



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**“CUANTIFICACIÓN DEL GAS POBRE PRODUCIDO POR EL  
GASIFICADOR DOWNDRAFT DE LA FACULTAD DE  
MECÁNICA”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**AUTOR:**

**NELSON JONATAN VELASTEGUI CASCO**

Riobamba – Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**“CUANTIFICACIÓN DEL GAS POBRE PRODUCIDO POR EL  
GASIFICADOR DOWNDRAFT DE LA FACULTAD DE  
MECÁNICA”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**AUTOR: NELSON JONATAN VELASTEGUI CASCO**

**DIRECTOR: Ing. MARCO ANTONIO ORDOÑEZ VIÑAN**

Riobamba–Ecuador

2023

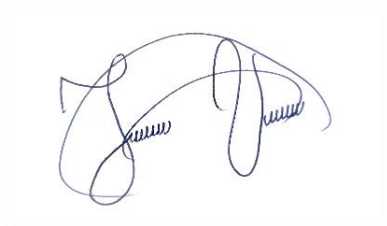
© 2023, Nelson Jonatan Velastegui Casco

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Nelson Jonatan Velastegui Casco, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 18 de julio de 2023

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a thin black rectangular border. The signature is stylized and appears to read 'Nelson Jonatan Velastegui Casco'.


---

**Nelson Jonatan Velastegui Casco**

**CI: 0603999137**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **CUANTIFICACIÓN DEL GAS POBRE PRODUCIDO POR EL GASIFICADOR DOWNDRAFT DE LA FACULTAD DE MECÁNICA**, realizado por el señor: **NELSON JONATAN VELASTEGUI CASCO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Marco Homero Almendariz Puente <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-07-18
Ing. Marco Antonio Ordoñez Viñan <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-07-18
Ing. Edwin Ángel Jácome Domínguez <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-07-18

## **DEDICATORIA**

Primeramente, a Dios porque es el ser supremo que no da la vida y nos llena de bendiciones.

A mis padres Martha y Nelson por su apoyo incondicional, en todas las etapas de mi vida, por su constante motivación que me ha permitido ser una persona de bien, de la misma manera a todos mis hermanos que gracias a sus consejos me han motivado a ser mejor cada día y superar los obstáculos de la vida que no todo es fácil, pero tampoco imposible de lograr.

Jonatan

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por ser la guía durante este largo transcurso para culminar mi carrera, por haberme dado la fortaleza y valor necesario para levantarme en los momentos difíciles de mi vida. A mis padres por ser el apoyo necesario para mi formación personal y académica, por su dedicación, atención, en todo momento de mi vida de estudiante. A mis hermanos por ser parte importante en mi vida.

A la ESPOCH, Facultad de Mecánica y Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, institución que me abrió las puertas para capacitarme y brindarme conocimientos para desempeñarlos de la manera más oportuna en el ambiente profesional.

A los docentes quienes con sus conocimientos y consejos me guiaron hasta alcanzar mi meta final, en especial al Ing. Marco Antonio Ordoñez y al Ing. Edwin Ángel Jácome por su dirección y asesoría para lograr culminar con éxito este Proyecto de Titulación.

Jonatan

## INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xv
RESUMEN .....	xvi
SUMMARY .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA .....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos .....	4
1.4.1. <i>Objetivo general</i> .....	4
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	4

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Gasificación .....	5
2.1.1. <i>Gas pobre o gas de síntesis</i> .....	5
2.1.2. <i>Pirolisis</i> .....	5
2.2. Biomasa .....	5
2.3. Intercambiadores de calor .....	6
2.4. Alquitrán .....	7
2.5. Importancia de la gasificación.....	7
2.6. Gasificador .....	7
2.6.1. <i>Tipos de gasificadores</i> .....	7
2.6.1.1. <i>Gasificadores updraft</i> .....	8
2.6.1.2. <i>Gasificadores downdraft</i> .....	8
2.6.2. <i>Proceso de gasificación</i> .....	9



2.6.2.1.	<i>Secado</i>	10
2.6.2.2.	<i>Pirolisis</i>	10
2.6.2.3.	<i>Oxidación</i>	11
2.6.2.4.	<i>Reducción</i>	11
2.7.	<b>Qué es cuantificar</b>	11
2.7.1.	<i>Medición de flujo o caudal</i>	11
2.7.2.	<i>Definición de flujo o caudal</i>	12
2.7.2.1.	<i>Flujo volumétrico</i>	12
2.7.2.2.	<i>Flujo másico</i>	12
2.7.3.	<b>Conceptos físicos necesarios para medición de flujo o caudal</b>	13
2.7.3.1.	<i>Calor específico</i>	13
2.7.3.2.	<i>Viscosidad</i>	13
2.7.4.	<b>Velocidad del fluido dentro de una tubería</b>	14
2.7.4.1.	<i>Flujo laminar</i>	14
2.7.4.2.	<i>Flujo turbulento</i>	15
2.7.5.	<b>Tipos de medidores de flujo o caudal</b>	15
2.7.5.1.	<i>Medidor de caudal tubo pitot</i>	16
2.7.5.2.	<i>Medidor de caudal de tubo Venturi</i>	16
2.7.5.3.	<i>Medidor de caudal placa orificio</i>	17
2.7.5.4.	<i>Medidor de caudal de rotámetro</i>	17
2.7.5.5.	<i>Medidor de caudal tipo turbina</i>	18
2.7.5.6.	<i>Medidor de caudal electromagnético</i>	19
2.7.5.7.	<i>Medidor de flujo de Vortex</i>	19
2.7.5.8.	<i>Medidor de flujo ultrasónico</i>	20
2.8.	<b>Conceptos básicos para la operación y mantenimiento de equipos</b>	21
2.8.1.	<i>Manual de operación</i>	21
2.8.2.	<i>Plan de mantenimiento</i>	21
2.8.2.1.	<i>Propósito del mantenimiento</i>	21
2.8.2.2.	<i>Ficha técnica</i>	22
2.8.2.3.	<i>Mantenimiento preventivo</i>	22
2.8.2.4.	<i>Mantenimiento correctivo</i>	22

### **CAPÍTULO III**

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	23
3.1.	<b>Reconocimiento y establecimiento de la situación actual del equipo gasificador</b>	23
3.1.1.	<i>Características y elementos del equipo gasificador</i>	23

3.1.1.1.	<i>Características generales</i> .....	23
3.1.1.2.	<i>Componentes del equipo gasificador</i> .....	24
3.1.1.3.	<i>Reactor del gasificador</i> .....	25
3.1.1.4.	<i>Ciclón</i> .....	26
3.1.1.5.	<i>Sistema de enfriamiento</i> .....	27
3.1.1.6.	<i>Sistema de Filtrado</i> .....	28
3.1.1.7.	<i>Sistema de control de temperatura del gasificador</i> .....	29
3.1.1.8.	<i>Sistema dosificador de biomasa</i> .....	31
<b>3.2.</b>	<b>Encendido experimental del equipo gasificador</b> .....	<b>32</b>
3.2.1.	<i>Materiales y equipos utilizados</i> .....	32
3.2.2.	<i>Procedimiento experimental de prueba del equipo gasificador</i> .....	33
<b>3.3.</b>	<b>Toma de medida experimental de la salida de caudal del gas pobre producido</b> .	<b>36</b>
3.3.1.	<i>Toma de medida de temperatura de salida del gas pobre</i> .....	36
3.3.2.	<i>Toma de velocidad de salida del gas pobre</i> .....	37
3.3.3.	<i>Cálculo de caudal de salida del gas pobre</i> .....	37
<b>3.4.</b>	<b>Estudio, selección y dimensionamiento adecuado del equipo de medición</b> .....	<b>38</b>
3.4.1.	<i>Tipo de fluido</i> .....	39
3.4.2.	<i>Velocidad a la que circula el fluido</i> .....	39
3.4.3.	<i>Dimensión de tubería para la instalación del medidor de flujo de gas pobre</i> .....	39
3.4.4.	<i>Rango de medición del equipo medidor de flujo</i> .....	39
<b>3.5.</b>	<b>Adquisición del equipo de medición de caudal</b> .....	<b>41</b>
<b>3.6.</b>	<b>Instalación del medidor de caudal</b> .....	<b>41</b>
3.6.1.	<i>Dimensionamiento de bridas para instalación de medidor de syngas</i> .....	42
3.6.2.	<i>Disposición de normas y dimensiones para la instalación del medidor de flujo</i> .....	43
3.6.3.	<i>Diseño de la instalación de las tuberías del medidor de caudal</i> .....	44
3.6.4.	<i>Proceso de instalación del equipo</i> .....	45
<b>3.7.</b>	<b>Protocolo de puesta en marcha y pruebas del equipo</b> .....	<b>46</b>
3.7.1.	<i>Parámetros de primera gasificación</i> .....	46
3.7.1.1.	<i>Proceso de primera gasificación</i> .....	46
3.7.2.	<i>Parámetros segunda gasificación</i> .....	46
3.7.2.1.	<i>Proceso de segunda gasificación</i> .....	47
3.7.3.	<i>Parámetros de tercera gasificación</i> .....	47
3.7.3.1.	<i>Proceso de tercera gasificación</i> .....	47
3.7.4.	<i>Parámetros de cuarta gasificación</i> .....	47
<b>3.8.</b>	<b>Toma de datos de las diferentes gasificaciones</b> .....	<b>47</b>
<b>3.9.</b>	<b>Proceso para balance de masas en la gasificación</b> .....	<b>48</b>
3.9.1.	<i>Cantidad de energía producida por el gas pobre</i> .....	50

<b>3.10.</b>	<b>Plan de mantenimiento preventivo de medidor de flujo de gas pobre .....</b>	<b>50</b>
--------------	--------------------------------------------------------------------------------	-----------

## **CAPÍTULO IV**

<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.</b>	<b>Datos primera gasificación.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.1.</b>	<b><i>Datos de temperatura del gasificador .....</i></b>	<b>51</b>
<b>4.1.2.</b>	<b><i>Datos de caudal, temperatura y presión de salida del gas pobre .....</i></b>	<b>51</b>
<b>4.1.3.</b>	<b><i>Cálculo balance de masas primera gasificación.....</i></b>	<b>52</b>
<b>4.1.3.1.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de biomasa.....</i></b>	<b>52</b>
<b>4.1.3.2.</b>	<b><i>Cálculo de flujo másico de entrada de aire.....</i></b>	<b>52</b>
<b>4.1.3.3.</b>	<b><i>Cálculo de flujo másico de gas pobre.....</i></b>	<b>52</b>
<b>4.1.3.4.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de cenizas .....</i></b>	<b>53</b>
<b>4.1.3.5.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de alquitrán .....</i></b>	<b>53</b>
<b>4.2.</b>	<b>Datos segunda gasificación.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.1.</b>	<b><i>Datos de temperatura del gasificador .....</i></b>	<b>54</b>
<b>4.2.2.</b>	<b><i>Datos de caudal, temperatura y presión de salida del gas pobre .....</i></b>	<b>54</b>
<b>4.2.3.</b>	<b><i>Balance de masas segunda gasificación .....</i></b>	<b>55</b>
<b>4.2.3.1.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de biomasa.....</i></b>	<b>55</b>
<b>4.2.3.2.</b>	<b><i>Cálculo de flujo másico de entrada de aire.....</i></b>	<b>55</b>
<b>4.2.3.3.</b>	<b><i>Cálculo de flujo másico de gas pobre.....</i></b>	<b>56</b>
<b>4.2.3.4.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de cenizas .....</i></b>	<b>56</b>
<b>4.2.3.5.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de alquitrán .....</i></b>	<b>56</b>
<b>4.3.</b>	<b>Datos tercera gasificación .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.1.</b>	<b><i>Datos de temperatura del gasificador .....</i></b>	<b>57</b>
<b>4.3.2.</b>	<b><i>Datos de caudal, temperatura y presión de salida del gas pobre .....</i></b>	<b>58</b>
<b>4.3.3.</b>	<b><i>Balance de masas tercera gasificación .....</i></b>	<b>58</b>
<b>4.3.3.1.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de biomasa.....</i></b>	<b>58</b>
<b>4.3.3.2.</b>	<b><i>Cálculo de flujo másico de entrada de aire.....</i></b>	<b>58</b>
<b>4.3.3.3.</b>	<b><i>Cálculo de flujo másico de gas pobre.....</i></b>	<b>59</b>
<b>4.3.3.4.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de cenizas.....</i></b>	<b>59</b>
<b>4.3.3.5.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de alquitrán .....</i></b>	<b>59</b>
<b>4.4.</b>	<b>Datos cuarta gasificación .....</b>	<b>60</b>
<b>4.4.1.</b>	<b><i>Datos de temperatura del gasificador .....</i></b>	<b>60</b>
<b>4.4.2.</b>	<b><i>Datos de caudal cuarta gasificación. ....</i></b>	<b>61</b>
<b>4.4.3.</b>	<b><i>Balance de masas cuarta gasificación .....</i></b>	<b>61</b>
<b>4.4.3.1.</b>	<b><i>Cálculo de cantidad de biomasa.....</i></b>	<b>61</b>

4.4.3.2.	<i>Cálculo de flujo másico de entrada de aire.....</i>	61
4.4.3.3.	<i>Cálculo de flujo másico de gas pobre.....</i>	62
4.4.3.4.	<i>Cálculo de cantidad de cenizas .....</i>	62
4.4.3.5.	<i>Cálculo de cantidad de alquitrán .....</i>	62
<b>4.5.</b>	<b>Cálculo energía del gas pobre producido .....</b>	<b>63</b>
4.5.1.	<i>Primera gasificación.....</i>	63
4.5.2.	<i>Segunda gasificación.....</i>	63
4.5.3.	<i>Tercera gasificación .....</i>	63
4.5.4.	<i>Cuarta gasificación.....</i>	64
<b>4.6.</b>	<b>Discusión sobre resultados .....</b>	<b>64</b>
4.6.1.	<i>Resultados de temperatura .....</i>	64
4.6.2.	<i>Resultados de caudal .....</i>	65
4.6.3.	<i>Resultados de balance de masas.....</i>	66
4.6.4.	<i>Resultados de energía de gas pobre producido.....</i>	67

## CAPITULO V

<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>69</b>
5.1.	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>69</b>
5.2.	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Coeficiente de viscosidad de algunas sustancias.....	13
<b>Tabla 2-2:</b> Tipos de medidores de caudal.....	15
<b>Tabla 3-1:</b> Características técnicas del equipo gasificador .....	23
<b>Tabla 3-2:</b> Componentes del sistema reactor. ....	26
<b>Tabla 3-3:</b> Sistema de enfriamiento de gasificador Downdraft de Facultad de Mecánica.....	28
<b>Tabla 3-4:</b> Componentes del sistema de filtrado de gas pobre.....	29
<b>Tabla 3-5:</b> Instrumentos de control de temperatura del equipo gasificador. ....	29
<b>Tabla 3-6:</b> Elementos del sistema de instrumentación. ....	30
<b>Tabla 3-7:</b> Componentes del sistema dosificador del gasificador Downdraft.....	31
<b>Tabla 3-8:</b> Equipos para proceso experimental .....	32
<b>Tabla 3-9:</b> Procedimiento de encendido y apagado del gasificador.....	33
<b>Tabla 3-10:</b> Elementos químicos contaminantes presentes en el gas pobre.....	39
<b>Tabla 3-11:</b> Características técnicas de medidor de flujo de syngas.....	40
<b>Tabla 3-12:</b> Dimensiones de brida. ....	42
<b>Tabla 3-13:</b> Requerimientos de tubería de los diferentes accesorios instalados. ....	43
<b>Tabla 3-14:</b> Proceso de instalación del equipo medidor de flujo .....	45
<b>Tabla 4-1:</b> Toma de datos de temperatura en las diferentes zonas de control del equipo. ....	51
<b>Tabla 4-2:</b> Datos de salida del gas pobre de primera gasificación. ....	52
<b>Tabla 4-3:</b> Resultado de balance de masas primera gasificación. ....	53
<b>Tabla 4-4:</b> Variación de las temperaturas en las diferentes zonas de control del equipo.....	54
<b>Tabla 4-5:</b> Datos de salida del gas pobre de segunda gasificación. ....	55
<b>Tabla 4-6:</b> Resultados balance de masas segunda gasificación.....	56
<b>Tabla 4-7:</b> Variación de temperaturas en las diferentes zonas de control del equipo. ....	57
<b>Tabla 4-8:</b> Datos de salida del gas pobre de tercera gasificación.....	58
<b>Tabla 4-9:</b> Resultado balance de masas tercera gasificación .....	59
<b>Tabla 4-10:</b> Datos de temperatura en las diferentes zonas de control del equipo. ....	60
<b>Tabla 4-11:</b> Datos de caudal de salida del gas pobre cuarta gasificación. ....	61
<b>Tabla 4-12:</b> Resultado balance de masas cuarta gasificación.....	62

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b>	Tipos de biomasa. ....	6
<b>Ilustración 2-2:</b>	Esquema de gasificador updraft.....	8
<b>Ilustración 2-3:</b>	Esquema de gasificador downdraft.....	9
<b>Ilustración 2-4:</b>	Etapas de gasificación.....	10
<b>Ilustración 2-5:</b>	Flujo laminar dentro de una tubería.....	14
<b>Ilustración 2-6:</b>	Perfil de velocidad flujo turbulento .....	15
<b>Ilustración 2-7:</b>	Medidor de caudal tipo pitot.....	16
<b>Ilustración 2-8:</b>	Medidor de caudal de tubo Venturi.....	16
<b>Ilustración 2-9:</b>	Medidor de caudal placa orificio.....	17
<b>Ilustración 2-10:</b>	Medidor de caudal de rotámetro.....	18
<b>Ilustración 2-11:</b>	Medidor de caudal tipo turbina.....	18
<b>Ilustración 2-12:</b>	Medidor de flujo electromagnético.....	19
<b>Ilustración 2-13:</b>	Fenómeno de derramamiento de vórtice.....	19
<b>Ilustración 2-14:</b>	Medidor de flujo ultrasónico.....	20
<b>Ilustración 3-1:</b>	Equipo gasificador de la Facultad de Mecánica.....	24
<b>Ilustración 3-2:</b>	Diagrama de bloques de gasificador Downdraft ESPOCH.....	24
<b>Ilustración 3-3:</b>	Esquema cuerpo del gasificador .....	25
<b>Ilustración 3-4:</b>	Esquema de ciclón.....	27
<b>Ilustración 3-5:</b>	Esquema sistema de enfriamiento.....	27
<b>Ilustración 3-6:</b>	Esquema del sistema de filtrado.....	28
<b>Ilustración 3-7:</b>	Esquema de distribución de sensores de temperatura del .....	30
<b>Ilustración 3-8:</b>	Esquema de sistema dosificador de biomasa.....	31
<b>Ilustración 3-9:</b>	Toma de medida experimental de temperatura de gas pobre.....	37
<b>Ilustración 3-10:</b>	Toma de velocidad de salida del gas pobre.....	37
<b>Ilustración 3-11:</b>	Medidor de flujo de gas pobre tipo Vortex.....	40
<b>Ilustración 3-12:</b>	Medidor de flujo de gas pobre.....	41
<b>Ilustración 3-13:</b>	Esquema de bridas DN50.....	42
<b>Ilustración 3-14:</b>	Diagrama de diseño de instalación de medidor de flujo.....	44
<b>Ilustración 3-15:</b>	Esquema de balance de masas de gasificador.....	48
<b>Ilustración 4-1:</b>	Variación de temperaturas en la zona de gasificación .....	64
<b>Ilustración 4-2:</b>	Variación de caudal de los procesos de gasificación.....	65
<b>Ilustración 4-3:</b>	Volumen de caudal generado en los diferentes procesos de gasificación.....	66
<b>Ilustración 4-4:</b>	Energía calculada del gas pobre producido.....	67

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 2-1:</b> Flujo volumétrico.....	12
<b>Ecuación 2-2:</b> Flujo masico.....	12
<b>Ecuación 3-1:</b> Caudal experimental de gas pobre .....	38
<b>Ecuación 3-2:</b> Área de tubería de salida de gas pobre.....	38
<b>Ecuación 3-3:</b> Balance de masas .....	49
<b>Ecuación 3-4:</b> Cantidad de biomasa .....	49
<b>Ecuación 3-5:</b> Flujo masico de aire .....	49
<b>Ecuación 3-6:</b> Flujo masico de gas pobre.....	49
<b>Ecuación 3-7:</b> Cantidad de cenizas .....	49
<b>Ecuación 3-8:</b> Cantidad de alquitrán .....	50
<b>Ecuación 3-9:</b> Energuía producida de gas pobre .....	50

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** PROCEDIMIENTO DE PRIMERA GASIFICACIÓN
- ANEXO B:** PROCEDIMIENTOS REALIZADOS EN LA SEGUNDA GASIFICACIÓN
- ANEXO C:** PROCEDIMIENTOS REALIZADOS EN LA TERCERA GASIFICACIÓN
- ANEXO D:** MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL MEDIDOR DE FLUJO DE VORTEX
- ANEXO E:** DIAGRAMA ELÉCTRICO DE ALIMENTACIÓN DEL EQUIPO MEDIDOR DE FLUJO DE VORTEX.
- ANEXO F:** PLAN DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO MEDIDOR DE FLUJO.
- ANEXO G:** ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE GAS POBRE.
- ANEXO H:** CÁLCULO DE DENSIDAD DEL ALQUITRÁN



## RESUMEN

El gasificador Downdraft de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH no cuenta con un método adecuado que permita cuantificar la cantidad de gas pobre producido, razón por la cual no se pueda medir la cantidad de producción de este y que pueda ser aprovechado en otros procesos industriales, por lo tanto, el objetivo de este trabajo es cuantificar la cantidad del gas pobre producido por este equipo, utilizando las biomásas como viruta y cascarilla de arroz en diferentes proporciones. Para lo que se seleccionó e instaló un medidor de flujo de Vortex, que fue el más adecuado con los parámetros estudiados dentro del funcionamiento del equipo gasificador downdraft, una vez que el equipo de cuantificación estuvo instalado se efectuó cuatro procesos de gasificación donde se utilizó 30kg de biomasa y un caudal constante de agente gasificante (aire) de  $60.66\text{m}^3/\text{h}$ . La biomasa se manejó con las siguientes proporciones: 50% de viruta y 50% de cascarilla de arroz, 75% de cascarilla de arroz y 25% de viruta, 100% de cascarilla de arroz y 100% de viruta. Donde se obtuvieron los datos de caudal:  $75.97\text{m}^3/\text{h}$ ,  $87,19\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $87,24\text{m}^3/\text{h}$ ,  $91.41\text{m}^3/\text{h}$  para cada proceso de gasificación respectivamente, de las muestras analizadas en el laboratorio se obtuvo el poder calorífico del gas pobre, que fue utilizado para calcular los siguientes datos de energía que produce el gas, primera gasificación 144.049 kWh, segunda gasificación 137.990 kWh, tercera gasificación 122.564 kWh, cuarta gasificación 179.992 kWh. De todos los procesos de gasificación de las muestras que fueron analizadas en el laboratorio se obtuvo el mejor poder calorífico en la muestra con la proporción de 100% de viruta alcanzando el mayor poder calorífico del gas pobre, dando una potencia de 179.992 kW/h, concluyendo que los residuos de madera son los que producen un gas pobre de mejor calidad.

