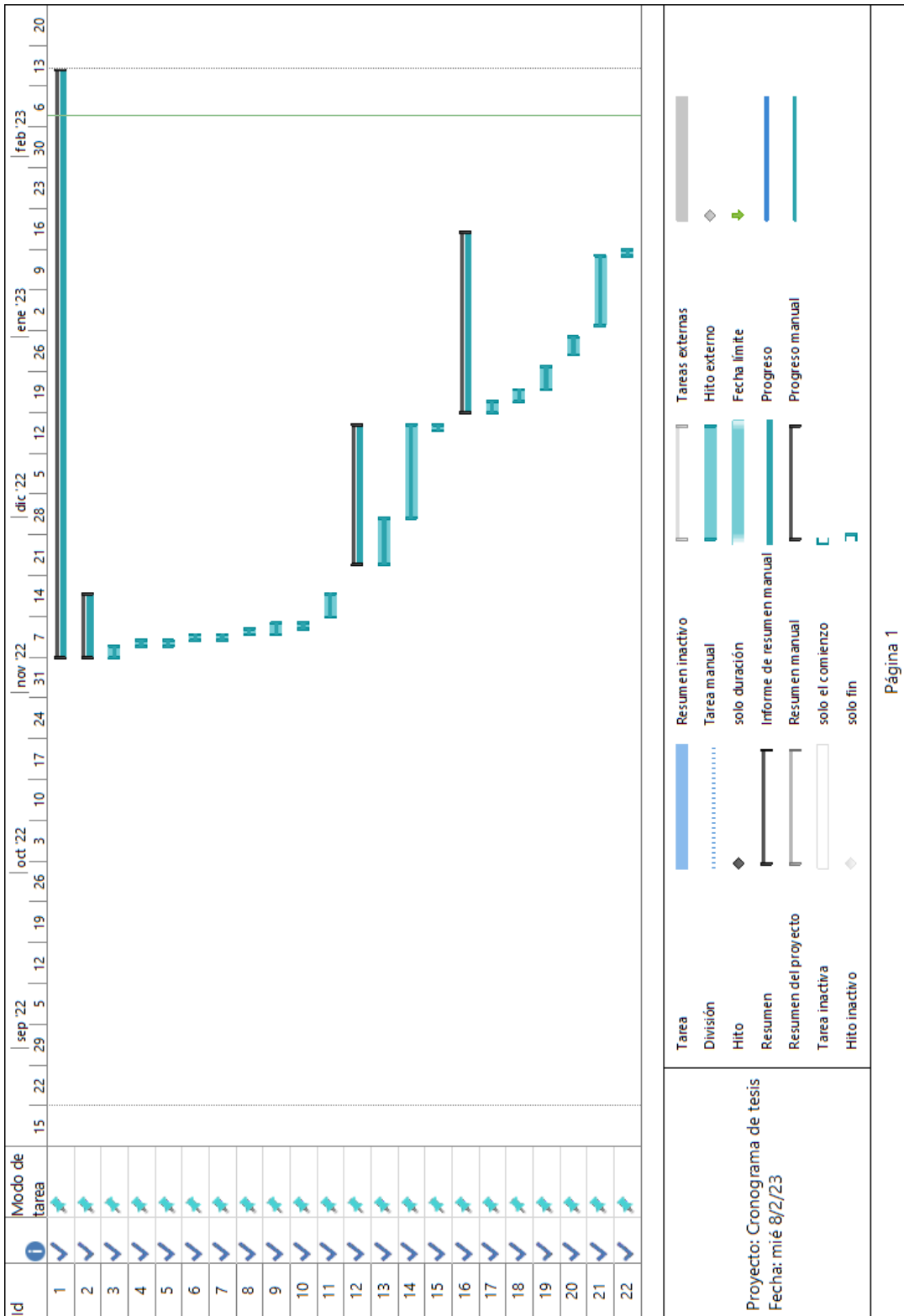
Fuente: Autores

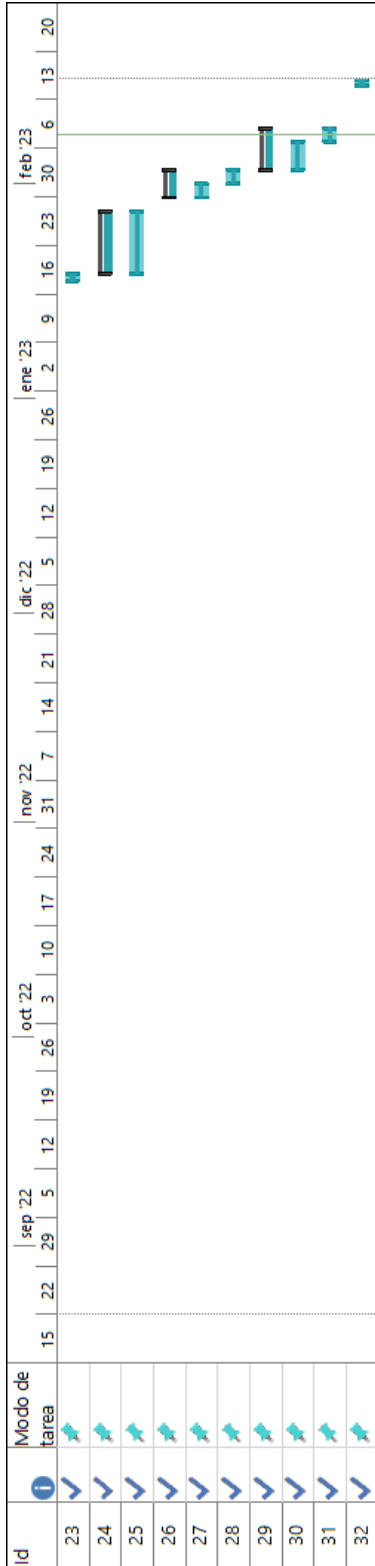
Luego de la simulación se obtuvieron los siguientes resultados:

<b>Generador (kW):</b>	0.95
<b>Costo de implementación NPC (\$):</b>	\$7103
<b>Costo de la Energía LCOE (\$/kWh):</b>	\$0.134
<b>Costo de operación (\$):</b>	\$512.70
<b>Producción del generador (kWh):</b>	4113
<b>Consumo de combustible (toneladas):</b>	2.05
<b>Costo de operación y mantenimiento (\$/año):</b>	\$250

# Capítulo 5

## 5.1 Cronograma





Projecto: Cronograma de tesis  
Fecha: mié 8/2/23

Tarea	Resumen inactivo	Tareas externas
División	Tarea manual	Hito externo
Hito	solo duracion	Fecha limite
Resumen	Informe de resumen manual	Progreso
Resumen del proyecto	Resumen manual	Progreso manual
Tarea inactiva	solo el comienzo	
Hito inactivo	solo fin	



Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	sep '22				
						15	22	29	5	1
1	✓	<b>ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA</b>	<b>73 días?</b>	<b>lun 7/11/22</b>	<b>mié 15/2/23</b>					
2	✓	<b>Capítulo 1</b>	<b>9 días</b>	<b>lun 7/11/22</b>	<b>jue 17/11/22</b>					
3	✓	Introducción	2 días	lun 7/11/22	mar 8/11/22					
4	✓	Problema	1 día	mié 9/11/22	mié 9/11/22					
5	✓	Antecedentes	1 día	mié 9/11/22	mié 9/11/22					
6	✓	Justificación	1 día	jue 10/11/22	jue 10/11/22					
7	✓	Delimitación	1 día	jue 10/11/22	jue 10/11/22					
8	✓	Beneficiarios	1 día	vie 11/11/22	vie 11/11/22					
9	✓	Objetivos	2 días	vie 11/11/22	sáb 12/11/22					
10	✓	Entrega del Capítulo 1	1 día	sáb 12/11/22	sáb 12/11/22					
11	✓	Correcciones del capítulo 1	4 días	lun 14/11/22	jue 17/11/22					
12	✓	<b>Capítulo 2</b>	<b>18 días</b>	<b>mié 23/11/22</b>	<b>vie 16/12/22</b>					
13	✓	Revisión de proyectos similares	6 días	mié 23/11/22	mié 30/11/22					
14	✓	Elaboración del marco teórico	12 días	jue 1/12/22	vie 16/12/22					
15	✓	Entrega del capítulo 2	1 día	vie 16/12/22	vie 16/12/22					
16	✓	<b>Capítulo 3</b>	<b>23 días</b>	<b>lun 19/12/22</b>	<b>mié 18/1/23</b>					
17	✓	Metodología y medios	2 días	lun 19/12/22	mar 20/12/22					
18	✓	Selección del prototipo del gasificador	2 días	mié 21/12/22	jue 22/12/22					
19	✓	Selección de Materiales	2 días	vie 23/12/22	lun 26/12/22					
20	✓	Diseño del prototipo	3 días	mié 28/12/22	sáb 31/12/22					
21	✓	Guía de prácticas	10 días	mar 3/1/23	sáb 14/1/23					
22	✓	Entrega del Capítulo 3	1 día	dom 15/1/23	dom 15/1/23					