**Palabras Clave:** <CUANTIFICACIÓN>, <GASIFICADOR DOWNDRAFT>, <GAS POBRE>, <CAUDALIMETRO DE VORTEX>, <GASIFICACIÓN>.



## SUMMARY

The Downdraft Gasifier at the Faculty of Mechanical Engineering at ESPOCH needs an appropriate method for quantifying the amount of lean gas produced. As a result, it is not possible to measure the production quantity of this gas for potential utilization in other industrial processes. Consequently, this study aims to quantify the production of lean gas from this equipment by utilizing varying proportions of biomass materials such as wood chips and rice husks. Therefore, a Vortex flow meter was selected and installed, considering its compatibility with the parameters pertinent to the operation of the Downdraft gasifier. Following the installation of the quantification equipment, four gasification processes were conducted. In each cycle, 30 kg of biomass was employed alongside a consistent gasifying agent (air) flow rate of 60.66 m<sup>3</sup>/h. The biomass was managed in the following ratios: 50% wood chips and 50% rice husks, 75% rice husks and 25% wood chips, 100% rice husks and 100% wood chips. The resulting flow rate data for each gasification process were as follows: 75.97 m<sup>3</sup>/h, 87.19 m<sup>3</sup>/h, 87.24 m<sup>3</sup>/h, and 91.41 m<sup>3</sup>/h, respectively. Upon analyzing the laboratory samples, the lower heating value of the lean gas was obtained, which was subsequently employed to calculate the energy data produced by the gas for each process. The energy values were as follows: 144.049 kWh for the first gasification, 137.990 kWh for the second, 122.564 kWh for the third, and 179.992 kWh for the fourth. Among all the gasification processes analyzed in the laboratory, the highest lower heating value was obtained from the sample with a 100% wood chip proportion, yielding a gas output power of 179.992 kW/h. It leads to the conclusion that wood residues generate lean gas of superior quality.

**Keywords:** <QUANTIFICATION>, <DOWNDRAFT GASIFIER>, <LEAN GAS>, <VORTEX FLOW METER>, <GASIFICATION>.



Lic. Sandra Leticia Guijarro Paguay

C.I: 0603366113

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad existe la búsqueda de energías alternativas a la utilización de combustibles fósiles, se pretende aprovechar materias primas que provengan de materiales reciclados, que sean fáciles de conseguir de bajo costo las que aporten una buena eficiencia a los procesos para generación de energía, esta se obtenga más limpia y mucho más económica.

Por lo que los gasificadores de biomasa son una alternativa muy eficiente para este tipo de procesos en donde se realiza la quema de biomásas provenientes de materiales reciclados obteniendo un gas perfectamente utilizable en una gran cantidad de procesos industriales y caseros, que contribuyen al mejoramiento y disminución de contaminación ambiental, por lo que sería importante conocer la cantidad de gas producido en este equipo gasificador, teniendo en cuenta la cantidad de biomasa que es utilizada y la eficiencia de estos equipos.

En el presente proyecto se pretende medir el caudal de gas pobre generado obteniendo datos reales de la cantidad de gas producido mediante un instrumento que permita recolectar datos de caudal, para lo cual se utilizara una mezcla de biomásas con diferentes cantidades de concentración con las que será alimentado el gasificador Downdraft de la Facultad de Mecánica, también será tomando en cuenta el tiempo de afluencia de gas pobre generado de acuerdo a la proporción y calidad de biomasa utilizada. Se realizará un análisis del gas pobre producido en las diferentes gasificaciones para conocer con que biomásas el gas es más eficiente y de mejor calidad para ser utilizado en procesos como generación de energía eléctrica.

## CAPÍTULO I

### 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Antecedentes

En el artículo científico “*Sistema de filtrado y enfriamiento de syngas como mejora al proceso de gasificación Downdraft*”, *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, propone que para tener un control del flujo del agente gasificante y cuantificar la cantidad de gas producido también se diseña e implementa, a través de la norma ISO 5167, dos caudalímetros de presión diferencial de tipo placa orificio, los cuales fueron instalados en el equipo pero no son funcionales por su deterioro, uso excesivo y falta de mantenimiento de los mismos, debido a los compuestos químicos contaminantes que se generan junto con el gas pobre producido en este equipo, lo que nos llevara al estudio y selección de un equipo más adecuado que permita una perfecta medición del caudal de gas pobre que se produce en este equipo gasificador (Orozco, 2018 págs. 10, 11).

El proceso de implementación de gasificadores de biomasa es un proceso termoquímico para la obtención de energías alternativas y su cuantificación es importante para saber qué cantidad de combustible gas pobre que se genera. Por lo tanto la implementación de un sistema de instrumentación en el gasificador Downdraft aportará significativamente en el proceso para la medición de las variaciones de temperatura y flujo de gas/aire en cada una de las etapas de gasificación para el obtención de datos directos los cuales aportaran en la calibración de la mezcla gas y aire que es necesaria para la obtención de un gas pobre que cumpla los parámetros necesarios para una eficiente generación de energía en motores de combustión interna. (Hormaza, 2019 pág. 2).

Se han realizado una serie de investigaciones de adquisición de datos de cuantificación de gas pobre como la siguiente: mediante la instalación de un sistema de adquisición de datos para la cuantificación de los parámetros de funcionamiento de un gasificador de flujo descendente, en el transcurso del proceso de obtención de gas pobre. Se realizó un estudio de las temperaturas de gasificación en el proceso de pirólisis, obteniéndose un consumo promedio de biomasa forestal de 135 kg en el transcurso de 3.5 horas de gasificación. En un estudio del arte de los gasificadores de lecho descendente para producir gas pobre, se encontró que los gasificadores se diseñan dependiendo del tipo de temperaturas que soportan y la capacidad de generación de gas pobre. En el país se genera actualmente gas pobre a partir de biomasa seca; lo cual tiene resultados positivos, estos generan alternativas para el mejoramiento de la matriz energética. Lo

que justifica la necesidad de generar gas pobre con una producción de gas de síntesis, con un poder calorífico de  $4.86 \text{ MJ/Nm}^3$ , usado en motores de combustión. Las temperaturas alcanzadas en los tres procesos de gasificación se adquirieron mediante la instrumentación instalada a lo largo del gasificador consiguiendo una temperatura máxima de  $415^\circ\text{C}$  en la zona de reducción y una mínima de  $25^\circ\text{C}$  en la zona de secado con flujos máscicos de aire de  $0,002 \text{ kg/s}$  y de gas de síntesis de  $0,0015 \text{ kg/s}$ , por lo que se recomienda continuar con más estudios (Herrera, 2019 pág. 21).

## **1.2. Planteamiento del problema**

La Facultad de Mecánica de la ESPOCH, cuenta con un equipo gasificador de tipo Downdraft (de tiro descendente), el mismo que fue reactivado y se encuentra en funcionamiento, con el propósito de ser utilizado por los estudiantes en su proceso de aprendizaje. Si el sistema está en óptimo funcionamiento, no dispone de instrumentos y de un método adecuado que permita cuantificar la cantidad del gas producido.

El gas pobre que se genera en el gasificador Downdraft posee altas concentraciones de compuestos químicos que se adhieren a los instrumentos de medición y control, dentro de las acciones de mejora necesarias de este, para determinar la cantidad de gas pobre que produce el equipo es fundamental analizar el método e instrumento más adecuado para la medición del caudal generado en este teniendo en cuenta las variables de: presión, temperatura, caudal, etc.

## **1.3. Justificación**

En esta era moderna que vivimos, donde la energía es prioritaria para el desarrollo social existe una intensiva búsqueda para conseguir energías alternativas a los combustibles fósiles como lo manifiesta en el siguiente artículo: los problemas medioambientales asociados al uso de combustibles fósiles y la eventual escasez de estos han motivado el desarrollo de tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables de energía. Entre estas, sobresale la biomasa, por su disponibilidad, producción con poca dependencia de las condiciones ambientales y facilidad de conversión (Carmona, 2022 pág. 1).

Ecuador impulsa el desarrollo de proyectos enfocados en la generación eléctrica, principalmente de fuentes limpias. En el marco de la Expo Virtual de Energías Renovables, participó el viceministro de Electricidad, Gabriel Arguello donde presentó una ponencia virtual sobre generación distribuida. Indicando que se está trabajando en la transición energética, dejando de

lado las energías convencionales, por el uso de energías verdes (Váscone, 2021 pág. 1).

En el bloque de las energías renovables, se proponen algunos proyectos de iniciativa privada que estarán ubicados en las diferentes provincias del país, los cuales aprovecharán la energía solar (fotovoltaicos), la fuerza del viento (eólicos), la fuerza de los ríos (hidráulicos), y la energía proveniente de la biomasa (cascarilla de arroz, palma africana, caña de azúcar y otros residuos no peligrosos, etc.) (Yangari, 2022 pág. 21).

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. *Objetivo general***

Cuantificar el gas pobre producido por el gasificador tipo Downdraft de la Facultad de Mecánica.

##### **1.4.2. *Objetivos específicos***

Determinar los requerimientos para la cuantificación del gas pobre.

Seleccionar el sistema adecuado para cuantificar el gas pobre producido por el Gasificador Downdraft.

Realizar el montaje y prueba del equipo que permita cuantificar la producción del gas pobre producido por el gasificador Downdraft.

Desarrollar un plan de mantenimiento del sistema de cuantificación de gas pobre.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Gasificación

La gasificación es el proceso que se lleva a cabo dentro de un equipo gasificador donde se produce una transformación termoquímica de materias primas residuales en estado sólido o líquido en un gas con un poder calorífico moderado, gracias a la aplicación de calor, de un agente gasificante y bajo unos niveles de oxígeno restringidos. Según el tipo de agente gasificante obtenemos diferentes calidades de gases. Este es un proceso en el que los materiales combustibles, como la biomasa son parcialmente oxidados o quemados a 500-900 °C en presencia de un agente gasificante (Hormaza, 2019 pág. 22).

##### 2.1.1. *Gas pobre o gas de síntesis*

Este es un gas natural que contiene pocos hidrocarburos líquidos licuados y se produce cuando se opera un gasificador con oxígeno y vapor de agua, además de que el gas producido no contiene nitrógeno, se producen cantidades apreciables de hidrógeno y monóxido de carbono. El resultado es una mezcla CO/H<sub>2</sub> con un contenido más o menos elevado de CO<sub>2</sub> e hidrocarburos, que se denomina gas de síntesis, por ser la principal materia prima en la síntesis química. Su poder calorífico está entre los 5,0 y los 10,9 MJ/m<sup>3</sup>, pero ésta no es su principal característica, ya que el valor de esta propiedad no es excesivamente alto comparado con el de otros combustibles gaseosos convencionales (gas natural, propano, butano, etc.) (Schlumberger, 2022 pág. 1).

##### 2.1.2. *Pirolisis*

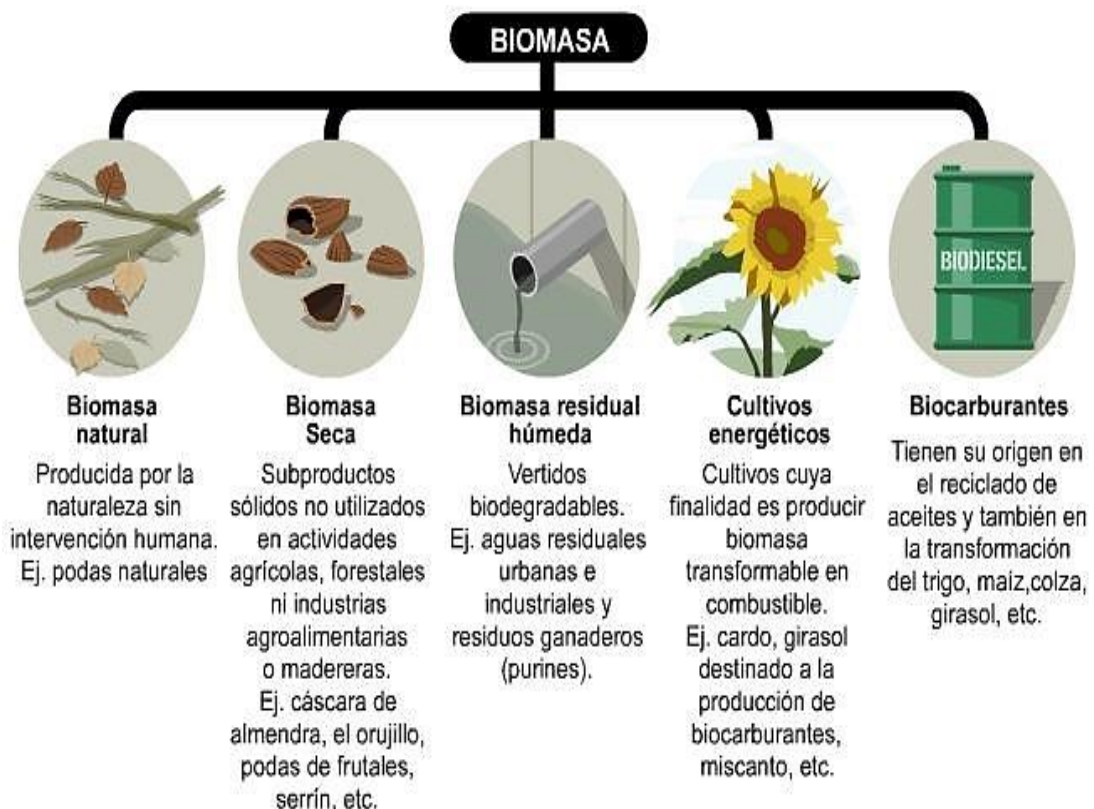
Es el proceso de degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones químicas de la combustión (Ceupe Magazine, 2022 pág. 1).

#### 2.2. Biomasa

Se define como la parte biodegradable de los productos, residuos y desechos de origen biológico

procedentes de actividades agrícolas, incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, del sector forestal y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la parte biodegradable de los desechos, incluidos los residuos industriales y municipales de origen biológico.

La biomasa es la, materia orgánica utilizada como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza (Gómez, 2022 pág. 1).



**Ilustración 2-1:**Tipos de biomasa.

Fuente: Herrera Raúl, 2019.

### 2.3. Intercambiadores de calor

Estos son dispositivo diseñado para transferir calor entre fluidos y materiales, estando éstos en contacto directo o separados por una barrera sólida. Trata de elementos esenciales en sistemas de climatización o refrigeración, acondicionamiento de aire, producción energética y procesamiento químico. Para comprender de manera fácil el funcionamiento de los intercambiadores de calor, debemos tener como referencia el radiador de cualquier vehículo. Donde el motor calienta el



fluido refrigerante. Este se refresca por la fricción con las corrientes de aire, alcanzando a reducir la temperatura del primero tras circular por su interior (Tsoluciona, 2022 pág. 1).

## **2.4. Alquitrán**

Es un líquido viscoso de color oscuro con un olor fuerte el cual es obtenido de la destilación de maderas, resinas, carbones, petróleo y otros materiales orgánicos. Dentro del proceso de gasificación los alquitranes, pueden crear problemas de escoriación, polimerización, contaminación de la corriente de purificación o combustión de aerosoles, reduciendo la eficiencia global del proceso. La cantidad y composición de alquitranes dependen en gran parte de la calidad de biomasa utilizada, de las condiciones de funcionamiento del reactor y de las reacciones secundarias que ocurren en el gasificador (Felipe, 2022 pág. 1).

## **2.5. Importancia de la gasificación**

En la actualidad existe una gran preocupación de temas relacionados con la contaminación y la explotación de combustibles fósiles, debido a que estos causan un daño irreversible en el planeta, esta es la razón por la cual la sociedad se ha focalizado en estos últimos años en la búsqueda de nuevas fuentes de generación de energías, presentando nuevas opciones en fuentes como el aire, el agua, el sol y la biomasa (residuos orgánicos). Este tipo de fuentes al ser renovables, presentan opción para la investigación y metodología que permitan obtener energía por medio de su explotación. La biomasa en especial se perfila como uno de los recursos energéticos renovables de mayor potencial, presentando varias ventajas sociales y ambientales, siempre y cuando las políticas bioenergéticas se desarrollen desde una visión sostenible acompañada de una dirección de producción más limpia la cual establecerá un aprovechamiento adecuado de los residuos sólidos.

## **2.6. Gasificador**

Equipo en el cual se produce la transformación de la biomasa en gas mediante proceso termoquímico de gasificación generando gas de síntesis.

### **2.6.1. Tipos de gasificadores**

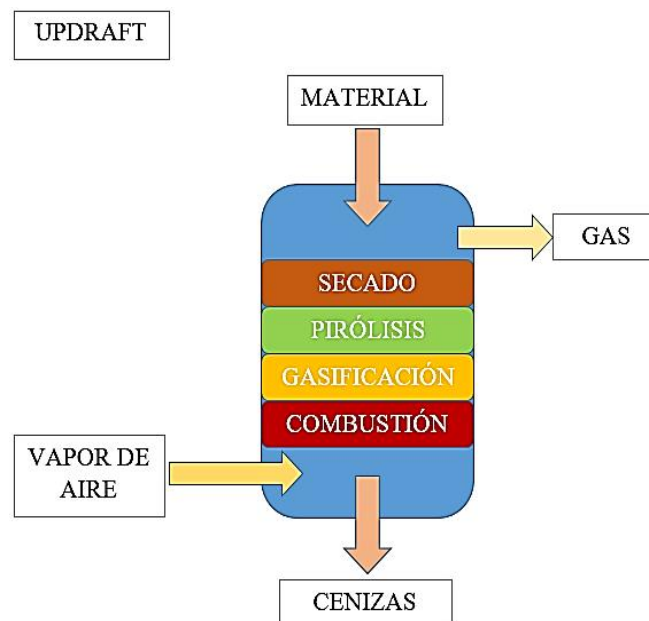
Existe una gran variedad de gasificadores de diferentes tipos, pero los más utilizados son:

- Flujo contra corriente o updraft.

- Flujo descendente o downdraft.

#### 2.6.1.1. Gasificadores updraft

Este tipo de gasificador tiene bien definidas las zonas de combustión parcial, reducción y pirolisis. El aire es admitido por la parte baja de gasificador y este circula en contracorriente. El gas combustible es entregado por la parte superior a unas temperaturas relativamente bajas; Pues, el calor sensible del gas es utilizado para precalentar y secar el combustible; con ello, se logran altas eficiencias. Las desventajas que acusa este sistema de gasificación son el alto contenido de alquitrán del gas producido y la capacidad marginal que tiene en su carga, y por ende la imposibilidad de generación de gas continuo que redunda en dificultades para la utilización en motores de combustión interna (Hormaza, 2019 pág. 23).



**Ilustración 2-2:** Esquema de gasificador updraft

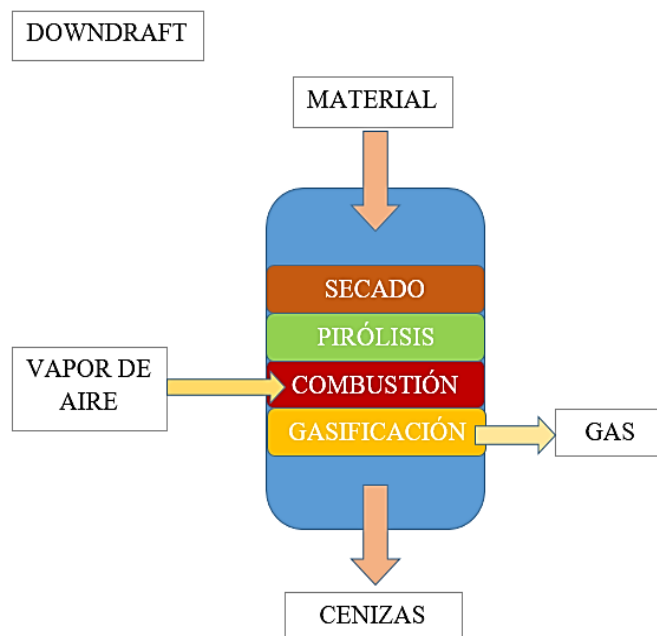
**Fuente:** Encuentros de Innovación y Tecnologías en las Canarias, 2019.

#### 2.6.1.2. Gasificadores downdraft

El gasificador downdraft entrega el gas combustible por la parte baja y la admisión de aire es realizada por la parte media del mismo. Las dificultades que se tiene que enfrentar en esta configuración es el contenido de cenizas y humedad en el gas producido; por otra parte, requiere de un tiempo prolongado de encendido que puede estar en un rango de 20 a 30 minutos. En general este tipo de configuración es más aceptable para aplicaciones en motores de combustión interna y turbinas de gas.

Las tecnologías de gasificación de biomasa tienen su procedencia directa en los gasificadores de carbón, lo que se desarrollaron desde la primera mitad del siglo XIX, el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos ligeros. El compuesto gasificante es un gas, o mezcla de ellos que da inicio el calor para las reacciones y oxígeno.

El rendimiento en este proceso varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. El resto de la energía que se utiliza en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del gas pobre, necesario para su secado y filtración. (Hormaza, 2019 pág. 19).



**Ilustración 2-3:** Esquema de gasificador downdraft

**Fuente:** Encuentros de Innovación y Tecnologías en las Canarias, 2019

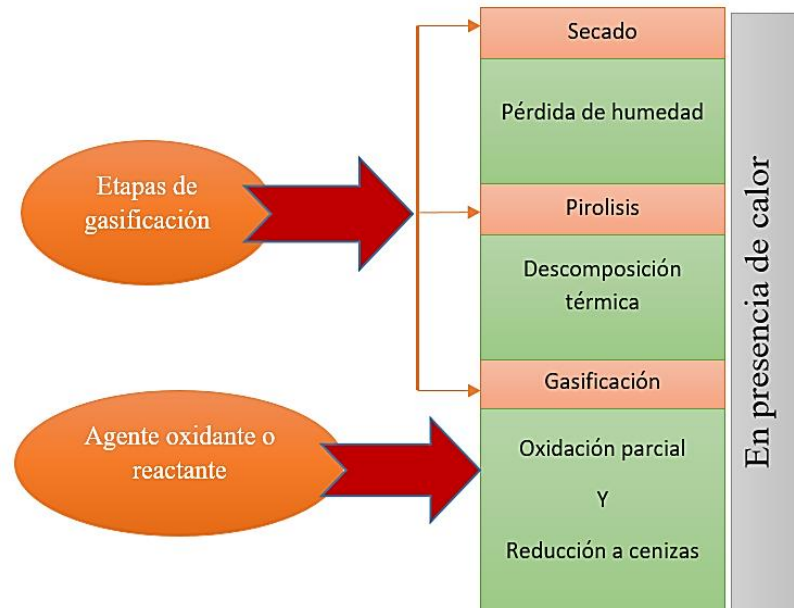
### 2.6.2. *Proceso de gasificación*

La gasificación de biomasa es el proceso termoquímico de conversión de combustibles sólidos (madera, residuos de agricultura, entre otros) en una mezcla de gases combustibles llamada gas pobre o gas de síntesis. Durante el proceso de gasificación también se generan cenizas y compuestos considerables de alquitrán, creando una mezcla compleja de hidrocarburos, que en su mayoría deterioran las tuberías y conductos del equipo (Layana, 2019 pág. 17)

El gas de síntesis generado puede ser utilizado en diferentes procesos como la generación de energía eléctrica para consumo de sectores como el residencial.

El proceso de gasificación comprende 4 etapas:

- Secado
- Pirolisis
- Oxidación
- Reducción



**Ilustración 2-4:** Etapas de gasificación

Fuente: Orozco Lenin, 2017.

#### 2.6.2.1. *Secado*

Durante el proceso de secado, la mayor cantidad de humedad de la biomasa puede ser eliminada. Como resultado se obtiene una reducción del peso de la biomasa. Esto logra una disminución de los costes de procesamiento, como también de los gastos de almacenamiento y movilización. El producto final seco se utiliza a menudo como nutriente para plantas o puede ser utilizado como combustible. Sin embargo, esto depende de las propiedades de la biomasa que se desee secar (Green Machine, 2019 pág. 1).

#### 2.6.2.2. *Pirolisis*

En la etapa de pirolisis el sólido orgánico empieza desintegrándose a temperaturas entre 300°C a 500°C sin que el agente oxidante entre al gasificador, esto tiene como objetivo principal que aparezcan los componentes volátiles además se produce el carbón y altas concentraciones de alquitrán, entre los 500°C y los 700°C se sigue produciendo gas, pero en bajas cantidades, aquí el sólido ha perdido aproximadamente el 70% del peso (William Navarro, 2019).

### 2.6.2.3. *Oxidación*

En esta etapa se produce la inyección de aire, que sirve como agente gasificante. El aire reacciona con los gases combustibles procedentes del pirólisis (alquitranes y residuos carbonosos), elevando la temperatura en esta zona hasta los 1000°C (Ruiz, 2019 pág. 15).

### 2.6.2.4. *Reducción*

En esta última etapa se alcanza la zona de reducción en la cual se produce la gasificación del carbón por parte de vapor de agua presente en el gas, el cual rectifica su composición conforme al equilibrio gaseoso del conjunto de reacciones que alcanzan temperaturas que van desde los 800°C a 1200°C (Ruiz, 2019 pág. 16).

## 2.7. **Qué es cuantificar**

Cuantificar es expresar numéricamente la magnitud o cantidad de cualquier objeto o sustancia que puede ser medida (Felipe, 2022 pág. 1).

También la palabra cuantificar hace referencia a la idea de algo que puede ser contado o medido o mensurado en términos numéricos y puede conocerse como manera exacta (Felipe, 2022 pág. 1).

### 2.7.1. *Medición de flujo o caudal*

El flujo es la tercera magnitud más grande medida en los procesos industriales. Las aplicaciones son muchas, desde las más sencillas, como la medición de flujo de agua en estaciones de tratamiento y residencias, hasta medición de gases industriales y combustibles, pasando por mediciones más complejas. Elegir correctamente un determinado dispositivo para medición de flujo depende de diversos factores.

- Precisión necesaria en la medición.
- Tipo de fluido: sea líquido o gas, limpio o sucio, etc.
- Niveles de presión y temperatura exigidos por el medidor.
- Espacio físico disponible.
- Costo.

Esto dentro de los parámetros más importantes al momento de la elección de un medidor de flujo (Furlan, 2022 págs. 2,3).

### 2.7.2. Definición de flujo o caudal

Flujo o caudal se podría definir como la cantidad volumétrica o másica de un fluido que desliza a través de una sección de tubería o canal por unidad de tiempo (Furlan, 2022 pág. 5).

Los tipos de flujo pueden ser:

- Volumétrico
- Másico

#### 2.7.2.1. Flujo volumétrico

Está definido como la cantidad volumétrica que fluye a través de determinada sección en un cierto intervalo de tiempo. Las unidades de medida para flujo volumétrico más comunes son:  $m^3/s$ ,  $m^3/h$ , l/h, l/min, GPM (galones por minuto),  $N m^3/h$  (normal metro cúbico por hora), SCFH (normal pie cúbico por hora), entre otras (Lopez, 2018 pág. 3).

$$Q = V / t$$

**Ecuación 2-1**

Donde:

V: volumen

t: tiempo

Q: caudal volumétrico

#### 2.7.2.2. Flujo másico

Se define como la cantidad en masa de un fluido que pasa a través de cierta sección de tubería en un cierto intervalo de tiempo. Por lo general este se utiliza para los gases. Las unidades de flujo másico más utilizadas son: kg/s, kg/h, t/h (tonelada/hora), lb/h (Furlan, 2022 pág. 6).

$$Q_m = (m/v) \cdot (v \cdot A) = \rho \cdot v \cdot A$$

**Ecuación 2-2**

Dónde:

m: masa

t: tiempo,

v: velocidad

$\rho$ : densidad

A: área de sección

V: volumen

$Q_m$  = flujo másico

### 2.7.3. Conceptos físicos necesarios para medición de flujo o caudal

Antes de realizar la medición de cualquier caudal es necesario recordar algunos conceptos relativos a fluidos, dentro de los más importantes y que pueden ejercer influencia en el flujo de los diferentes fluidos por lo general tenemos los siguientes:

- Calor específico
- Viscosidad

#### 2.7.3.1. Calor específico

Se define calor específico como el cociente de la cantidad infinitesimal de calor suministrado a una unidad de masa de una sustancia por la variación infinitesimal de temperatura resultante de este calentamiento. En la práctica, tenemos: que es la cantidad necesaria de calor para cambiar la temperatura de 1 Kg de masa de una sustancia en 1 °C, sus unidades en el SI son: J / (kg. °K) o cal / (kg. °C). (Furlan, 2022 pág. 8).

#### 2.7.3.2. Viscosidad

La viscosidad se refiere a la resistencia al flujo o fricción interna de un fluido. También se puede definir como la resistencia al desagüe de un flujo en una tubería. Esta resistencia provocará una pérdida de carga adicional que deberá considerarse en la medición de flujo.

La resistencia a la viscosidad tanto de líquidos como de gases depende de su velocidad y podría ser directamente proporcional a ella en algunos casos. Sin embargo, la relación varía dependiendo de las condiciones; por ejemplo, la resistencia es aproximadamente proporcional a  $V^2$  o a  $V^3$  en flujo turbulento. La unidad en el SI de la viscosidad es pascal-segundo (Pa. s) (Furlan, 2022 pág. 1).

**Tabla 2-1:** Coeficiente de viscosidad de algunas sustancias.

Fluido	Temperatura (°C)	Viscosidad $\eta$ (Pa·s)
Agua	0	$1,79 \times 10^{-3}$

Agua	20	$1,00 \times 10^{-3}$
Agua	10	$0,28 \times 10^{-3}$
Aire	-31,6	$1,54 \times 10^{-5}$
Aire	20	$1,83 \times 10^{-5}$
Aire	230	$2,64 \times 10^{-5}$
Alcohol etílico	20	$1,2 \times 10^{-3}$
Glicerina	0	12.11
Glicerina	20	1,49
Helio	20	$1,94 \times 10^{-5}$

Fuente: cdtdegas.com, 2020.

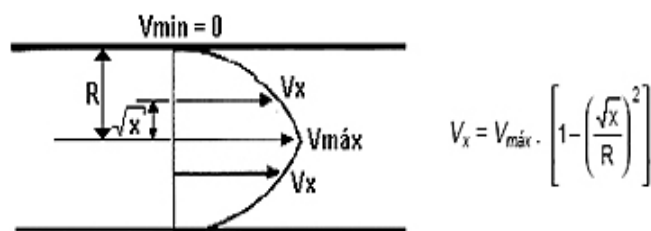
Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 2.7.4. Velocidad del fluido dentro de una tubería

Dentro de una tubería la velocidad de flujo del fluido no será la misma en todos los puntos, será máxima en el punto central y mínima en las paredes del ducto y esta puede ser: laminar o turbulento. Estos flujos se encuentran completamente limitados por superficies sólidas, por ejemplo, a corriente interna dentro de las tuberías y los ductos. Considerando un flujo incompresible a través de un tubo de sección circular el cual es atravesado, el flujo es uniforme a la entrada del tubo y su velocidad es igual a la velocidad inicial (Unet, 2022 pág. 1).

##### 2.7.4.1. Flujo laminar

El flujo laminar se caracteriza por su velocidad más acentuada, cuyas diferencias de velocidad son más grandes. Un esfuerzo cortante hace que las capas de un fluido se muevan unas sobre otras en un flujo laminar. La fuerza de corte y la tasa de flujo dependen de la viscosidad del fluido. En un flujo laminar por un tubo, la rapidez del fluido es menor cerca de las paredes del tubo que cerca del centro, debido a la fricción entre las paredes y el fluido (Jimenez, 2018 pág. 10).



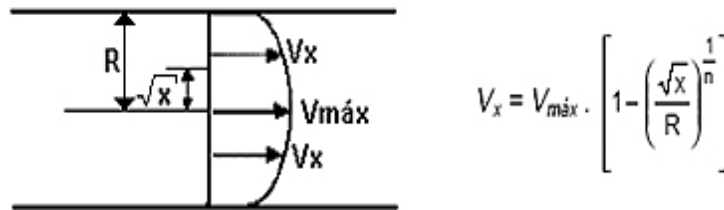
**Ilustración 2-5:** Flujo laminar dentro de una tubería.

Fuente: Mecánica de fluidos viscosidad y turbulencia, 2018.



2.7.4.2. *Flujo turbulento*

Este se caracteriza por tener una velocidad más uniforme que el perfil laminar. Sus diferencias de velocidad son más pequeñas. Este se da en forma caótica, o sea aquel flujo el que las partículas del fluido circulan desordenadamente y las trayectorias de las partículas forman pequeños remolinos aperiódicos, (no coordinados) como por ejemplo el agua en un canal de gran pendiente. Por lo que, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de esta es impredecible, más precisamente caótica (Jimenez, 2018 pág. 19).



**Ilustración 2-6:** Perfil de velocidad flujo turbulento

Fuente: Mecánica de fluidos viscosidad y turbulencia, 2018.

2.7.5. *Tipos de medidores de flujo o caudal*

En la siguiente Tabla 2.2. Podemos observar de una forma resumida la clasificación de los medidores de flujo. Donde se muestra una breve clasificación de los tipos de medidores que son utilizados para la medición y cuantificación de caudal dentro de los diferentes procesos industriales.

**Tabla 2-2:** Tipos de medidores de caudal.

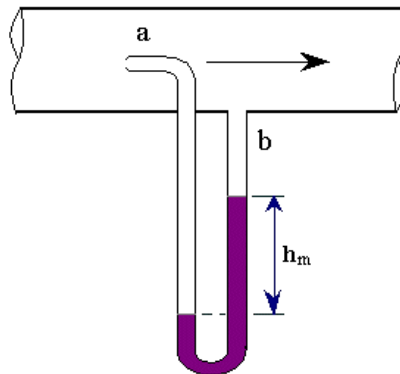
<b>Medidores directos utilizando fenómenos íntimamente relacionados a cantidad de fluido pasante</b>	Perdida de carga variable (área constante)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tubo Pitot</li> <li>• Tubo Venturi</li> <li>• Placa orificio</li> </ul>
	Área variable (perdida de carga constante)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotámetro</li> </ul>
<b>Medidores directos de fluido pasante</b>	Velocidad de impacto del fluido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo turbina</li> </ul>
<b>Medidores especiales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electromagnetismo</li> <li>• Vortex</li> <li>• Ultrasónico</li> </ul>	

Fuente: Controlautomaticoeducacion.com, 2022.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

### 2.7.5.1. Medidor de caudal tubo pitot

Los sensores de caudal de tubo de pitot basan su principio de funcionamiento consiste en medir la diferencia de presión entre la presión total y la presión estática (presión dinámica). Por ser un dispositivo sensible a variaciones de velocidad dentro de la tubería, es usado comúnmente en flujos laminares, por lo que es colocado en un tramo recto de la tubería. (Castaño, 2022 pág. 1)

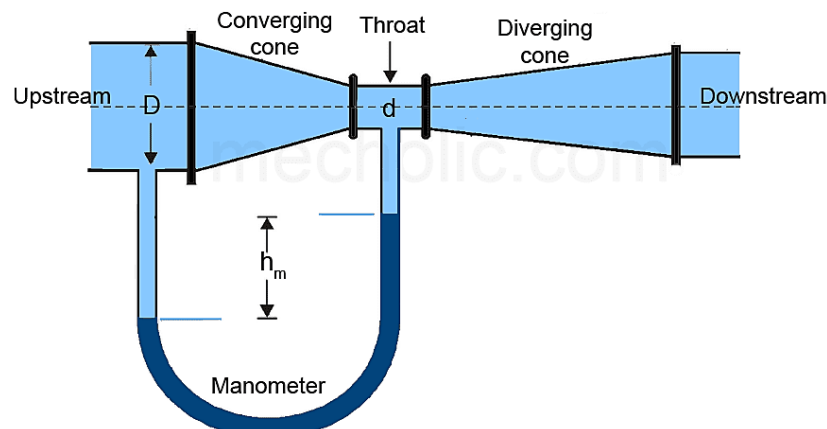


**Ilustración 2-7:** Medidor de caudal tipo pitot.

Fuente: Medidores de flujo, 2022.

### 2.7.5.2. Medidor de caudal de tubo Venturi

Los medidores de flujo tubo Venturi son utilizados para mediciones de caudal 60% por encima de la placa orificio, con una pérdida de carga de tan solo 10% a 20% de la presión diferencial. Este dispositivo es de gran precisión y puede ser usado en fluidos con un alto porcentaje de contenido de sólidos. Su costo es 20 veces más elevado que la placa orificio y posee una precisión del 0,75% (Castaño, 2022 pág. 1).

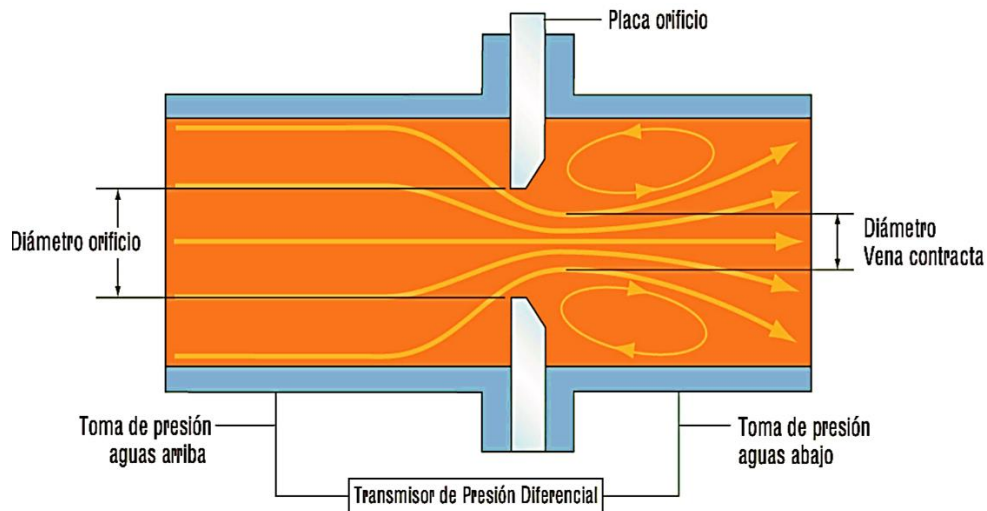


**Ilustración 2-8:** Medidor de caudal de tubo Venturi.

Fuente: Aerodinámica, 2018.

### 2.7.5.3. Medidor de caudal placa orificio

El medidor de caudal placa orificio está compuesto por una placa que posee una perforación la cual se instala en el interior de la tubería la cual genera una caída de presión. En los extremos de la placa se encuentran dos tomas, por los cuales se mide la presión diferencial. La cual es proporcional al cuadrado del caudal (Castaño, 2022 pág. 1).



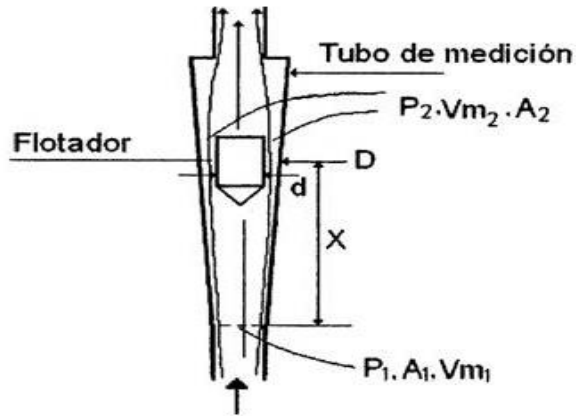
**Ilustración 2-9:** Medidor de caudal placa orificio.

**Fuente:** Medidores de flujo placa orificio, 2022.

### 2.7.5.4. Medidor de caudal de rotámetro

Este es un caudalímetro industrial utilizado para medir el caudal de líquidos y gases. El cual consiste en un tubo y un flotador. La respuesta del flotador a los cambios de caudal es lineal, y un rango de flujo de 10 a 1 es estándar. El funcionamiento del rotámetro se basa en el principio de área variable: El flujo de fluido eleva el flotador en un tubo alargado, esto aumenta el área para el paso del fluido.

Cuanto mayor es el flujo, más alto se eleva el flotador. La altura del flotador es directamente proporcional al caudal. Con líquidos, el flotador se eleva por una combinación de la flotabilidad del líquido y la altura equivalente de velocidad del fluido. El flotador se mueve hacia arriba o hacia abajo en el tubo en proporción al caudal de fluido y el área anular entre el flotador y la pared del tubo. El flotador alcanza una posición estable en el tubo cuando la fuerza ascensional que ejerce el fluido en movimiento es igual a la fuerza gravitatoria hacia abajo que ejerce el peso del flotador. Con los gases, la flotabilidad es despreciable, y el flotador responde solo a la altura equivalente de velocidad (Castaño, 2022 pág. 1).



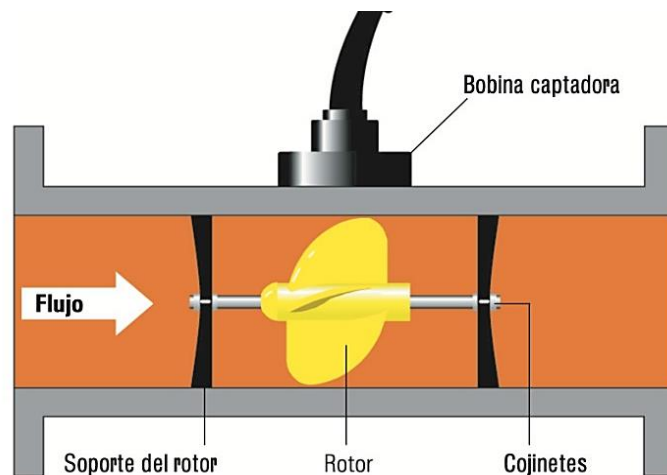
**Ilustración 2-10:** Medidor de caudal de rotámetro.

**Fuente:** Medidores de flujo por variación de área, 2022.

#### 2.7.5.5. Medidor de caudal tipo turbina

Los Caudalímetros de sensor de turbina utiliza el número de revoluciones de la turbina para poder calcular la cantidad de flujo que circula por la tubería con bastante precisión.

Este tipo de sensores de flujo emplean para medir la velocidad a la que gira la turbina está equipado con convertidores electromagnéticos de reluctancia o inductivos para poder realizar un conteo de la frecuencia con que la turbina gira y de esa forma determina el caudal que circula por la tubería este tipo de medidores de flujo son utilizados en su gran mayoría para fluidos limpios (Furlan, 2022 pág. 10).

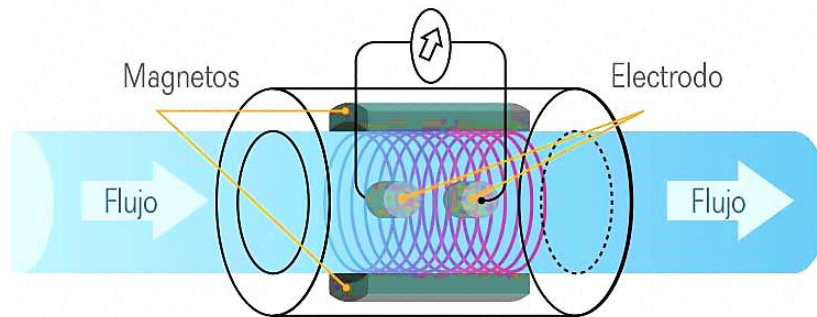


**Ilustración 2-11:** Medidor de caudal tipo turbina

**Fuente:** Medidores de flujo de vapor, 2020.

### 2.7.5.6. Medidor de caudal electromagnético

El principio de funcionamiento de estos medidores de flujo se fundamenta en la ley de Faraday, la cual plantea que al hacer circular un material (un fluido) conductivo a través de un campo magnético esto produce una fuerza electromagnética que es proporcional con la velocidad del mismo fluido (Castaño, 2022 pág. 1).