<p>Resumen inactivo</p> <p>Tarea manual</p> <p>Resumen</p> <p>Resumen del proyecto</p> <p>Tarea inactiva</p> <p>Hito inactivo</p>	<p>Resumen inactivo</p> <p>Tarea manual</p> <p>Resumen</p> <p>Resumen del proyecto</p> <p>Tarea inactiva</p> <p>Hito inactivo</p>	<p>Tareas externas</p> <p>Hito externo</p> <p>Fecha límite</p> <p>Progreso</p> <p>Progreso manual</p>
---	---	---

Proyecto: Cronograma de tesis  
 Fecha: mié 8/2/23

Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	15	22	29	5	1
23	✓	Correcciones del capítulo 3	1 día	mié 18/1/23	mié 18/1/23					
24	✓	<b>Capítulo 4</b>	7 días	jue 19/1/23	vie 27/1/23					
25	✓	Pruebas y resultados	7 días	jue 19/1/23	vie 27/1/23					
26	✓	<b>Capítulo 5</b>	4 días	lun 30/1/23	jue 2/2/23					
27	✓	Cronograma	2 días	lun 30/1/23	mar 31/1/23					
28	✓	Presupuesto	2 días	mié 1/2/23	jue 2/2/23					
29	✓	<b>Capítulo 6</b>	4 días?	vie 3/2/23	mié 8/2/23					
30	✓	Conclusiones	2 días	vie 3/2/23	lun 6/2/23					
31	✓	Recomendaciones	2 días	mar 7/2/23	mié 8/2/23					
32	✓	<b>Entrega del proyecto técnico</b>	1 día	mié 15/2/23	mié 15/2/23					

<p>Proyecto: Cronograma de tesis Fecha: mié 8/2/23</p>			
--	--	--	--

## 5.2 Presupuesto

A	Denominación	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
<b>Egresos (dólares)</b>					
1	Movilización	1	U	\$ 80	\$ 80
2	Acoples hidráulicos	2	U	\$ 5	\$ 10
3	Abrezaderas	2	U	\$1	\$2
4	Impresiones y papelería	1	U	\$ 15	\$ 15
5	Tanque metálico cilíndrico	2	U	\$ 25	\$ 50
6	Pasta térmica	2	U	\$ 5	\$ 10
7	Tanque metálico pequeño	1	U	\$ 5	\$ 5
8	Tanque de tolva	1	U	\$7	7
9	Electrodos	7	U	\$ 0.25	\$ 1.75
10	Disco de corte	2	U	\$ 1.70	\$ 3.40
11	Tubo de cobre	1	U	\$ 7	\$ 7
12	Manguera de caucho	1	U	\$ 2	\$ 2
13	Cinta aislante	1	U	\$ 1.5	\$ 1.5
14	Termometro Marca "Omron"	1	U	\$70	\$70
15	Tubo de bicicleta	1	U	\$5	\$5
16	Medidor de presión neumática	1	U	\$10	\$10
17	Gastos varios	1	U	\$ 100	\$ 100
				<b>Total(A)</b>	<b>\$279.65</b>

## Capítulo 6

### 6.1 Conclusiones

- Se concluyó con el diseño y funcionamiento óptimo del gasificador para la realización de este proyecto.
- Se alcanzó la recolección de datos de pruebas, se realizó la comparativa de cada una de las biomásas dando así la resolución de que la gasificación de biomasa se puede llevar de manera viable usando virutas de madera y cascarilla de maíz.
- Se puede concluir que la producción de energía a través del biogás es bastante factible con un valor de \$0.134 (\$/kWh) obtenido en el programa “Homer Pro”, es mayor que el costo convencional, pero estamos hablando de una energía limpia.

### 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda para la implementación y desarrollo de un gasificador de biomasa tener en cuenta el tipo de materia prima que se desea utilizar y los materiales adecuados para la elaboración.
- Antes de fabricar un modelo de gasificador se recomienda tener conocimiento previo sobre los tipos que existen y conocer el que mejor se adapte a las necesidades del trabajo a realizar.
- Evitar que haya fugas del gas producto del gasificador y conocer los riesgos que puede llevar un proceso de gasificación, para evitar accidentes o daños a la propiedad.