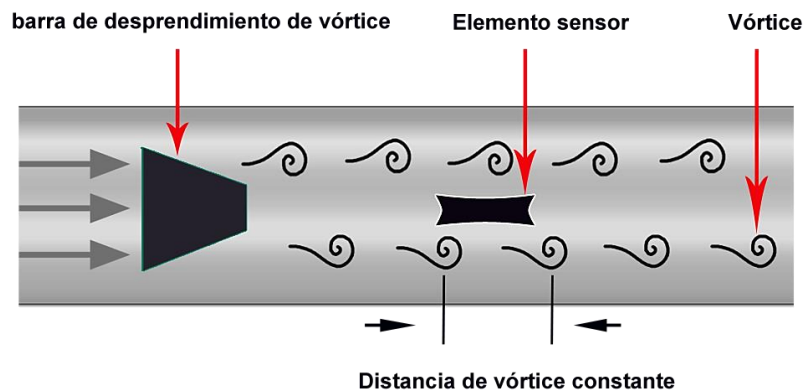


**Ilustración 2-12:** Medidor de flujo electromagnético.

Fuente: Medidores de flujo electromagnéticos, 2022.

### 2.7.5.7. Medidor de flujo de Vortex

Se coloca una obstrucción plana en la corriente del flujo provocando la creación de vórtices lo cual desprende del cuerpo a una frecuencia proporcional a la velocidad del flujo. Un sensor en el fluxómetro detecta los vórtices y genera una indicación en la lectura del dispositivo medidor.



**Ilustración 2-13:** Fenómeno de derramamiento de vórtice.

Fuente: Medidores de flujo de vortex, 2022.

En la Ilustración 2-13. Se muestra un bosquejo del fenómeno de derramamiento de vórtice. La forma del cuerpo plano, también conocido como elemento de derramamiento de vórtice, varía de acuerdo con el fabricante. A medida que el flujo se aproxima a la parte frontal del elemento de

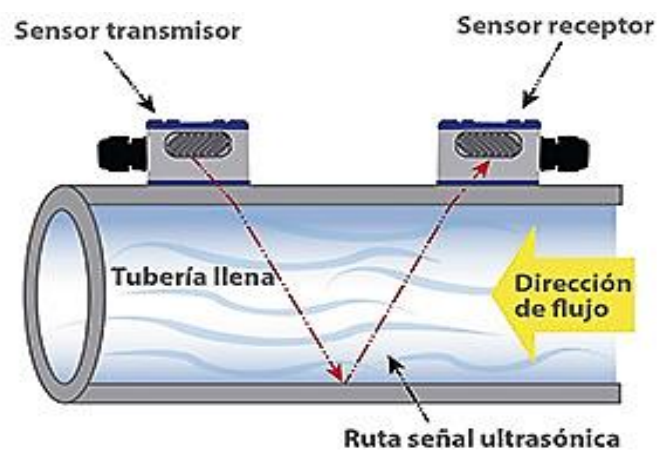
derramamiento, este se divide en dos corrientes. La diferencia en velocidades genera capas de corte las cuales se rompen en el vórtice de forma alternada sobre los dos lados del elemento de derramamiento. Los sensores colocados dentro del medidor detectan las variaciones de presión alrededor de los vórtices y generan una señal de voltaje que varía a la misma frecuencia que la de derramamiento del vórtice. La señal de salida es una cadena de pulsos de voltaje como una señal analógica de cd (corriente directa). Los sistemas de instrumentación estándar con frecuencia utilizan una señal analógica que varía desde 4 hasta 20 mA cd (miliamperios de corriente directa).

Para la salida de pulso el fabricante proporciona un fluxómetro de factor-K que indica los pulsos por unidad de volumen a través del medidor. Los medidores de vórtice pueden utilizarse en una amplia variedad de fluidos incluyendo líquidos sucios y limpios, así como gases y vapor (Castaño, 2022 pág. 12).

La única desventaja de este tipo de medidores es que no están diseñados para caudales muy bajos, ya que estos no generan el voltaje necesario para que sea registrado por los sensores.

#### 2.7.5.8. Medidor de flujo ultrasónico

Estos equipos de medición flujo basan su funcionamiento en el fenómeno ultrasónico, el cual contiene sensores que captan pequeñas perturbaciones de presión en un fluido que se propagan con la velocidad del sonido relativa al fluido que es medido. En estos sensores se utilizan transductores de cristal piezoeléctricos los cuales transmiten y reciben las señales de energía acústica al interior del dispositivo (Castaño, 2022 pág. 12).



**Ilustración 2-14:** Medidor de flujo ultrasónico.

**Fuente:** Medidores de flujo, 2022.

## **2.8. Conceptos básicos para la operación y mantenimiento de equipos**

Dentro de elaboración y mantenimiento de los equipos es necesario tener claro ciertos conceptos como son:

- Manual de operación
- Plan de mantenimiento

### **2.8.1. *Manual de operación***

El plan de operación lo podemos definir como un conjunto de pasos que se realizan para el manejo o utilización de un equipo. Los manuales de procedimientos son documentos de apoyo para las personas de la empresa, en la cual tiene políticas, controles exhaustivos de las actividades a realizarse las tareas específicas. Los métodos describen y detallan el proceso, que conforma un conjunto ordenado de tareas o actividades determinadas con los responsables de la ejecución, que deben cumplir políticas y normas establecidas señalando la duración y secuencia de los documentos (Euroinnova, 2022 pág. 1).

Los manuales de operación tienen como finalidad los siguientes objetivos:

- Conocer el funcionamiento total del equipo.
- Distinguir los diferentes elementos y su función en el equipo.
- Entender el funcionamiento óptimo del equipo.

### **2.8.2. *Plan de mantenimiento***

Un plan de mantenimiento es un conjunto estructurado de todas las tareas técnicas, administrativas y de gestión realizada durante el ciclo de funcionamiento de un elemento, que ayudan a conservarlo o a ponerlo en un estado en el cual pueda desarrollar la función para que fuese requerido (Paredes, 2021 pág. 41).

#### **2.8.2.1. *Propósito del mantenimiento***

El propósito principal del mantenimiento es evitar o disminuir las consecuencias de los fallos del equipo, previniendo los incidentes antes de que estos sucedan, obteniendo un mejor rendimiento mejor rentabilidad y mayor producción.

#### 2.8.2.2. *Ficha técnica*

Es un documento que describe las características principales, la composición y la utilización de un equipo, aportando la referencia detallada sobre los aspectos de este. La información se presenta en tablas y difícilmente aparecen oraciones completas (Paredes, 2021 pág. 42).

#### 2.8.2.3. *Mantenimiento preventivo*

Este se realiza a intervalos predeterminados o de acuerdo con criterios establecidos con anterioridad, y que están destinados a reducir la probabilidad de fallos o la degradación del funcionamiento de los elementos (Gualán, 2022 pág. 10).

#### 2.8.2.4. *Mantenimiento correctivo*

Este se realiza después de que ha ocurrido la avería y que está destinado a poner a un elemento en un estado en que pueda realizar una función requerida. (Gualán, 2022 pág. 9).



## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

Para la realización de este trabajo se empezó con un reconocimiento del equipo gasificador de la Facultad de Mecánica, estudiando la función de cada uno de sus sistemas y componentes para poder operar el mismo. Cuando el equipo esté en funcionamiento se tomarán datos de las variables que intervienen en la salida de gas pobre como son: presión, velocidad y temperatura. Lo que aportará posteriormente para la elección de un método adecuado que permita cuantificar el mismo. Una vez se realice la elección correcta del equipo de cuantificación se procederá con la instalación de este, estudiando los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento para poder realizar pruebas que permitan medir el caudal de gas pobre producido, donde se utilizarán diferentes tipos de biomásas.

#### 3.1. Reconocimiento y establecimiento de la situación actual del equipo gasificador

Para manipular el equipo correctamente es necesario conocer el funcionamiento de cada uno de los sistemas que componen el gasificador Downdraft de la Facultad de Mecánica.

##### 3.1.1. Características y elementos del equipo gasificador

El equipo gasificador Downdraft de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH está compuesto por los siguientes sistemas que tienen las diferentes características que detallaremos a continuación:

###### 3.1.1.1. Características generales

**Tabla 3-1:** Características técnicas del equipo gasificador

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
<b>Tipo de gasificador</b>	Downdraft, lecho fijo.
<b>Combustible</b>	Biomasa con humedades no mayores a 25 %
<b>Capacidad de procesamiento</b>	40 kg/h
<b>Agente gasificante</b>	aire
<b>Sistema de tratamiento de gas pobre</b>	Ciclón, filtro de gas, enfriador
<b>Dimensiones de biomasa</b>	Elementos de hasta 10 cm por lado.

Fuente: Orozco Lenin, 2017.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

Se realizó una inspección y prueba de todos los sistemas y componentes del equipo gasificador Downdraft de la Facultad de Mecánica, para proceder con su encendido, procedimiento que detallaremos a continuación.

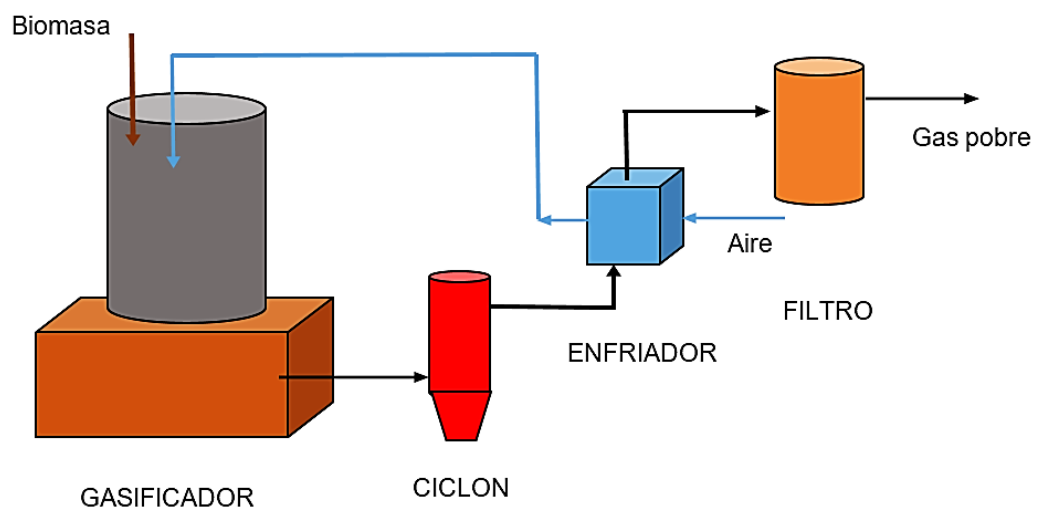


**Ilustración 3-1:** Equipo gasificador de la Facultad de Mecánica

Fuente: Velastegui Nelson, 2023.

### 3.1.1.2. Componentes del equipo gasificador

A continuación, en la Ilustración 3-2, se detallan los sistemas y componentes del equipo gasificador.



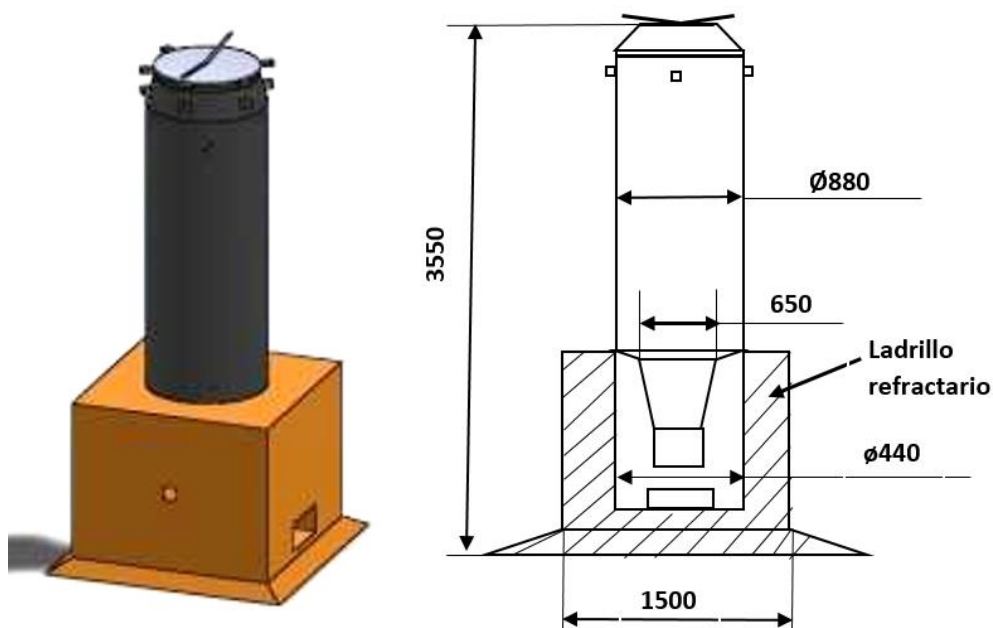
**Ilustración 3-2:** Diagrama de bloques de gasificador Downdraft ESPOCH.

Fuente: Orozco Lenin, 2017.

Como se puede observar en la Ilustración 3-2. El ingreso de la biomasa es desde la parte superior junto con la entrada de aire que funciona como agente gasificante, luego de que esta es consumida, el gas producido por la quema de este material pasa por el ciclón, este funciona como un filtro de partículas de mayor tamaño, después de filtradas estas partículas el gas se dirige al enfriador donde se disminuye su temperatura mediante un proceso de convección forzada, luego este pasa por un sistema de filtrado que está compuesto por unas mangas que están hechas de lana de vidrio las cuales retienen la mayoría de las impurezas del gas pobre, para que este salga más limpio y pueda ser utilizado en diferentes procesos.

### 3.1.1.3. Reactor del gasificador

Lugar donde se quema la biomasa con ayuda del agente gasificante produciendo reacciones termoquímicas y alcanzando temperaturas mayores a 500°C.






**Ilustración 3-3:** Esquema cuerpo del gasificador

**Fuente:** Orozco Lenin, 2017.

El sistema del reactor está compuesto por el cuerpo del gasificador y por el sistema de entrada de agente gasificante (aire).

Dentro de este elemento se producen todas las reacciones termoquímicas que influyen en el proceso de gasificación, siendo este uno de los más importantes del equipo y el que recibe toda la carga del trabajo realizado en el equipo gasificador.

**Tabla 3-2:** Componentes del sistema reactor.

		
Cilindro de combustión	Blower de entrada de aire	Tuberías de alimentación de aire

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

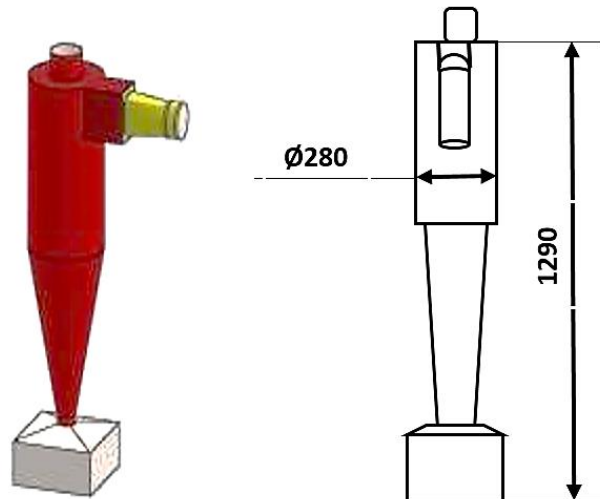
Este sistema se encuentra compuesto por el cilindro de combustión que es donde se produce todo el proceso de gasificación, el blower que es el encargado de administrar el agente gasificante para alimentar la combustión y las tuberías de aire, lugar por donde circula este.

Los elementos que conforman el sistema reactor se encuentran en óptimas condiciones después de una inspección visual y limpieza de sus diferentes elementos como tapas, pernos, pintura y demás componentes, estos están dispuestos para su funcionamiento.

#### 3.1.1.4. *Ciclón*

Este es el primer sistema de filtrado del gas pobre, donde se retiene el material particulado generado en la combustión y de mayor tamaño. Cuando se utiliza biomasa residual de madera, las partículas de combustible pequeñas generalmente provocan mayores concentraciones de polvo en el gas que al emplear tacos de madera, la cantidad de material particulado que se genera depende de la biomasa que es utilizada en el equipo gasificador.

Para la mayoría de gasificadores normales tipo downdraft, se produce polvo en cantidades que varían entre 0,5 y 5 g/m<sup>3</sup> a este parámetro se lo conoce como concentración de partículas en la corriente gaseosa, de toda esta porción de polvo que es generada en el proceso de quema de biomasa, en el ciclón es separada del syngas producido entre un 60 al 65% de las partículas producidas (Orozco, 2017 págs. 37,38).

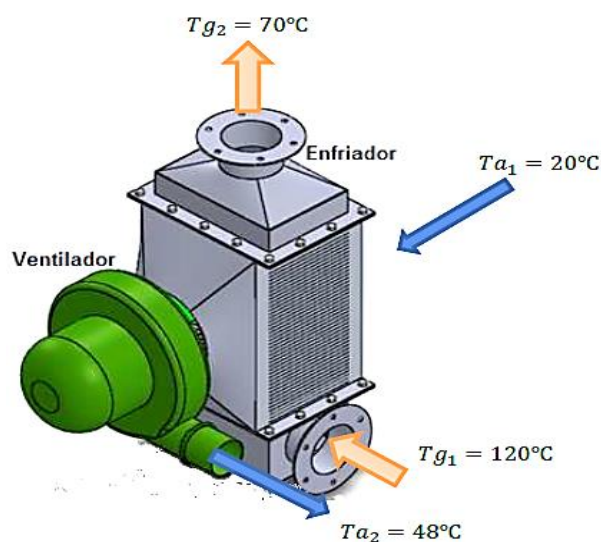


**Ilustración 3-4:** Esquema de ciclón.

**Fuente:** Orozco Lenin, 2017.

### 3.1.1.5. Sistema de enfriamiento

Después de que el gas pobre producido ha pasado por el sistema de filtrado las partículas de mayor tamaño, pasa por el sistema de enfriamiento que está constituido de paneles y varias tuberías por las que este circula, donde este es refrigerado mediante un sistema de convección forzada de aire, el mismo que está compuesto por un soplador que bombea este fluido por el exterior de las tuberías logrando así reducir la temperatura de salida del gas pobre. El gas pobre después de pasar por el ciclón se encuentra a una temperatura aproximada de 115-120 °C y luego de pasar por el enfriador debe tener una temperatura aproximada de 70 °C





**Ilustración 3-5:** Esquema sistema de enfriamiento.

**Fuente:** Orozco Lenin, 2017.

El sistema de enfriamiento está compuesto por el soplador de ventilación y el enfriador.

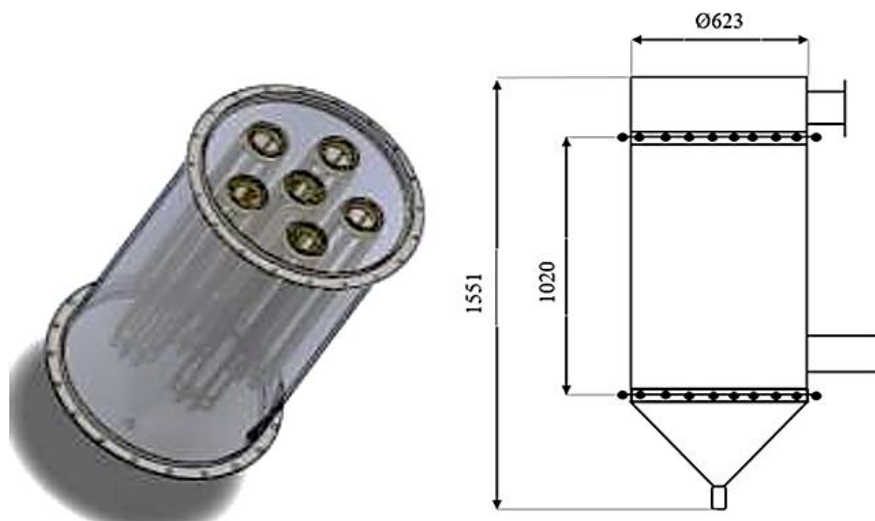
**Tabla 3-3:** Sistema de enfriamiento de gasificador Downdraft de Facultad de Mecánica

	
<p>Soplador de ventilación</p>	<p>Enfriador de gas</p>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

### 3.1.1.6. Sistema de Filtrado.

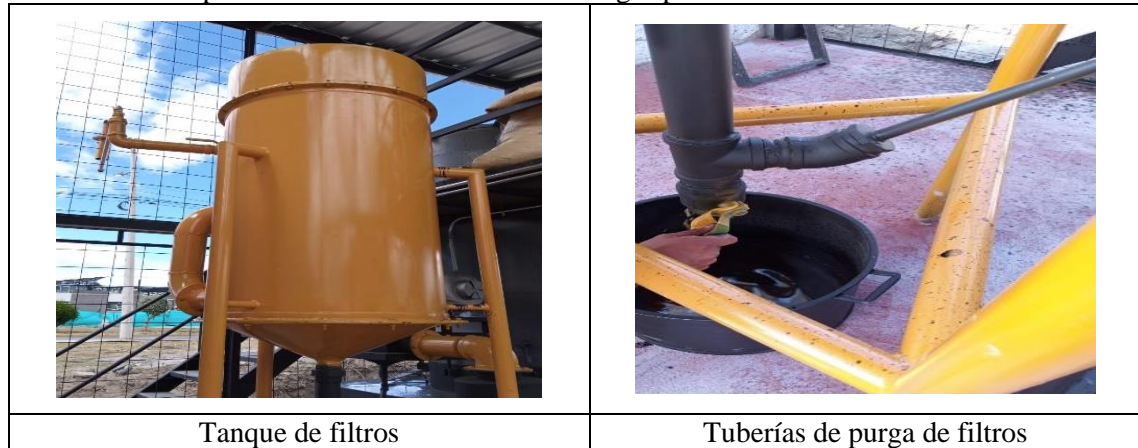
Este está compuesto por tela de lana de vidrio ya que este material trabaja a temperaturas cercanas a 260 °C, y la configuración geométrica de los filtros es de mangas circulares. Funciona por el método de filtración exterior por lo que se distribuye el flujo de gas alrededor de las mangas y el gas limpio se evacua por un compartimento superior. La temperatura de llegada al filtro de los gases en el gasificador expuesto es aproximadamente 70 °C.



**Ilustración 3-6:** Esquema del sistema de filtrado.

Fuente: Orozco Lenin, 2017.

**Tabla 3-4:** Componentes del sistema de filtrado de gas pobre.



Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

El sistema consta del tanque de filtros, en su interior se encuentran cuatro filtros de lana de vidrio equitativamente distribuidos.

El sistema de filtrado se encuentra en perfecto estado, después de realizar una inspección visual de sus componentes como pernos de sujeción y válvulas de purga tuberías, etc.

#### 3.1.1.7. Sistema de control de temperatura del gasificador

En el equipo gasificador existe varios instrumentos de control de temperatura, los que se encuentran distribuidos equitativamente por el reactor y conectados a un tablero de control, lugar donde están ubicados los indicadores de control de temperatura los que detallaremos a continuación en la siguiente tabla.

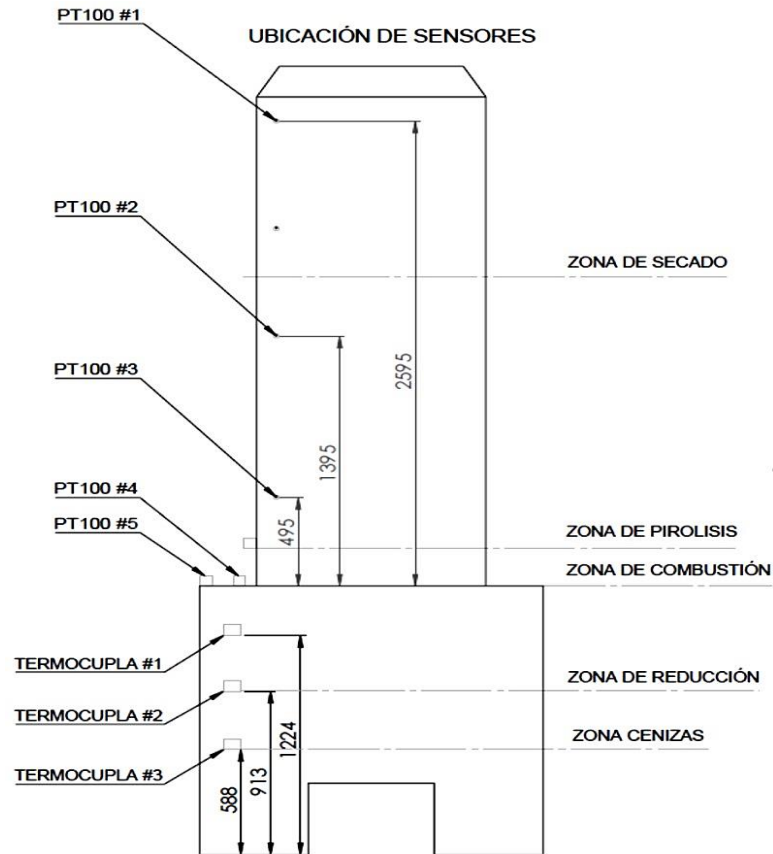
**Tabla 3-5:** Instrumentos de control de temperatura del equipo gasificador.

Zona de gasificación	Tipo de termocupla	Temperatura en zonas de gasificación	Temperaturas máximas de funcionamiento
<b>Secado</b>	Pt-100	100°C a 200°C	-200°C a 850°C
<b>Pirolisis</b>	Pt-100	300°C a 500°C	-200°C a 850°C
<b>Combustión</b>	Tipo K	100°C a 300°C	-270°C a 1370°C
<b>Gasificación</b>	Tipo K	600°C a 1000°C	-270°C a 1370°C

Fuente: Herrera Raúl 2019.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

En la siguiente ilustración se detalla la distribución de los sensores de temperatura por el equipo gasificador.



**Ilustración 3-7:** Esquema de distribución de sensores de temperatura del gasificador.

Fuente: Herrera Raúl, 2019.

El sistema de control de temperaturas se encuentra compuesto por los indicadores y las termocupas ubicadas en las diferentes zonas del gasificador que se detalla en Ilustración 3-7.

**Tabla 3-6:** Elementos del sistema de instrumentación.

<p>Tablero de control de termocupas</p>	<p>Grupo de termopares tipo K</p>	<p>Sensores Pt100</p>

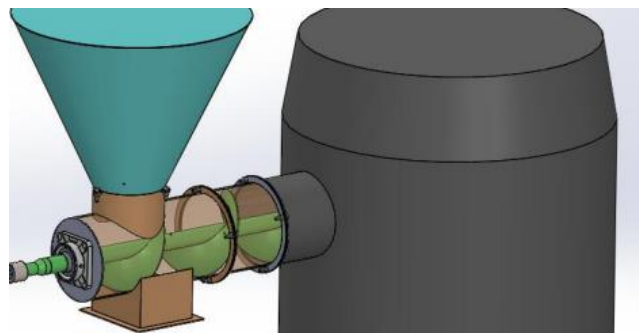
Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.



El sistema de instrumentación se encuentra en perfecto estado después de realizadas pruebas de funcionamiento, verificación de señales de termocuplas tipo K, Pt100, indicadores de tablero de control.

### 3.1.1.8. Sistema dosificador de biomasa

El sistema dosificador de biomasa está conformado por una tolva que tiene una capacidad de 30 kg, la misma por donde ingresa esta, donde esta es dirigida por un tornillo transportador el mismo que es impulsado por motor acoplado a un motor reductor que está regulado para que gire a 3 RPM, lo que hace que el ingreso de la biomasa sea progresivo para obtener una mejor combustión en el equipo gasificador. Las briquetas de madera reciclada que se utilizan para alimentar mediante el dosificador no deben superar los 10 cm de altura ya que podrían producir atascamientos en el sistema.






**Ilustración 3-8:** Esquema de sistema dosificador de biomasa.

**Fuente:** Fonseca Juan, 2017.

El sistema está compuesto por motor reductor, la tolva de biomasa y un variador de frecuencia que regula la velocidad de dosificación de biomasa.

**Tabla 3-7:**Componentes del sistema dosificador del gasificador Downdraft

		
<p>Motor reductor</p>	<p>Tolva</p>	<p>Variador de frecuencia y tablero de control</p>

**Realizado por:** Velastegui Nelson, 2023.

Después de revisar y probar todos los componentes del sistema de alimentación se verifica su correcto funcionamiento de todos sus elementos como tolva, motor reductor, variador de frecuencia y tablero de control.

### 3.2. Encendido experimental del equipo gasificador

Para realizar la puesta en marcha del equipo se seguirá procedimientos y secuencias con experiencias de trabajos de titulación anteriores efectuados en el mismo, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de todos los sistemas y componentes del gasificador.

Este procedimiento tiene como finalidad recolectar medidas reales de los parámetros de funcionamiento del gasificador como son: caudal, presión, y temperatura de la salida del gas pobre, con la finalidad de tener datos exactos para la correcta selección de un equipo medidor de caudal de salida del gas.


#### 3.2.1. Materiales y equipos utilizados

Los materiales utilizados son:

- Biomasa, viruta 20 kg y madera trozada 20 kg para cuando el equipo este funcionamiento.
- Madera trozada 30 kg esto para el arranque del equipo.

Los equipos utilizados son:

**Tabla 3-8:** Equipos para proceso experimental


Equipo / Material	Característica	Figura
<b>Balanza analógica</b>	Marca: PHILCO. Rango de medición: 0 hasta 120 kg. Unidades de medida: kilogramos y libras.	






<b>Anemómetro digital:</b>	<p>Marca: HoldPeak HP-850 A  Rango de medición: 0 hasta 45 m/s.  Precisión: 3 %</p>	
<b>Termómetro digital con termopar:</b>	<p>Marca: SPER800007  Rango de medición: de -200 °C hasta 1050 °C.  Precisión: 2 %</p>	
<b>Madera troceada</b>	<p>Pedazos no mayores a 10X10 cm, 40 kg.</p>	
<b>Viruta</b>	<p>Viruta 20 kg.</p>	






Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.



### 3.2.2. Procedimiento experimental de prueba del equipo gasificador

**Tabla 3-9:** Procedimiento de encendido y apagado del gasificador.

No	Actividad	Cantidad	Tiempo (min)	Imagen
1	<p>Para empezar con el proceso de gasificación primero se energizo los tableros de control del equipo</p>		5	

2	Se retiró las tapas de la parte inferior del cuerpo del gasificador y ubicar la madera trozada en esta zona del equipo.	30 kg de madera trozada.	10	
3	Se procede a encender la madera trozada que se encuentra en el interior provocando una braza		20	
4	Luego de unos 20 minutos que está bien encendida la biomasa se coloca las tapas cuando la temperatura T8 llegue a unos 450 a 500 °C.		10	
5	Encender el blower de alimentación de aire del reactor y luego observar por la parte superior del cuerpo del gasificador si la biomasa se encuentra encendida		20	
6	Una vez que el indicador de temperatura de la zona de combustión llegue a 480 °C o 500 °C colocar la tapa superior del cuerpo del gasificador		10	

7	La biomasa debe ser cargada progresivamente en la tolva del dosificador cada 30 minutos administrar madera troceada 10 kg y aserrín 10 kg, alternando entre madera trozada y aserrín para evitar de esta manera que se ahogue la llama de la zona de combustión.	20 kg de aserrín 20 kg de madera.	60	
8	Después de transcurridos unos minutos de cerrar la tapa del cilindro del reactor cuando T8 llega a 550 - 600 °C se puede observar la salida del gas pobre el cual se mantendrá encendido por aproximadamente 2 horas esto por la masa alimentada.		10	
9	Se debe realizar purgas en el sistema de filtrado con una frecuencia de 30 minutos esto una vez cerrada la tapa superior del cilindro del reactor		5	
10	Después de transcurrido una hora de la última alimentación de biomasa podemos observar un descenso en la temperatura y la llama de salida del gas se apaga se procede con el apagado del tablero de control de instrumentos.		5	
11	Se apaga el soplador de entrada de aire.		5	

12	Desenergizar todo el sistema de control bajando los interruptores de la caja térmica.		5	
13	Después de 12 horas de transcurrido el proceso de gasificación se realizó la limpieza, se pesó las cenizas y demás muestras.	Guipe Brocha Alcohol etc.	120	

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

### 3.3. Toma de medida experimental de la salida de caudal del gas pobre producido

Para realizar la medición de las variables de temperatura, velocidad y caudal de salida del gas, es necesario tener el gasificador en un punto de equilibrio de producción del gas. La magnitud de estas variables se tomó a una hora de funcionamiento del equipo gasificador después de realizado el cierre de todas las compuertas del equipo.

Para medir estas variables es necesario conocer los siguientes datos generales que son:

- Presión atmosférica en Riobamba = 72.875 kPa
- Temperatura ambiente = 20 °C
- Densidad del aire = 0.791 kg/m<sup>3</sup>

#### 3.3.1. Toma de medida de temperatura de salida del gas pobre.

Esta medida de temperatura se realizó con el termómetro digital especificado en la Tabla 3-8. Obteniendo un valor de 27 °C después de pasar por el sistema de enfriamiento.



**Ilustración 3-9:** Toma de medida experimental de temperatura de gas pobre.

**Fuente:** Velastegui Nelson, 2023.

### 3.3.2. *Toma de velocidad de salida del gas pobre*

Para la toma de velocidad de salida del gas pobre se utilizó un anemómetro digital especificaciones están detalladas en la Tabla 3-8.

Obteniendo una velocidad de salida del gas pobre de 14 m/s



**Ilustración 3-10:** Toma de velocidad de salida del gas pobre.

**Fuente:** Velastegui Nelson, 2023.

### 3.3.3. *Cálculo de caudal de salida del gas pobre*

Para el cálculo de caudal experimental tenemos la siguiente ecuación:

$$Q_e = A_T \cdot v_g$$

**Ecuación 3-1**

Dónde:

$Q_e$ : Caudal experimental de salida del gas pobre

$A_T$ : Área de tubería de salida

$v_g$ : Velocidad de salida del gas pobre.

Donde para realizar el cálculo se tendrá en cuenta el área o sección de la tubería, se utiliza la siguiente formula:

$$A_T = (\pi \cdot D^2)/4$$

**Ecuación 3-2**

Para calcular el área de la tubería tenemos los siguientes datos:

$$D = 3/4'' = 0.01905 \text{ m}$$

Donde:

$$A_T = (\pi \cdot D^2)/4 = ((3.1416)(0.01905^2))/4 = 0.000285 \text{ m}^2$$

Para el cálculo de caudal tenemos que la velocidad de salida del gas es:  $v_g = 8 \text{ m/s}$

Entonces reemplazando los datos en la ecuación 1-3, tenemos que:

$$Q_e = A_T \cdot v_g = (0.000285 \text{ m}^2)(14 \text{ m/s}) = 0.00399 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_e = 14.36 \text{ m}^3/\text{h}$$

### **3.4. Estudio, selección y dimensionamiento adecuado del equipo de medición**

Para la seleccionar el instrumento adecuado, se debe tener en consideración lo siguiente:

- Tipo de fluido.
- Velocidad a la que circula el fluido.
- Tamaño de tubería.
- Disposición de espacio para la instalación.
- Rango de medición.



### 3.4.1. *Tipo de fluido*

Dentro del gasificador Downdraft de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH el tipo de fluido que se maneja es gas pobre. Este contiene muchos elementos químicos contaminantes como se muestra en la Tabla 3-10. Por lo que se necesita un equipo que sea resistente a estos compuestos y sea fácil de limpiar.

**Tabla 3-10:** Elementos químicos contaminantes presentes en el gas pobre.

<b>Contaminante</b>	<b>Ejemplo</b>	<b>Problema</b>
<b>Partículas</b>	Cenizas	Erosión
<b>Haluros</b>	Cl, Br, F	Corrosión, envenenamiento
<b>Metales alcalinos</b>	Na, K	Catalizadores
<b>Compuestos N</b>	NH <sub>3</sub> , HCN	Emisiones
<b>Compuestos S</b>	H <sub>2</sub> , S	Emisión, corrosión
<b>Alquitranes</b>	Ligeros, pesados	Taponamiento, atascos

Fuente: Orozco Lenin, 2017.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

### 3.4.2. *Velocidad a la que circula el fluido*

La velocidad con que circula el fluido ha sido tomada de manera experimental, por lo general en este tipo de equipos gasificadores, el gas pobre no generado sale con velocidades altas por lo que se obtuvo una velocidad medida de 14m/s.

### 3.4.3. *Dimensión de tubería para la instalación del medidor de flujo de gas pobre*

La dimensión de la tubería de salida del gas proveniente del gasificador, después de ser medida se obtuvo un diámetro nominal de 2" equivalente a 50 mm. La misma está compuesta de material, hierro galvanizado que es resistente a los componentes químicos que presenta el gas producido.

### 3.4.4. *Rango de medición del equipo medidor de flujo*

El rango de medición del equipo se dimensiono de acuerdo con la toma experimental realizada en la salida del gas pobre que se efectuó con anterioridad y se obtuvo un caudal de:

$$Q_e = 14.36 \text{ m}^3/\text{h}$$

En el trabajo de titulación de magíster en eficiencia energética de Orozco Lenin que tuvo efecto en este mismo gasificador se obtuvo un caudal máximo de  $129 \text{ m}^3/\text{h}$ , (Orozco, 2017 págs. 82, 84). Resultado a comparar con este proceso experimental. Con estos datos podemos realizar el dimensionamiento del rango de caudal del equipo. Teniendo en cuenta todos los parámetros anteriormente estudiados y variables medidas, estas fueron proporcionadas para la selección del equipo, dentro del mercado se presentaron diversas opciones para la medición del caudal del gas pobre, con todos estos datos obtenidos anteriormente se pidió asesoramiento a los proveedores de este tipo de equipos, los mismos que presentaron diferentes opciones para la elección del equipo, eligiendo la más factible por precio y por ser fabricado para este tipo de trabajo, para medir el gas pobre se ha optado por un caudalímetro de Vortex con las siguientes características que se especifican en la Tabla 3-11.

**Tabla 3-11:** Características técnicas de medidor de flujo de syngas.

Característica	Descripción
<b>Marca:</b>	Hefei Siko
<b>Tipo de fluido:</b>	Syngas húmedo
<b>Diámetro nominal de tubería:</b>	DN50 (2")
<b>Rango de caudal:</b>	De 10 a 130 m <sup>3</sup> /h
<b>Pantalla:</b>	LCD
<b>Tipo de conexión:</b>	Brida DIN DN50
<b>Temperatura de trabajo:</b>	-20 a 80 °C
<b>Precisión:</b>	1 %
<b>Presión de funcionamiento:</b>	1.6 Mpa

Fuente: Hefei Siko Instruments Co, Ltd., 2022.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.



**Ilustración 3-11:** Medidor de flujo de gas pobre tipo Vortex.

Fuente: Hefei Siko Instruments Co, Ltd., 2022.

### 3.5. Adquisición del equipo de medición de caudal

La adquisición del equipo de medición se realizó tomando en cuenta los parámetros anteriormente estudiados teniendo en cuenta el rango de medición, la calidad del gas pobre producido en el gasificador por lo que se optó por la importación del mismo, debido a que no existían equipos de este tipo en el mercado nacional se eligió este instrumento fabricado en China de marca Hefei Siko, el que fue pedido bajo los criterios estudiados dentro del gasificador downdraft de la Facultad de Mecánica, los que están especificados en la Tabla 3-11.



**Ilustración 3-12:** Medidor de flujo de gas pobre.

Fuente: Velastegui Nelson, 2023.

Como se puede observar en Ilustración 3-12, el equipo recién llegado de China y listo para su instalación, antes del proceso de instalación debemos realizar pruebas de funcionamiento, diseño de componentes necesarios para que este sea adaptado apropiadamente al proceso de gasificación.

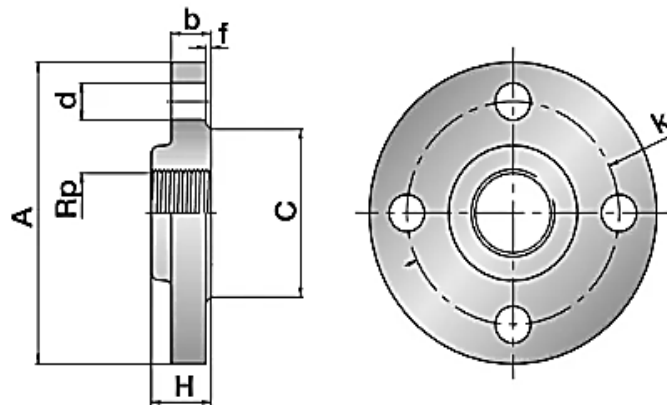
### 3.6. Instalación del medidor de caudal

Como se puede observar en la Ilustración 3-12, el equipo está diseñado para una instalación de un sistema tipo bridado, por lo que se realizara el diseño y construcción de estas en base a las nomas que se encuentran especificadas.

Se debe tener en cuenta que el lugar adecuado para la instalación del equipo medidor de flujo de gas pobre es donde se cumpla con los espacios y distancias recomendadas para su correcto funcionamiento, los mismos parámetros que describiremos a continuación.

### 3.6.1. Dimensionamiento de bridas para instalación de medidor de syngas

Para la instalación del equipo se diseñó dos bridas DIN DN 50 como se muestra en la figura:



**Ilustración 3-13:** Esquema de bridas DN50

Fuente: Manual Hefei Siko Instruments Co, Ltd., 2022

Las bridas se diseñaron con las dimensiones que se especifican en la siguiente tabla:

**Tabla 3-12:** Dimensiones de brida.

Conexión 1				DN 50mm			
Conexión 2				2"			
A	Rp	d	H	b	C	f	k
165mm	2"	16 mm	28 mm	18 mm	103 mm	3 mm	125 mm

Fuente: Manual Hefei Siko Instruments Co, Ltd., 2022.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

Dentro de los elementos necesarios para la instalación se utilizarán accesorios como:

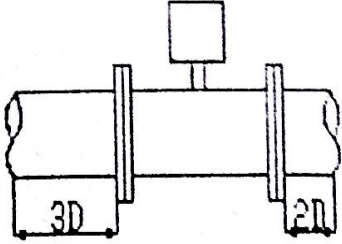
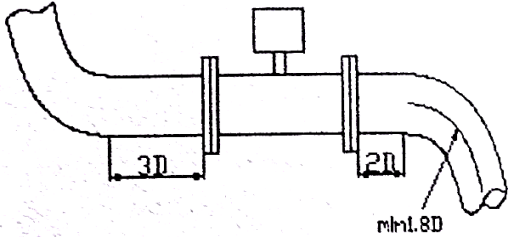
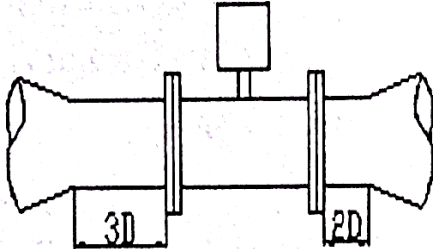
- 2 uniones universales para tubería de 2".
- 2 tramos de tubería de 2"x 12" y 2"x 5" respectivamente roscados.
- 2 válvulas de globo para tubería de 2 ".
- Teflón
- Dos bridas DIN DN 50.
- 8 pernos M 16
- Dos empaques para la junta de brida de papel victoria DN 50.

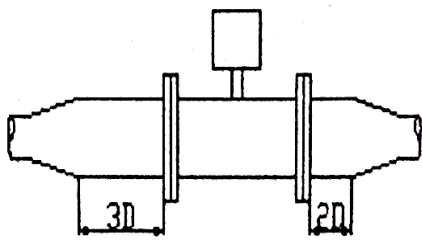
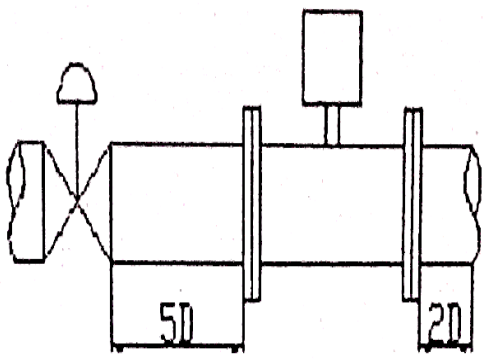
### 3.6.2. Disposición de normas y dimensiones para la instalación del medidor de flujo

En la tubería de salida del filtro se observa que es el mejor lugar, porque existe el espacio suficiente para la instalación, para que el equipo no corra ningún riesgo o exposición a elementos, factores de operación del equipo gasificador que puedan dañar o averiar el instrumento y que cumpla con las normas de instalación que proporciona el fabricante de este equipo y este preste una mayor precisión en sus medidas.