## Capítulo 7

### 7.1 Referencias bibliográficas

- [1] A. Vilches y P. D. Gil, «La Construcción De Un Futuro Sostenible En Un Planeta En Riesgo», *Alambique*, vol. 55, n.º January 2008, pp. 9-19, 2008.
- [2] J. S. Arroyo Vinuesa y W. S. Reina Guzmán, «Aprovechamiento Del Recurso Biomasa a Partir De Los Desechos De Madera Para Una Caldera De Vapor», *Ingenius*, n.º 16, p. 20, 2016, doi: 10.17163/ings.n16.2016.03.
- [3] A. V. Villacis Larco, «ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO POR LA INCIDENCIA DE LUZ ARTIFICIAL Y VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN», 2014.
- [4] J. F. Pérez-Bayer, Ó. H. Díaz-Ibarra, R. C. Obando-Enriquez, y A. Molina-Ochoa, «Diseño Conceptual de un Gasificador de Biomasa de Lecho Fijo en Equicorriente a Escala Piloto», *TecnoLógicas*, n.º 22, p. 121, 2009, doi: 10.22430/22565337.226.
- [5] L. Angel y L. Alvarez-icaza, «Modelado con validación experimental de un gasificador de biomasa», 2014.
- [6] R. Lesme, E. Silva, R. Vieira, y J. Martinez, «EVALUACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA AVANZADO GASIFICADOR DE BIOMASA / MOTOR RECIPROCANTE PARA LA GENERACIÓN DE Introducción Desarrollo Parámetros operacionales», *Tecnol. Química*, vol. XXXI, n.º 3, pp. 23-30, 2011.
- [7] M. Takano y K. Hoshino, «Bioethanol production from rice straw by simultaneous saccharification and fermentation with statistical optimized cellulase cocktail and fermenting fungus», *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 5, n.º 1, 2018, doi: 10.1186/s40643-018-0203-y.
- [8] M. E. Bohórquez Tutivén, «Diseño de un Equipo Experimental de Flujo Ascendente (Updraft) para Gasificación Térmica de Residuos de Biomasa Agroindustrial», 2015.
- [9] E. Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, «Plan Maestro de Electricidad Situación Actual Del Sector Eléctrico», *Minist. Energía y Recur. Nat. no Renov.*, vol. 1, p. 27, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/2.-TRANSFORMACION-Y-SITUACION-ACTUAL-DEL-SECTOR-ELECTRICO.pdf>
- [10] K. Im-Orb, L. Simasatitkul, y A. Arpornwichanop, «Analysis of synthesis gas production with a flexible H<sub>2</sub>/CO ratio from rice straw gasification», *Fuel*, vol. 164, pp. 361-373, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.018.
- [11] I. Tobío-Pérez, Y. Díaz-Domínguez, M. Pfeil, D. Denfeld, R. Piloto-Rodríguez, y S. Pohl, «Simulación del proceso de gasificación de biomásas a partir de *Jatropha curcas* y *Dichrostachys cinerea*», *Afinidad*, vol. 77, n.º 591, pp. 228-235, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/377424/470732>
- [12] C. Espinoza, «CONGRESO INTERNACIONAL I+D+i EN SOSTENIBILIDAD