Dentro de los parámetros de instalación proporcionados por el fabricante del equipo medidor de gas pobre, se tiene la disposición de espacios que deben cumplir entre el equipo y los accesorios ubicados en la tubería, los mismos se detallaran a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 3-13:** Requerimientos de tubería de los diferentes accesorios instalados.

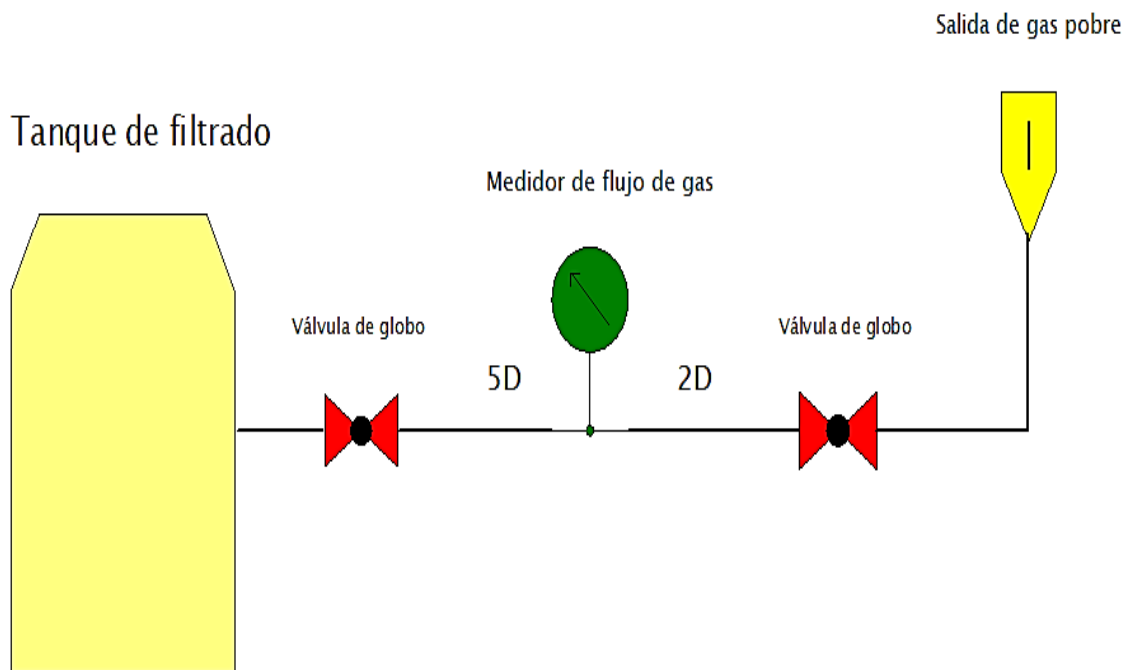
Descripción	Esquema
<p>Como se puede observar en el diagrama esquemático se debe mantener una distancia mínima de tubería recta, aguas arriba de <math>3D</math> y aguas abajo del equipo una distancia mínima de <math>2D</math>. antes de instalar cualquier accesorio de tubería</p> <p><math>D</math> = diámetro nominal del caudalímetro de vórtice.</p>	
<p>Para un codo instalado en la tubería debemos asegurarnos de que la sección recta de la tubería sea como mínimo <math>3D</math> aguas arriba y al menos <math>2D</math> aguas abajo como se observa en el esquema.</p>	
<p>En un tubo de reducción de tuberías retractiles, debemos asegurarnos de que la sección recta de la tubería sea como mínimo <math>3D</math> aguas arriba y al menos <math>2D</math> aguas abajo como se observa en el esquema.</p>	

<p>Para la expansión de la tubería debemos asegurarnos de que la sección recta de la tubería sea como mínimo 3D aguas arriba y al menos 2D aguas abajo como se observa en el esquema.</p>	
<p>Si hay una válvula instalada en la tubería debemos asegurarnos de que la sección recta de la tubería sea como mínimo 5D aguas arriba y al menos 2D aguas abajo como se observa en el esquema.</p>	

Fuente: Manual de instalación del equipo medidor de flujo de Vortex, 2022.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

### 3.6.3. *Diseño de la instalación de las tuberías del medidor de caudal*






**Ilustración 3-14:** Diagrama de diseño de instalación de medidor de flujo.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

### 3.6.4. *Proceso de instalación del equipo*

Para la instalación del equipo se utilizó todos los elementos y normas, mencionados anteriormente que fueron construidos bajo las especificaciones señaladas obteniendo una correcta instalación de este y quede dispuesto para su funcionamiento, el procedimiento de instalación se detalla a continuación en la tabla.

**Tabla 3-14:** Proceso de instalación del equipo medidor de flujo

Numero	Descripción	Grafico
1	Se realizo el soldado y construcción de la base para el equipo	
2	Se construyó las bridas bajo especificaciones antes señalas y se procese a la instalación con pernos de sujeción M16, y sus respectivos empaques	
3	Se efectuó la Instalación de las tuberías y accesorios necesarios para el equipo, llaves de globo, uniones y tuberías.	

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

### **3.7. Protocolo de puesta en marcha y pruebas del equipo**

Para ejecutar las diferentes pruebas del medidor de flujo, se efectuó cuatro gasificaciones en las que se recolecto los diferentes datos de temperatura en cada uno de los sensores del equipo, así como la salida de caudal del gas pobre producido por este, se tomó muestras del gas pobre para su posterior análisis de sus propiedades químicas, se verifico el peso de las diferentes mezclas de biomasa a utilizase en el proceso mediante una balanza analógica, así como el peso de los residuos (ceniza y alquitrán) para un posterior análisis.

#### **3.7.1. Parámetros de primera gasificación**

Para la primera gasificación se debe tener en cuenta, que esta se realizara el mismo proceso anterior que tuvo efecto para prueba del gasificador, utilizando los siguientes materiales:

- Mezcla de viruta y caricarilla de arroz, 50% de viruta y 50% de cascarilla de arroz.
- Se utilizará 30 kg de este tipo de biomasa.
- 30 kg de leña para el arranque del gasificador.
- Caudal de entrada de aire  $Q = 60.66 \text{ m}^3/h$

##### **3.7.1.1. Proceso de primera gasificación**

El proceso de primera gasificación se encuentra descrito en el ANEXO A, donde se especifica paso a paso cada una de las actividades que se realizó y el tiempo que tuvo efecto de cada uno de los procesos.

#### **3.7.2. Parámetros segunda gasificación**

Para la segunda gasificación se deberá tener en cuenta que se realizara el mismo proceso anterior que tuvo efecto en la primera gasificación, utilizando los siguientes materiales:

- Mezcla de viruta y caricarilla de arroz, 25 % de viruta y 75 % de cascarilla de arroz.
- Se utilizará 30 kg de este tipo de biomasa.
- 30 kg de leña para el arranque del gasificador.
- Caudal de entrada de aire  $Q = 60.66 \text{ m}^3/h$



#### 3.7.2.1. *Proceso de segunda gasificación*

El proceso de segunda gasificación se encuentra descrito en el ANEXO B, donde se especifica las actividades realizadas y los tiempos de cada uno de los procesos.

#### 3.7.3. *Parámetros de tercera gasificación*

Para la tercera gasificación debemos tener en cuenta que se realizara el mismo proceso anterior que tuvo efecto en la primera y segunda gasificación, utilizando los siguientes materiales:

- Caricarilla de arroz en 100 %.
- Se utilizará 30 kg de este tipo de biomasa.
- 30 kg de leña para el arranque del gasificador.
- Caudal de entrada de aire  $Q = 60.66 \text{ m}^3/h$

#### 3.7.3.1. *Proceso de tercera gasificación*

El proceso de segunda gasificación se encuentra descrito en el ANEXO C, donde se especifica las actividades realizadas y los tiempos que toma cada una de ellas.

#### 3.7.4. *Parámetros de cuarta gasificación*

Para la cuarta gasificación debemos tener en cuenta que se realizara el mismo proceso anterior que tuvo efecto en la primera, segunda y tercera gasificación, utilizando los siguientes materiales:

- Viruta en 100 %.
- Se utilizará 30 kg de este tipo de biomasa.
- 30 kg de leña para el arranque del gasificador.
- Caudal de entrada de aire  $Q = 60.66 \text{ m}^3/h$

#### 3.8. **Toma de datos de las diferentes gasificaciones**

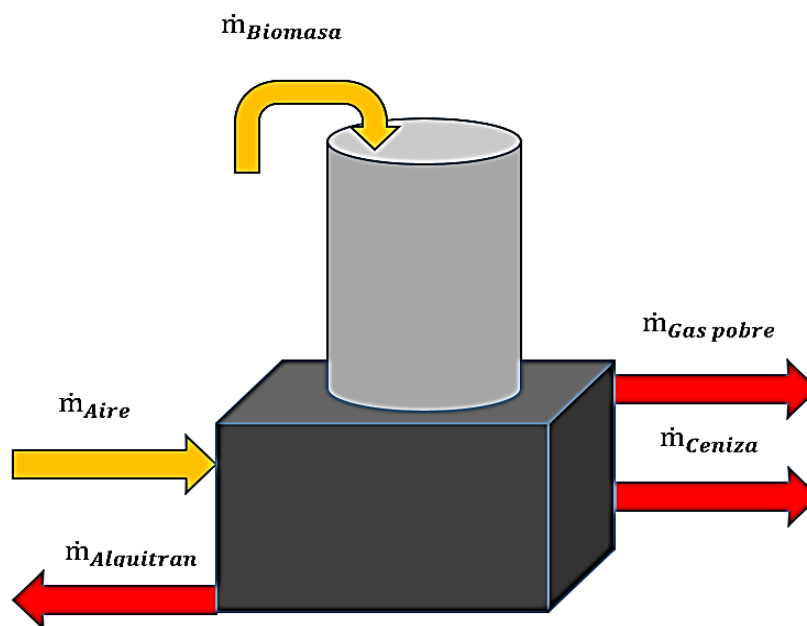
La toma de datos para los cuatro procesos de gasificación se realizará cada 10 minutos teniendo en cuenta que los datos de caudal serán tomados una vez cerradas todas las compuertas del gasificador, las variables a determinar son:

- Caudal.
- Presión de salida del gas.
- Temperatura de salida del gas.

### 3.9. Proceso para balance de masas en la gasificación

El balance de masas es un proceso donde se realiza cálculos que permiten llevar en cuenta todas las sustancias que intervienen en el proceso de transformación satisfaciendo la ley de conservación de la masa, misma que establece que la materia no se crea ni se destruye solo se trasforma. Como parte del proceso de cuantificación del gas pobre producido es indispensable realizar un balance de masas el que proporcionará la información para complementar el mismo.

El balance másico se realiza para las cuatro gasificaciones, en las que utilizaremos dos tipos de biomasa que son viruta y cascarilla de arroz en diferentes concentraciones, de donde se obtendrán los valores para su posterior análisis, para cuantificar los diferentes flujos másicos de aire y gas se utilizara el medidor de flujo y para determinar la cantidad de biomasa se utilizó una balanza. El alquitrán se recolectará en las zonas de purga del filtro y del enfriador, el peso de las cenizas será tomado después de transcurridas 24 horas del proceso de gasificación. En la Ilustración 3-15, se muestra un esquema de los valores de entrada y salida de masa.



**Ilustración 3-15:** Esquema de balance de masas de gasificador.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

$$\dot{m}_{Biomasa} + \dot{m}_{Aire} = \dot{m}_{Gas\ pobre} + \dot{m}_{Ceniza} + \dot{m}_{Alquitran} \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Donde:

$\dot{m}_{Biomasa}$  :  $\dot{m}_B$  : Cantidad de biomasa en kg/h

$\dot{m}_{Aire}$  :  $\dot{m}_A$  : Flujo másico de aire para la gasificación kg/h

$\dot{m}_{Gas\ pobre}$  :  $\dot{m}_B$  : Flujo másico de gas pobre kg/h

$\dot{m}_{Ceniza}$  :  $\dot{m}_C$  : Cantidad de cenizas kg/h

$\dot{m}_{Alquitran}$  :  $\dot{m}_{Al}$  : Cantidad de alquitrán en kg/h

$$\dot{m}_B = P_B (kg)/t_f(h) \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Donde:

$P_B$  : Peso de biomasa

$t_f$  : Tiempo de funcionamiento

$$\dot{m}_A = Q_A \cdot \rho_A \quad \text{Ecuación 3-5}$$

Donde:

$Q_A$  : Caudal de entrada de aire = 60.66 m<sup>3</sup>/h, dato medido con medidor de flujo.

$\rho_A$  : Densidad del aire en la Espoch = 0.791 kg/m<sup>3</sup> (Orozco, 2017 pág. 85)

$$\dot{m}_G = Q_G \cdot \rho_G \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Donde:

$Q_G$  : Caudal de salida de gas pobre.

$\rho_G$  : Densidad del gas pobre.

$$\dot{m}_C = P_C (kg)/t_f(h) \quad \text{Ecuación 3-7}$$

Donde:

$P_C$  : Peso de las cenizas.

$t_f$  : *Tiempo de funcionamiento*

$$\dot{m}_{AI} = V_{AI} \cdot \rho_{AI}$$

**Ecuación 3-8**

Donde:

$V_{AI}$  : Volumen del alquitrán producido.

$\rho_{AI}$  : Densidad del alquitrán.

### **3.9.1. Cantidad de energía producida por el gas pobre**

Donde:

PC : Poder calorífico de la muestra de gas en  $\text{kJ}/\text{m}^3$ .

$V_g$  : Volumen total del gas pobre producido en  $\text{m}^3$

$E_p$  : Energía producida por el gas pobre en kW/h

$$E_p = PC \cdot V_g$$

**Ecuación 3-9**

### **3.10. Plan de mantenimiento preventivo de medidor de flujo de gas pobre**

Después de la selección e instalación del equipo medidor de flujo, se ha establecido un plan de mantenimiento preventivo con el objetivo de mantener el funcionamiento óptimo del mismo. En este documento se detallan las tareas, actividades y frecuencia de ejecución para este equipo, se describe los materiales a ser utilizados para su realización.

El plan de mantenimiento del equipo medidor de flujo de Vortex se encuentra detallado en el ANEXO F.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Datos primera gasificación

Los datos fueron tomados en intervalos de 10 minutos.

##### 4.1.1. Datos de temperatura del gasificador

**Tabla 4-1:** Toma de datos de temperatura en las diferentes zonas de control del equipo.

Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)				
	T4 Zona de pirólisis	T5 Zona de pirólisis	T6 Zona de combustión	T7 Zona de combustión	T8 Zona de gasificación
0	17.90	18.90	21	19	88
10	19.00	19.40	30	25	287
20	19.10	19.70	40	36	431
30	19.30	19.60	45	48	461
40	19.60	19.50	57	64	493
50	19.70	19.50	80	89	520
60	19.80	19.40	81	91	538
70	20.00	19.60	139	101	547
80	20.30	19.70	210	123	542
90	21.00	19.40	190	139	520
100	21.00	19.20	182	151	475
110	22.50	19.00	207	170	506
120	24.40	18.50	218	188	434
130	25.30	19.50	204	188	475
140	24.50	19.00	205	175	492
150	25.00	19.40	209	181	560
160	24.50	19.30	206	183	590
170	23.40	19.30	207	191	595
180	23.70	19.00	208	193	600

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

##### 4.1.2. Datos de caudal, temperatura y presión de salida del gas pobre

Los datos de caudal son recolectados después de una hora de funcionamiento del gasificador.

**Tabla 4-2:** Datos de salida del gas pobre de primera gasificación.

Tiempo (minutos)	Caudal (m3/h)	Temperatura (°C)	Presión (KPa)	Velocidad (m/s)
0	0.00	0.00	73.00	0.00
10	29.05	25.30	73.00	5.00
20	37.50	25.40	72.00	5.30
30	32.87	25.60	74.00	5.10
40	38.64	25.40	73.00	5.70
50	42.67	25.60	73.00	5.60
60	38.67	25.30	73.00	5.80
70	38.23	25.20	73.00	5.50
80	37.20	25.00	72.00	5.30
90	39.40	25.60	73.00	6.40
100	40.01	25.40	74.00	6.40
110	42.07	25.60	73.00	6.40
120	39.50	25.70	74.00	6.50
<b>Promedio</b>	<b>37.98</b>	<b>25.43</b>	<b>73.08</b>	<b>5.75</b>
<b>Total, de m3 de gas pobre producido</b>				<b>75.97</b>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 4.1.3. Cálculo balance de masas primera gasificación

##### 4.1.3.1. Cálculo de cantidad de biomasa

Donde:

$$P_B = 30 \text{ kg}$$

$$t_f = 2 \text{ h}$$

$$\dot{m}_B = \frac{P_B \text{ (kg)}}{t_f \text{ (h)}} = (30 \text{ kg}) / (2 \text{ h}) = 15 \text{ kg/h}$$

##### 4.1.3.2. Cálculo de flujo másico de entrada de aire

Donde:

$$Q_A = 60.66 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_A = 0.791 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_A = Q_A \cdot \rho_A = (60.66 \text{ m}^3/\text{h})(0.791 \text{ kg/m}^3) = 47.982 \text{ kg/h}$$

##### 4.1.3.3. Cálculo de flujo másico de gas pobre

Donde:

$$Q_G = 37.98 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_G = 0.98 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_G = Q_G \cdot \rho_G = (37.98 \text{ m}^3/\text{h})(0.98 \text{ kg/m}^3) = 37.2204 \text{ kg/h}$$

#### 4.1.3.4. Cálculo de cantidad de cenizas

Donde:

$$P_C = 8 \text{ kg}$$

$$t_f = 2 \text{ h.}$$

$$\dot{m}_C = \frac{P_C \text{ (kg)}}{t_f \text{ (h)}} = \frac{8 \text{ kg}}{2 \text{ h}} = 4 \text{ kg/h}$$

#### 4.1.3.5. Cálculo de cantidad de alquitrán

Donde:

$$V_{Al} = 1.8 \text{ l. } ((1 \text{ m}^3)/(1000 \text{ l})) = 0.0018 \text{ m}^3/2 \text{ h} = 0.0009 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_{Al} = 2111.11 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{Al} = V_{Al} \cdot \rho_{Al} = (0.0009 \text{ m}^3/\text{h})(2111.11 \text{ kg/m}^3) = 1.899 \text{ kg/h}$$

Balance de masas.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Biomasa} + \dot{m}_{Aire} &= \dot{m}_{Gas\ pobre} + \dot{m}_{Ceniza} + \dot{m}_{Alquitran} \\ 15 \text{ kg/h} + 47.982 \text{ kg/h} &= 37.2204 \text{ kg/h} + 4 \text{ kg/h} + 1.899 \text{ kg/h} \\ 62.982 \frac{\text{kg}}{\text{h}} &= 43.119 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

**Tabla 4-3:** Resultado de balance de masas primera gasificación.

Denominación	Cantidad	Unidades de medida
Temperatura del aire	20	°C
Temperatura del gas pobre	25.43	°C
Densidad del aire	0.791	kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas pobre	1.5	kg/m <sup>3</sup>
Presión atmosférica en Riobamba	72.875	kPa
<b>Entradas</b>		
Flujo másico de biomasa	15	kg/h
Flujo másico de aire	47.982	kg/h
<b>Total</b>	<b>62.982</b>	<b>kg/h</b>
<b>Salidas</b>		
Flujo másico de gas pobre	43.16	kg/h
Flujo másico de cenizas	4	kg/h
Flujo másico de alquitrán	1.899	kg/h
<b>Total</b>	<b>43.119</b>	<b>kg/h</b>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

Después de realizado el balance de masas se puede afirmar que la diferencia de masas de entrada y de salida del gasificador no es significativa, por lo que el equipo es eficiente en cuanto a pérdida de materia, siempre que sea utilizado para este tipo de materiales como son: mezcla de viruta y cascarilla de arroz que fue la biomasa empleada para este proceso.

#### 4.2. Datos segunda gasificación

##### 4.2.1. Datos de temperatura del gasificador

Los datos se tomaron en intervalos de 10 minutos desde el arranque del equipo gasificador downdraft.

**Tabla 4-4:** Variación de las temperaturas en las diferentes zonas de control del equipo.

Tiempo (horas)	Temperatura (°C)				
	T4 Zona de pirólisis	T5 Zona de pirólisis	T6 Zona de combustión	T7 Zona de combustión	T8 Zona de gasificación
0	17.80	18.60	21	19	19
10	19.20	19.40	33	25	88
20	19.20	19.70	42	36	135
30	19.40	19.70	47	49	193
40	19.70	19.60	60	65	250
50	19.50	19.50	81	88	320
60	19.70	19.30	82	93	470
70	20.30	19.80	137	101	450
80	20.30	19.60	211	123	503
90	21.50	19.50	193	138	520
100	21.40	19.50	183	154	475
110	22.60	19.60	208	172	506
120	24.60	18.50	217	188	540
130	25.60	19.60	206	189	480
140	24.40	19.70	207	175	530
150	25.40	19.50	208	181	560
160	24.80	19.50	207	189	590
170	23.50	19.40	206	190	595
180	23.80	19.80	209	194	610

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

##### 4.2.2. Datos de caudal, temperatura y presión de salida del gas pobre

Los datos de caudal se tomaron después de transcurrida una hora de funcionamiento del equipo.