- ENERGÉTICA», p. 134, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00639.pdf>
- [13] M. Fernández Baca, «La energía de la biomasa», *Ing. Ind.*, n.º 012, pp. 21-29, 2018, doi: 10.26439/ing.ind1994.n012.2791.
- [14] M. Chávez, «La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos», *An. Química - RSEQ*, vol. 115, n.º 5, pp. 399-407, 2019, [En línea]. Disponible en: <http://analesdequimica.com/115-5/1155-chavez.pdf>
- [15] M. Alvarez, «Gasificación para la Generación de energía», *Buen manejo desechos*, vol. V, p. 201, 2016, [En línea]. Disponible en: [http://www.probiomasa.gob.ar/\\_pdf/04Gasificacion\\_hojaTecnica.pdf](http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/04Gasificacion_hojaTecnica.pdf)
- [16] R. Gutiérrez, A. Juan, y J. Arzola, «APLICACIONES INDUSTRIALES Modelado de indicadores de operación de un gasificador downdraft por redes neuronales para biomasa Eichhornia Crassipes Operational performance indicators of a downdraft gasifier through modeling by neural networks for biomass Ei», *Ing. Energética*, vol. 40, n.º 3, pp. 212-222, 2019, [En línea]. Disponible en: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>
- [17] S. van Loo y J. Koppejan, «The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing Edited by Sjaak van Loo and Jaap Koppejan», n.º January, p. 426, 2008.
- [18] P. Alegría-castellanos, «Instalación y puesta en marcha de un gasificador de lecho fluidizado», p. 120, 2017.
- [19] A. Gallardo, «Diseño del proceso de gasificación para los combustibles sólidos recuperados procedentes de una planta de tratamiento mecánico biológico», p. 40, 2019.
- [20] P. Gimenez, «BIOMASA FORESTAL Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Parte III: Producción de elementos», 2018.
- [21] C. E. Augusto y A. M. Zapata, «Gasificación De Biomasa Para Producción De Combustibles De Bajo Poder Calorífico Y Su Utilización En Generación De Potencia Y Calor», *Sci. Tech.*, vol. 2, n.º 25, pp. 155-159, 2004, [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7229>
- [22] P. Alegría Castellanos, «Identificación Y Control De Un Gasificador De Lecho Fluidizado», p. 169, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11042/2896>
- [23] D. Econ, «Construcción de un gasificador de tiro descendente», vol. 25, n.º 100, pp. 567-570, 2011.
- [24] J. Martillo, R. Lesme, A. Martínez, L. Oliva, y L. Orozco, «Estudios paramétricos de la gasificación de la tusa de maíz en gasificadores downdraft», *Tecnol. Química*, vol. 39, n.º 2, pp. 455-470, 2019, [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v39n2/2224-6185-rtq-39-02-455.pdf>
- [25] J. A. Suarez, «Gasificación en flujo ascendente de madera pelletizada de abedul», n.º May, 2005.

## Anexos









**GENERATOR** Name: Autosize Genset Abbreviation: Gen

**Properties**  
 Name: Autosize Genset  
 Generator is auto-sizing  
 Fuel: Biogas  
 Fuel curve intercept: 0.0531 kg /hr  
 Fuel curve slope: 0.236 kg /hr/kW  
**Emissions**  
 CO (g/kg fuel): 16.5  
 Unburned HC (g/kg fuel): 0.72  
 Particulates (g/kg fuel): 0.1  
 Fuel Sulfur to PM (%): 2.2  
 NOx (g/kg fuel): 15.5

**Generator Cost**  
 In \$/kW of capacity:  
 Initial Capital (\$): 500.00  
 Replacement (\$): 500.00  
 O&M (\$/op. hour): 0.030  
 Fuel Price (\$/kg): 1.00

**Optimization**  
 Simulate systems with and without this generator  
 Include in all systems

**Electrical Bus**  
 AC  DC

**Site Specific**  
 Minimum Load Ratio (%): 25.00 CHP Heat Recovery Ratio (%): 0.00 Lifetime (Hours): 15,000.00 Minimum Runtime (Minutes): 0.00  
 Initial Hours: 0.00

Advanced...

HOMER Pro Microgrid Analysis Tool x64 3.15.2 (Evaluation Edition)

**DESIGN**

**ELECTRIC LOAD** Name: Electric Load #1

**January Profile**

Hour	Load (kW)
0	100.000
1	100.000
2	100.000
3	100.000
4	100.000
5	100.000
6	100.000
7	100.000
8	100.000
9	100.000
10	100.000
11	100.000
12	100.000
13	100.000

**Daily Profile** (Bar chart showing constant 100 kW load over 24 hours)

**Seasonal Profile** (Box plot showing consistent load distribution across months)

**Yearly Profile** (Heatmap showing constant 100 kW load throughout the year)

**Metric Summary:**

Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/day)	2,400	11.26
Average (kW)	100	.47
Peak (kW)	183.32	.86
Load factor	.55	.55

Load Type:  AC  DC

Scaled Annual Average (kWh/day): 11.26

Efficiency (Advanced):  
 Efficiency multiplier: 1  
 Capital cost (\$): 0  
 Lifetime (yr): 10

Plot... Export...

HOMER Pro Microgrid Analysis Tool x64 3.15.2 (Evaluation Edition)

**RESULTS**

Summary Tables Graphs Calculation Report

Export... Export Details... Compare Economics Column Choices... Categorized Overall

Optimization Results

Left Double Click on a particular system to see its detailed simulation results.

Architecture		Cost				System		Gen				
Gen (kW)	Dispatch	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (tons/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (tons)	O&M Cost (\$/yr)	Fuel Cost (\$/yr)
0.950	LF	\$7,103	\$0.134	\$512.70	\$475.00	100	2.05	8,760	4,113	2.05	250	0