**Tabla 4-5:** Datos de salida del gas pobre de segunda gasificación.

Tiempo (minutos)	Caudal (m3/h)	Temperatura (°C)	Presión (KPa)	Velocidad (m/s)
0	0.00	19.90	72.00	0.00
10	44.23	40.30	74.00	6.30
20	42.28	40.50	74.00	6.10
30	44.54	41.70	74.00	6.30
40	45.51	37.80	74.00	6.50
50	42.58	35.10	72.00	6.10
60	42.98	35.30	73.00	6.10
70	42.36	36.60	72.00	5.90
80	42.57	37.20	69.00	6.00
90	44.02	37.80	70.00	6.20
100	44.03	37.60	72.00	6.20
110	43.81	37.00	74.00	6.20
120	44.23	36.50	70.00	6.20
<b>Promedio</b>	<b>43.60</b>	<b>36.41</b>	<b>72.31</b>	<b>6.18</b>
<b>Total, de m3 de gas pobre producido</b>				<b>87.19</b>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 4.2.3. Balance de masas segunda gasificación

##### 4.2.3.1. Cálculo de cantidad de biomasa

Donde:

$$P_B = 30 \text{ kg}$$

$$t_f = 2 \text{ h}$$

$$\dot{m}_B = \frac{P_B \text{ (kg)}}{t_f \text{ (h)}} = 30 \text{ kg} / 2 \text{ h} = 15 \text{ kg/h}$$

##### 4.2.3.2. Cálculo de flujo másico de entrada de aire

Donde:

$$Q_A = 60.66 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_A = 0.791 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_A = Q_A \cdot \rho_A = (60.66 \text{ m}^3/\text{h})(0.791 \text{ kg/m}^3) = 47.982 \text{ kg/h}$$

#### 4.2.3.3. Cálculo de flujo másico de gas pobre

Donde:

$$Q_G = 43.60 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_G = 1.06 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_G = Q_G \cdot \rho_G = (43.60 \text{ m}^3/\text{h})(1.06 \text{ kg/m}^3) = 45.58 \text{ kg/h}$$

#### 4.2.3.4. Cálculo de cantidad de cenizas

Donde:

$$P_C = 8 \text{ kg}$$

$$t_f = 2 \text{ h}$$

$$\dot{m}_C = \frac{P_C \text{ (kg)}}{t_f \text{ (h)}} = 8 \text{ kg}/2 \text{ h} = 4 \text{ kg/h}$$

#### 4.2.3.5. Cálculo de cantidad de alquitrán

Donde:

$$V_{Al} = (1.7 \text{ l})((1 \text{ m}^3)/(1000 \text{ l})) = (0.0017 \text{ m}^3/2 \text{ h}) = 0.00085 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_{Al} = 2294.11 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{Al} = V_{Al} \cdot \rho_{Al} = (0.00085 \text{ m}^3/\text{h})(2294.11 \text{ kg/m}^3) = 1.949 \text{ kg/h}$$

Balance de masas

$$\dot{m}_{Biomasa} + \dot{m}_{Aire} = \dot{m}_{Gas\ pobre} + \dot{m}_{Ceniza} + \dot{m}_{Alquitran}$$

$$15 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 47.982 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 45.58 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 1.949 \text{ kg/h}$$

$$62.982 \text{ kg/h} = 51.529 \text{ kg/h}$$

**Tabla 4-6:** Resultados balance de masas segunda gasificación.

Denominación	Cantidad	Unidades de medida
Temperatura del aire	20	°C
Temperatura del gas pobre	36.41	°C
Densidad del aire	0.791	kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas pobre	1.06	kg/m <sup>3</sup>
Presión atmosférica en Riobamba	72.875	kPa
<b>Entradas</b>		
Flujo másico de biomasa	15	kg/h

Flujo másico de aire	47.982	kg/h
<b>Total</b>	<b>62.982</b>	<b>kg/h</b>
<b>Salidas</b>		
Flujo másico de gas pobre	45.58	kg/h
Flujo másico de cenizas	4	kg/h
Flujo másico de alquitrán	1.949	kg/h
<b>Total</b>	<b>51.529</b>	<b>kg/h</b>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

### 4.3. Datos tercera gasificación

#### 4.3.1. Datos de temperatura del gasificador

**Tabla 4-7:** Variación de temperaturas en las diferentes zonas de control del equipo.

Tiempo (horas)	Temperatura (°C)				
	T4 Zona de pirólisis	T5 Zona de pirólisis	T6 Zona de combustión	T7 Zona de combustión	T8 Zona de gasificación
0	17.90	18.90	21	19	19
10	19.00	19.50	30	25	36
20	19.10	19.50	40	36	88
30	19.30	19.80	45	48	125
40	19.60	19.60	57	64	170
50	19.70	19.50	80	89	240
60	19.80	19.30	81	91	395
70	20.00	19.30	139	128	430
80	20.30	19.70	210	110	410
90	21.00	19.40	190	139	520
100	21.00	19.30	182	151	475
110	22.50	19.10	207	170	506
120	24.40	18.50	203	188	475
130	25.30	19.50	204	188	450
140	24.50	19.40	205	175	492
150	25.00	19.40	209	181	590
160	24.50	19.30	206	183	550
170	23.40	19.30	205	198	605
180	23.70	19.60	209	200	620

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 4.3.2. Datos de caudal, temperatura y presión de salida del gas pobre

Tabla 4-8: Datos de salida del gas pobre de tercera gasificación.

Tiempo (minutos)	Caudal (m3/h)	Temperatura (°C)	Presión (KPa)	Velocidad (m/s)
0	0.00	19.90	72.00	0.00
10	40.83	41.05	72.00	4.30
20	42.17	38.90	74.00	6.00
30	44.30	37.00	74.00	6.50
40	42.72	30.90	71.00	6.10
50	43.40	31.20	71.00	6.20
60	43.19	31.60	70.00	6.10
70	43.19	33.20	72.00	5.50
80	44.23	32.20	72.00	6.30
90	45.03	32.40	70.00	6.40
100	43.26	32.50	72.00	6.40
110	45.26	33.50	72.00	6.40
120	45.88	36.00	72.00	6.50
<b>Promedio</b>	<b>43.62</b>	<b>33.10</b>	<b>71.85</b>	<b>6.06</b>
<b>Total, de m3 de gas pobre producido</b>				<b>87.24</b>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 4.3.3. Balance de masas tercera gasificación

##### 4.3.3.1. Cálculo de cantidad de biomasa

Donde:

$$P_B = 30\text{kg}$$

$$t_f = 2h$$

$$\dot{m}_B = \frac{P_B \text{ (kg)}}{t_f \text{ (h)}} = 30 \text{ kg}/2h = 15 \text{ kg}/h$$

##### 4.3.3.2. Cálculo de flujo másico de entrada de aire

Donde:

$$Q_A = 60.66 \text{ m}^3/h$$

$$\rho_A = 0.791 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\dot{m}_A = Q_A \cdot \rho_A = (60.66 \text{ m}^3/h)(0.791 \text{ kg}/\text{m}^3 = 47.982 \text{ kg}/h$$

#### 4.3.3.3. Cálculo de flujo másico de gas pobre

Donde:

$$Q_G = 43.62 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_G = 1.12 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_G = Q_G \cdot \rho_G = (43.62 \text{ m}^3/\text{h})(1.12 \text{ kg/m}^3) = 48.85 \text{ kg/h}$$

#### 4.3.3.4. Cálculo de cantidad de cenizas

Donde:

$$P_C = 8 \text{ kg}$$

$$t_f = 2 \text{ h}$$

$$\dot{m}_C = \frac{P_C \text{ (kg)}}{t_f \text{ (h)}} = 8 \text{ kg}/2 \text{ h} = 4 \text{ kg/h}$$

#### 4.3.3.5. Cálculo de cantidad de alquitrán

Donde:

$$V_{Al} = (1.6 \text{ l}) \cdot (1 \text{ m}^3/1000 \text{ l}) = 0.0016 \text{ m}^3/2 \text{ h} = 0.0008 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_{Al} = 2250 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{Al} = V_{Al} \cdot \rho_{Al} = (0.0008 \text{ m}^3/\text{h})(2250 \text{ kg/m}^3) = 1.800 \text{ kg/h}$$

Balance de masas

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Biomasa} + \dot{m}_{Aire} &= \dot{m}_{Gas\ pobre} + \dot{m}_{Ceniza} + \dot{m}_{Alquitran} \\ 15 \text{ kg/h} + 47.982 \text{ kg/h} &= 48.85 \text{ kg/h} + 4 \text{ kg/h} + 1.800 \text{ kg/h} \\ 62.982 \text{ kg/h} &= 54.650 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

**Tabla 4-9:** Resultado balance de masas tercera gasificación

Denominación	Cantidad	Unidades de medida
Temperatura del aire	19	°C
Temperatura del gas pobre	33.10	°C
Densidad del aire	0.791	kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas pobre	1.12	kg/m <sup>3</sup>
Presión atmosférica en Riobamba	72.875	kPa
<b>Entradas</b>		
Flujo másico de biomasa	15	kg/h

Flujo másico de aire	47.982	kg/h
<b>Total</b>	<b>62.982</b>	<b>kg/h</b>
<b>Salidas</b>		
Flujo másico de gas pobre	48.85	kg/h
Flujo másico de cenizas	4	kg/h
Flujo másico de alquitrán	1.800	kg/h
<b>Total</b>	<b>54.650</b>	<b>kg/h</b>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 4.4. Datos cuarta gasificación

##### 4.4.1. Datos de temperatura del gasificador

**Tabla 4-10:** Datos de temperatura en las diferentes zonas de control del equipo.

Tiempo (horas)	Temperatura (°C)				
	T4 zona de pirolisis	T5 zona de pirólisis	T6 zona de combustión	T7 zona de combustión	T8 zona de gasificación
<b>0</b>	17.90	18.90	21	19	19
<b>10</b>	19.00	19.50	30	25	36
<b>20</b>	19.10	19.50	40	37	88
<b>30</b>	19.30	19.80	45	50	125
<b>40</b>	19.60	19.60	57	66	170
<b>50</b>	19.70	19.50	80	85	240
<b>60</b>	19.80	19.30	81	90	395
<b>70</b>	20.00	19.30	139	125	430
<b>80</b>	20.30	19.70	210	111	410
<b>90</b>	21.00	19.40	190	138	520
<b>100</b>	21.00	19.30	182	153	475
<b>110</b>	22.50	19.10	207	168	506
<b>120</b>	24.40	18.50	203	190	475
<b>130</b>	25.30	19.50	204	189	450
<b>140</b>	24.50	19.40	205	173	492
<b>150</b>	25.00	19.40	209	179	590
<b>160</b>	24.50	19.30	206	184	550
<b>170</b>	23.40	19.30	205	190	605
<b>180</b>	23.70	19.60	209	198	620

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 4.4.2. Datos de caudal cuarta gasificación.

**Tabla 4-11:** Datos de caudal de salida del gas pobre cuarta gasificación.

Tiempo (minutos)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Presión (KPa)	Velocidad (m/s)
0	0.00	19.7	73	0
10	41.12	26.5	73	6.0
20	42.33	27.8	73	6.0
30	45.26	31.4	74	6.4
40	50.01	38.9	75	7.0
50	49.62	42.1	74	6.9
60	46.70	50.6	74	6.8
70	48.58	54	75	6.9
80	47.35	57.3	74	7.1
90	45.50	56.1	75	5.8
100	43.26	50.3	74	5.7
110	43.40	51.4	75	5.9
120	45.30	47.4	74	6.3
<b>Promedio</b>	<b>45.70</b>	<b>42.58</b>	<b>74.08</b>	<b>6.4</b>
<b>Total, de m<sup>3</sup> de gas pobre producido</b>				<b>91.405</b>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 4.4.3. Balance de masas cuarta gasificación

##### 4.4.3.1. Cálculo de cantidad de biomasa

Donde:

$$P_B = 30\text{kg}$$

$$t_f = 2h$$

$$\dot{m}_B = \frac{P_B \text{ (kg)}}{t_f \text{ (h)}} = 30 \text{ kg}/2h = 15 \text{ kg}/h$$

##### 4.4.3.2. Cálculo de flujo másico de entrada de aire

Donde:

$$Q_A = 60.66 \text{ m}^3/h$$

$$\rho_A = 0.791 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\dot{m}_A = Q_A \cdot \rho_A = (60.66 \text{ m}^3/h)(0.791 \text{ kg}/\text{m}^3) = 47.982 \text{ kg}/h$$

#### 4.4.3.3. Cálculo de flujo másico de gas pobre

Donde:

$$Q_G = 45.70 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_G = 1.09 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_G = Q_G \cdot \rho_G = (45.70 \text{ m}^3/\text{h})(1.09 \text{ kg/m}^3) = 49.813 \text{ kg/h}$$

#### 4.4.3.4. Cálculo de cantidad de cenizas

Donde:

$$P_C = 8 \text{ kg}$$

$$t_f = 2 \text{ h}$$

$$\dot{m}_C = \frac{P_C \text{ (kg)}}{t_f \text{ (h)}} = 8 \text{ kg}/2 \text{ h} = 4 \text{ kg/h}$$

#### 4.4.3.5. Cálculo de cantidad de alquitrán

Donde:

$$V_{Al} = (1.9 \text{ l}) \cdot (1 \text{ m}^3/1000 \text{ l}) = 0.0019 \text{ m}^3/2 \text{ h} = 0.00095 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_{Al} = 2052.63 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{Al} = V_{Al} \cdot \rho_{Al} = (0.00095 \text{ m}^3/\text{h})(2052.63 \text{ kg/m}^3) = 1.949 \text{ kg/h}$$

Balance de masas

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Biomasa} + \dot{m}_{Aire} &= \dot{m}_{Gas\ pobre} + \dot{m}_{Ceniza} + \dot{m}_{Alquitran} \\ 15 \text{ kg/h} + 47.982 \text{ kg/h} &= 49.813 \text{ kg/h} + 4 \text{ kg/h} + 1.949 \text{ kg/h} \\ 62.982 \text{ kg/h} &= 55.762 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

**Tabla 4-12:** Resultado balance de masas cuarta gasificación.

Denominación	Cantidad	Unidades de medida
Temperatura del aire	19	°C
Temperatura del gas pobre	42.58	°C
Densidad del aire	0.791	kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas pobre	1.09	kg/m <sup>3</sup>
Presión atmosférica en Riobamba	72.875	kPa
<b>Entradas</b>		
Flujo másico de biomasa	15	kg/h
Flujo másico de aire	47.982	kg/h
<b>Total</b>	<b>62.982</b>	<b>kg/h</b>
<b>Salidas</b>		



Flujo másico de gas pobre	48.85	kg/h
Flujo másico de cenizas	4	kg/h
Flujo másico de alquitrán	1.949	kg/h
<b>Total</b>	<b>55.762</b>	<b>kg/h</b>

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

#### 4.5. Cálculo energía del gas pobre producido

Para el cálculo de energía del gas producido se obtendrá, a partir del valor promedio del volumen total producido en cada gasificación y utilizando el poder calorífico de los análisis realizados de las muestras, dato que se encuentran en el ANEXO G.

##### 4.5.1. Primera gasificación

$$PC = 6826.66 \text{ kJ/m}^3$$

$$V_g = 75.97 \text{ m}^3$$

$$E_p = PC \cdot V_g = (6826.66 \text{ kJ/m}^3)(75.97 \text{ m}^3) = 518621.36 \text{ kJ}$$

$$E_p = (518621.36 \text{ kJ})((1 \text{ kWh})/3600 \text{ kJ}) = 144.059 \text{ kWh}$$

$$E_p = 144.059 \text{ kWh}$$

##### 4.5.2. Segunda gasificación.

$$PC = 5697.90 \text{ kJ/m}^3$$

$$V_g = 87.19 \text{ m}^3$$

$$E_p = PC \cdot V_g = 5697.90 \text{ kJ/m}^3(87.19 \text{ m}^3) = 496799.901 \text{ kJ}$$

$$E_p = (496799.901 \text{ kJ})((1 \text{ kWh})/3600 \text{ kJ}) = 137.99 \text{ kWh}$$

$$E_p = 137.99 \text{ kWh}$$

##### 4.5.3. Tercera gasificación

$$PC = 4644.99 \text{ kJ/m}^3$$

$$V_g = 87.24 \text{ m}^3$$

$$E_p = PC \cdot V_g = (4644.99 \text{ kJ/m}^3)(87.24 \text{ m}^3) = 405228.928 \text{ kJ}$$

$$E_p = (405228.928 \text{ kJ})((1 \text{ kWh})/3600 \text{ kJ}) = 112.564 \text{ kWh}$$

$$E_p = 112.564 \text{ kWh}$$

#### 4.5.4. Cuarta gasificación

$$PC = 7088.65 \text{ kJ/m}^3$$

$$V_g = 91.41 \text{ m}^3$$

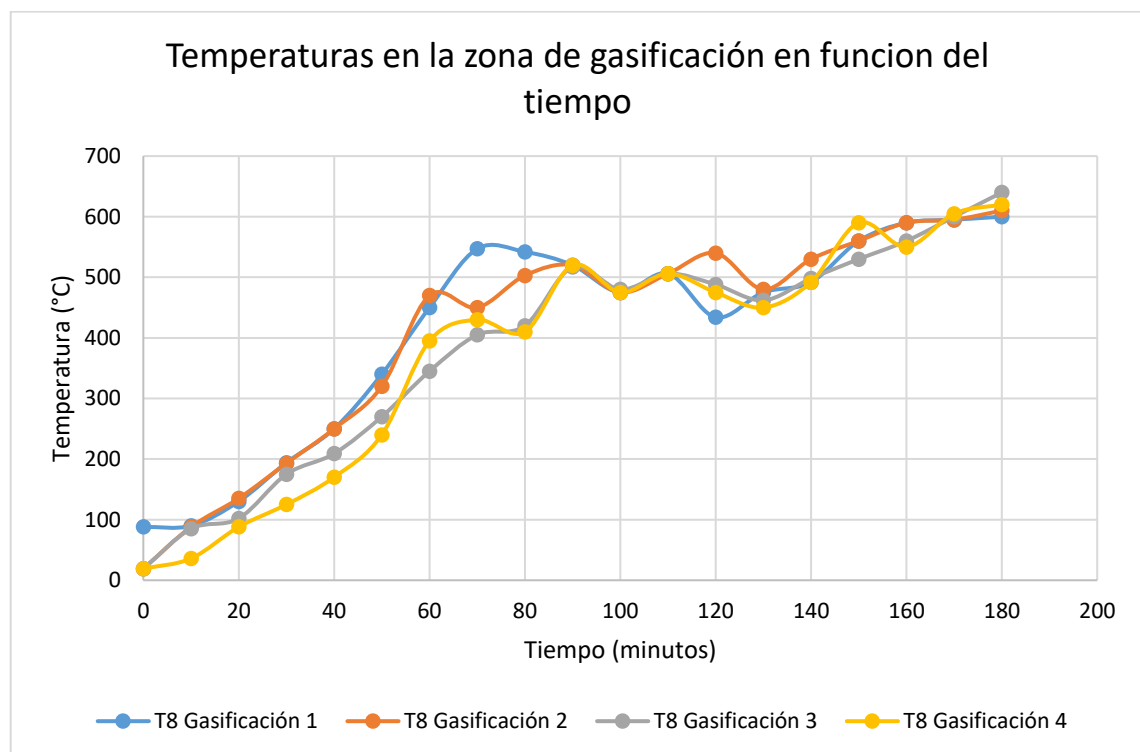
$$E_p = PC \cdot V_g = (7088.65 \text{ kJ/m}^3)(91.41 \text{ m}^3) = 647973.496 \text{ kJ}$$

$$E_p = (647973.496 \text{ kJ})((1 \text{ kWh})/3600 \text{ kJ}) = 179.992 \text{ kWh}$$

$$E_p = 179.992 \text{ kWh}$$

#### 4.6. Discusión sobre resultados

##### 4.6.1. Resultados de temperatura



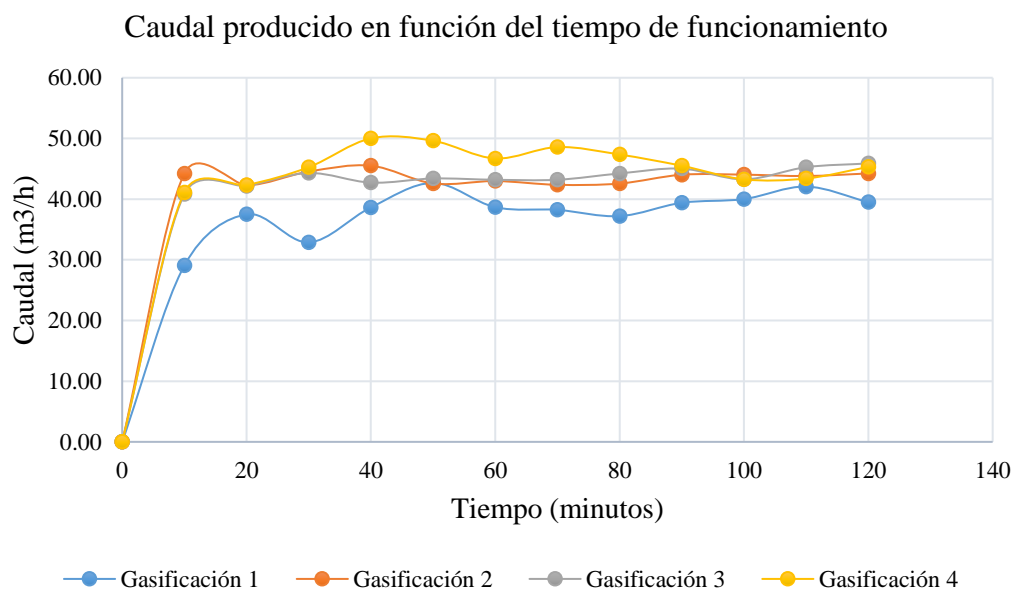
**Ilustración 4-1:** Variación de temperaturas en la zona de gasificación

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

En las diferentes gasificaciones realizadas con las mezclas de biomasa, primera gasificación de 50% viruta y 50% cascarilla de arroz, segunda gasificación de 75% cascarilla de arroz y 25% de viruta, tercera gasificación 100% de cascarilla de arroz y cuarta gasificación 100% de viruta se obtuvieron los datos de temperatura especificados en las tablas: Tabla 4-1, Tabla 4-4, Tabla 4-7, donde se observa la variación de las temperaturas de acuerdo con el tiempo transcurrido que van desde el encendido del gasificador hasta que este se apaga.

Como se puede notar en la Ilustración 4-1, donde se muestra la variación de temperatura en la zona de gasificación del equipo, se visualiza la tendencia de caída de estas entre 10 °C y 20 °C por un lapso de unos 10 minutos esto se debe a la alimentación de la biomasa que se realiza progresivamente cada 30 minutos, lo que es causado por que se ahoga la llama en la zona de combustión por unos instantes. Las temperaturas en esta zona de gasificación al momento de producción del gas pobre oscilan entre los 450°C y 620°C, por lo que se puede concluir que este es el rango de temperatura óptima en esta zona para que se produzca la gasificación de este tipo de biomazas como son viruta y cascarilla de arroz.

#### 4.6.2. Resultados de caudal



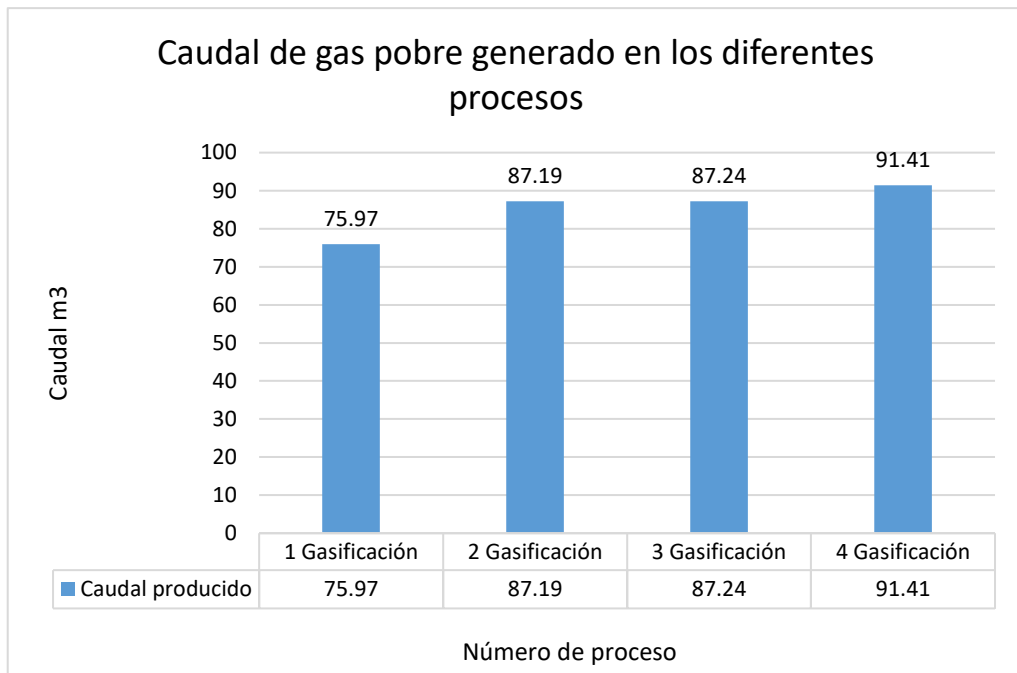
**Ilustración 4-2:** Variación de caudal de los procesos de gasificación.

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

En los cuatro procesos de gasificación realizados se obtuvo los siguientes datos de caudal: primera gasificación se obtuvo un caudal promedio de 37.98 m<sup>3</sup>/h y un total de 75.97 m<sup>3</sup> de gas producido como se muestra en la Tabla 4-2 . En la segunda gasificación se obtuvo un caudal promedio de 43.60 m<sup>3</sup>/h y total de gas producido 87.19 m<sup>3</sup> como se observa en la Tabla 4-5. En la tercera gasificación se obtuvo un caudal promedio de 43.62 m<sup>3</sup>/h y total de gas producido de 87.24 m<sup>3</sup> como se muestra en la Tabla 4-8. Para la cuarta gasificación se tiene un promedio de caudal de 45.70 m<sup>3</sup>/h y un total de gas producido de 91.41 m<sup>3</sup> como se muestra en la Tabla 4-11.

Como se observa en la Ilustración 4-2, los cambios de caudal en las diferentes gasificaciones poseen valores similares y no existe variaciones significativas en los procesos, esto se debe a que

en todos las fases se mantuvo constante la entrada de agente gasificante en  $60.66 \text{ m}^3/\text{h}$ , por lo que se puede concluir que en este equipo gasificador la salida del caudal de gas pobre producido, se modifica de acuerdo a la variación entrada del agente gasificante que es el aire.



**Ilustración 4-3:** Volumen de caudal generado en los diferentes procesos de gasificación.

**Realizado por:** Velastegui Nelson, 2023.

Como se puede observar en la Ilustración 4-3, los diferentes caudales volumétricos que se obtuvieron en los diferentes procesos de gasificación con las diferentes mezclas de biomasa que fueron especificados anteriormente, se obtuvo en la primera gasificación un caudal de  $75.97 \text{ m}^3/\text{h}$  y en la última gasificación se obtuvo  $91.41 \text{ m}^3/\text{h}$  esta variación de caudal se debe a que a medida que se utiliza este equipo con mayor frecuencia se adquieren experiencia y habilidades para su manipulación logrando así una mayor eficiencia en el proceso, por lo que se ve reflejado en un mayor caudal de gas pobre generado en la última gasificación.

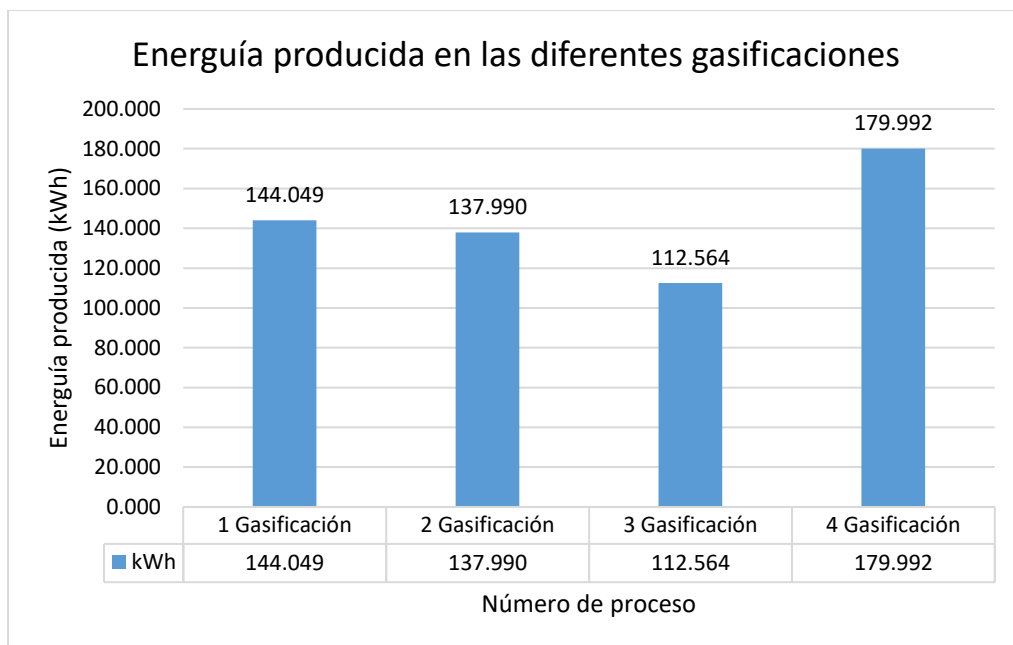
#### 4.6.3. Resultados de balance de masas

Como se puede observar en la Tabla 4-3, donde se obtiene un valor de masa de entrada de  $62.982 \text{ kg/h}$  y  $43.119 \text{ kg/h}$  de masas de salida para la primera gasificación, lo que da una pérdida de masa del  $31.5 \%$ . En la segunda gasificación como se observa en Tabla 4-6, se obtuvo un flujo másico de entrada de  $62.982 \text{ kg/h}$  y de salida  $51.529 \text{ kg/h}$ , lo que da una pérdida del  $18.2\%$  de masa en el equipo. Para la tercera gasificación se observa una entrada de  $62.980 \text{ kg/h}$  y una salida de  $54.650 \text{ kg/h}$  como se muestra en la Tabla 4-9, lo que da una pérdida del  $13.01\%$  de masa. Para la

cuarta gasificación se obtuvo un flujo másico de entrada de 62.980 kg/h y de salida 55.762 kg/h dando una pérdida de masa de 11.43% de masa en la salida como se observa en la Tabla 4-12.

Los porcentajes de resultado de pérdida en gran parte se deben a que parte de los residuos de la biomasa consumida cenizas y el alquitrán se quedan adheridas a los conductos y tuberías del equipo que no son de inmediata remoción para ser medidas, por otra parte. Orozco manifiesta que estos resultados de diferencia entran masa de salida y entrada no deben ser tomados a la ligera ya que debemos recordar que el gas pobre producido es mucho menos denso que la biomasa utilizada y no deben ser tomados como que se estuviera creando materia ya que se debe tener en cuenta que el gas producido es una reacción entre la biomasa y el aire (Orozco, 2017 pág. 85).

#### 4.6.4. Resultados de energía de gas pobre producido



**Ilustración 4-4:** Energía calculada del gas pobre producido.  
Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

Los resultados de la energía que puede generar el gas producido se calcularon, según el volumen de gas producido en los diferentes procesos y el poder calorífico de la muestra de gas que fue analizada en el laboratorio, obteniendo los siguientes resultados que se pueden observar en la Ilustración 4-4.

En la primera gasificación se obtuvo 144.049 kWh de energía esto con una mezcla de biomasa de 50% viruta y 50 % de cascarilla de arroz. Para la segunda gasificación se tiene una energía generada de 137.990 kWh esto con una mezcla de biomasa de 75% de cascarilla de arroz y un 25% de viruta. Para la tercera gasificación se tiene 122.564 kWh de energía generada esto con un

100% de cascarilla de arroz. En la cuarta gasificación se tiene una energía producida de 179.992 kWh esto con una biomasa de 100% de viruta.

Con estos datos observados en la Ilustración 4-4, se puede decir que, de las biomásas utilizadas, la que proporciona un gas de mejor calidad y mayor poder calorífico es la biomasa de viruta, dando, así como resultado una mayor generación de energía consumible y que puede ser utilizada en otros procesos industriales.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

Se obtuvo las medidas de las diferentes variables necesarias que fueron requeridas para la selección adecuada del medidor de flujo de gas pobre entre ellas el caudal, presión, temperatura y velocidad de salida del gas pobre.

Se realizó la selección adecuada del medidor de flujo de gas pobre teniendo en cuenta los parámetros de trabajo de gasificador Downdraft de la Facultad de Mecánica, así como la propuesta más económica y que presente el mayor rendimiento para la medición de caudal en este equipo.

Se instaló el equipo de cuantificación del gas pobre de acuerdo con especificaciones del fabricante obteniendo los siguientes caudales volumétricos, 37.98  $m^3/h$ , con la mezcla de 50% de biomasa de cascarilla de arroz y 50% de viruta, 43.60  $m^3/h$  para mezcla de biomasa de 75% de cascarilla de arroz y 25% viruta, 43.62  $m^3/h$  para la biomasa de 100% de cascarilla de arroz, y 45.70  $m^3/h$  para una mezcla de biomasa de 100% de viruta, así se comprobó el correcto funcionamiento de este.

Se obtuvieron los datos de la energía que genera el gas pobre producido en las diferentes gasificaciones mediante el poder calorífico del gas obteniendo una mayor energía al utilizar el 100% de biomasa de viruta dando una potencia de 179.992 kWh, concluyendo que los residuos de madera son los que producen un gas pobre de mejor calidad, suficiente para cubrir la necesidad de una vivienda en un lugar residencial por un mes, como manifiesta la publicación de la página web PETROENERGÍA, el consumo residencial de una vivienda en Ecuador es 141.42 kWh en promedio mensual (Vallejo, 2021 pág. 1).

Se elaboró un plan de mantenimiento preventivo del medidor de flujo de gas pobre donde se especifican todo el procedimiento de este donde constan las tareas de mantenimiento que permitirá que el equipo tenga una mayor vida útil.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Adquirir e instalar otro equipo de medición directa de caudal en la entrada de aire para que facilite la medición en este punto, realizar pruebas con diferentes caudales de agente gasificante para obtener una mejor calidad del gas pobre producido.

Realizar una instalación de by pass en la instalación del medidor de flujo de la salida de gas pobre para tener una vía de salida emergente por si se presenta algún contratiempo en el equipo.

Efectuar pruebas con diferentes materiales a los ya realizados, con la finalidad de obtener un gas de mejor calidad y un incremento de caudal de gas pobre producido

Rediseñar la tolva del sistema de alimentación ya que produce atascamientos con algunas de las biomásas utilizadas.

Que el gas pobre generado sea utilizado en otro proceso como para generación de energía eléctrica mediante un motor de combustión a gas.



## BIBLIOGRAFÍA

1. **CARMONA, O.** *Diseño de un gasificador de lecho fijo en equicorriente de núcleo abierto para operar con cascarilla de arroz*, [en línea]. Medellín, Colombia: Institución Universitaria Pascual Bravo, 2022, 6(32), pp. 59-67. [Consulta: 16 de noviembre de 2022.]. Disponible en: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2501/1861>.
2. **CASTAÑO, Sergio.** *Medidores de flujo*. En: *Control Automatico Educacion*. [En línea] 2022. [Consulta: 16 de noviembre de 2022.] Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/instrumentacion/medidores-de-flujo/>. [Consulta: 21 de septiembre de 2022].
3. **CEUPE MAGAZINE.** *Que es la pirolisis*. En *ceupe.com*. [En línea]. 2022. [Consulta: 18 de septiembre de 2022] Disponible en: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html>.
4. **EUROINNOVA.** *Que es un manual de operaciones*. En: *euroinnova.ec*. [En línea]. 2022. [Consulta: 10 de septiembre de 2022] Disponible en: <https://www.euroinnova.ec/blog/que-es-un-manual-de-operaciones>.
5. **FELIPE, IV.** *Definicion de alquitran*. [En línea]. Vigésimotercera edición. Madrid-España: Real Academia Española, 2022. [consulta: 12 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://dle.rae.es/alquitr%C3%A1n>.
6. **FURLAN, Antonio.** *Medidores de precision diferencial*. En: *www.smart.es*. [En línea]. 2022 [Consulta: 01 de noviembre de 2022.] Disponible en: <https://www.smar.com/public/img/dropzone/archivos/portfolio-de-productos-esp-2020.pdf>.
7. **GOMEZ, Santiago.** *Que es la biomasa*. En *appa renovables*. [En línea]. 2022 [Consulta: 16 de agosto 2022] Disponible en: <https://www.appa.es/appa-biomasa/que-es-la-biomasa/>.
8. **GREEN MACHINE.** *Secado de biomasa*. En: *Green Machine*. [En línea]. 2019. [Consulta: 16 noviembre de 2022] Disponible en: <https://www.dorset.nu/es/greenmachines/soluciones/secado-de-biomasa/>.

9. **GUALÁN SOZORANGA, Diego Mauricio.** *Plan de mantenimiento electro-hidráulico para la empresa “Metalmecánica Los Panchos Cía. Ltda.”.* [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Cuenca-Ecuador. 2022. pp. 9-10.[Consulta: 15 diciembre 2022]. Disponible en : <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22699/5/UPS-CT009830.pdf>.
10. **HERRERA PERÉZ, Raúl German.** *Análisis térmico de un gasificador tipo Downdraft al combustionar residuos forestales.* [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Ingeniería). ESPOCH, Carrera de Ingeniería Mecánica, Riobamba -Ecuador.2019. pp 21. [Consulta: 15 diciembre 2022], Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13243>
11. **HORMAZA RODRIGUEZ, Walter Mauricio.** *Implementación de un sistema de instrumentación con sensores de temperatura y de flujo en cada etapa del gasificador Downdraft GEK 1.2.5 de la Facultad técnica para regular la eficiencia en grupo electrógeno Otto usando gas de síntesis obtenido por biomas.* [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Ingeniería). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. 2019.pp. 22-23. [Consulta: 18 septiembre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/13380/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-224.pdf>
12. **JIMENEZ, Carlos.** *MECÁNICA DE FLUIDOS: VISCOSIDAD Y TURBULENCIA.* [En línea] 2018. [Consulta: 11 noviembre de 2022] Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10194/Din%C3%A1mica%20de%20fluidos%20viscosos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
13. **LAYANA PAREDES Juan Carlos.** *Montaje de motor de combustión interna tipo Otto modelo Liffan 5500 para pruebas didácticas de micro generación de electricidad con la ayuda de un gasificador Downdraft modelo GEK -1.2.5.* [En línea] (Trabajo de Titulación) (Ingeniería). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. 2019.pp. 16-18. [Consulta: 12 septiembre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12481/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-170.pdf>







14. **LÓPEZ VARGAS, Carlos Armando.** *Propuesta de Creación de Prototipo de Medidor de Flujo Ultrasónico para Gasoductos CL-1.* [En línea] (Investigación). Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional Bolivariana. Estado Monagas. VENEZUELA. 2018 pp. 03-04. [Consulta: 11 septiembre 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uci.cu/bitstream/123456789/9498/1/A226.pdf>
15. **OROZCO CANTOS, Lenin Santiago.** *Levantamiento y análisis del potencial energético aprovechable de la biomasa forestal en el cantón Riobamba y su viabilidad a través de gasificación tipo downdraft* [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2019. pp. 3-161. [Consulta: 17 de octubre 2022]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18894/1/CD-8286.pdf>
16. **OROZCO, L. JÁCOME, E. BONILLA, S. CASTELO, J.** “*Sistema de filtrado y enfriamiento de syngas como mejora al proceso de gasificación downdraft*”, *Revista Caribeña de Ciencias Sociales.* [En línea]. 2018, (Riobamba-Ecuador), pp. 10-11. [Consulta: 12 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.eumed.net/2/rev/caribe/2018/03/filtrado-enfriamiento-syngas.html>. 2254-7630.
17. **PAREDES CARRILLO, Freddy Andres. GUAMÁN LLANGA, Dario Fernando.** *Elaboración de un plan de mantenimiento para los sistemas de captación, planta de tratamiento de agua y tanques de reserva de la EP EMAPAR aplicando la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad.* [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador. 2021. pp. 40-41. [Consulta: 15 noviembre 2022] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14963/1/25T00399.pdf>.
18. **RUIZ CAICEDO, Johnny Pedro.** *Montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft para la obtención de energía eléctrica a través de biomasa* [En línea] (Trabajo de Titulación) (Ingeniería). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. 2018. pp. 14-15. [Consulta: 17 septiembre 2022]. Disponible en: <http://201.159.223.180/bitstream/3317/11360/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-157.pdf>.

19. **SCHLUMBERGER.** *Que es el gas pobre.* En *energy glosary español*. [En línea]. 2022. [Consulta: 18 de septiembre 2022] Disponible en: [https://glossary.slb.com/es/terms/l/lean\\_gas](https://glossary.slb.com/es/terms/l/lean_gas).
20. **TSOLUCIONA.** *Intercambiadores de calor y para que sirven.* En *t-solucion.com*. [En línea]. 2022. [Consulta: 15 de Mayo de 2022.]. Disponible en: <https://t-solucion.com/intercambiadores-calor-que-son-sirven/>.
21. **UNET.** Flujo en tuberías. En *unet.edu.ev*. [En línea]. 2022. [Consulta: 12 de noviembre 2022] Disponible en: [http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F\\_DE\\_T-153.htm](http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-153.htm).
22. **VALLEJO, Catalina.** *Importancia de la categorización del consumo eléctrico del sector residencial en Ecuador.* En: *Petroenergía*. [En línea]. 2021. Disponible en: <https://www.petroenergia.info/post/importancia-de-la-categorizaci%C3%B3n-del-consumo-el%C3%A9ctrico-del-sector-residencial-en-ecuador>. [Consulta: 14 de enero de 2023]
23. **VÁSCONEZ, Lucia.** *Ecuador actualiza el Bloque de Energías Renovables de 200 a 500 megavatios.* En *El comercio*. [En línea]. 2021. [Consulta: 21 de Junio de 2021] Disponible en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/ecuador-actualiza-bloque-energias-renovables-megavatios.html>.
24. **YANGARI SALAZAR, Iliana Janeth.** *Estudio de factibilidad para la generación de energía limpia a partir de biomasa en la parroquia rural Sabanilla.* [En línea] (Trabajo de Titulación) (Ingeniería). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. 2022. pp. 20-21. [Consulta: 01 septiembre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/59557/1/YANGARI%20SALAZAR%20ILIANA%20JANETH.pdf>.

## ANEXOS

### ANEXO A: PROCEDIMIENTO DE PRIMERA GASIFICACIÓN







Actividad	Cantidad	Tiempo (minutos)	Imagen
Colocar la madera troceada dentro de la zona de combustión del gasificador y proceder al encendido de esta.	20kg de madera trozada.	10	
Colocar las tapas de la zona de combustión del gasificador y prender el soplador de entrada de aire, para que esta continúe internamente.		20	
Luego de que está bien encendida la zona de combustión del gasificador administrar 30 kg de biomasa progresivamente por medio del sistema dosificador.	30kg. De biomasa	20	
Observar que este encendida la biomasa suministrada y colocar la tapa superior del cuerpo del gasificador		10	
Una vez colocada la tapa superior del reactor tomar las medidas de caudal 10 minutos. Las temperaturas se toman cada 10 minutos desde que se encendió la biomasa en la zona de combustión.		10	

<p>La biomasa debe ser administrada progresivamente cada 30 minutos, con los 30 kg de biomasa tendremos una producción constante de gas para más o menos 2 horas de funcionamiento del equipo desde que se cerró la tapa superior del gasificador</p>	<p>30 kg de biomasa.</p>	<p>20</p>	
<p>Luego de unos 10 minutos de colocada la tapa superior del reactor se puede observar la presencia del gas pobre producido.</p>		<p>10</p>	
<p>Realizar purgas de alquitrán en las tuberías de purga del filtro y del enfriador cada 30 minutos para evitar la acumulación de este.</p>		<p>10</p>	
<p>Realizar tomas de las variables de temperatura y caudal cada 10 minutos, mientras este encendida la llama de la salida de gas pobre.</p>		<p>1</p>	
<p>Se realiza una toma de una muestra del gas producido para ser enviado a un análisis de laboratorio donde se especificará las propiedades del gas pobre.</p>		<p>10</p>	
<p>Después de finalizado el proceso de gasificación se realiza la limpieza del equipo y la toma de muestras de residuos como el la ceniza y el alquitrán los cuales son medidos y pesados respectivamente</p>	<p>Se obtuvo 8kg de ceniza y 1.8 litros de alquitrán</p>	<p>60</p>	

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

## ANEXO B: PROCEDIMIENTOS REALIZADOS EN LA SEGUNDA GASIFICACIÓN






Actividad	Cantidad	Tiempo (minutos)	Imagen
Colocar la madera troceada dentro de la zona de combustión del gasificador y proceder al encendido de esta.	20kg de madera trozada.	10	
Colocar las tapas de la zona de combustión del gasificador y prender el blower de entrada de aire, para que esta continúe internamente.		20	
Luego de que está bien encendida la zona de combustión del gasificador administrar 30 kg de biomasa progresivamente por medio del sistema dosificador. Primero administrar 15 kg y después 5 kg cada media hora de funcionamiento	30kg. De biomasa	20	
Observar que este encendida la biomasa suministrada y colocar la tapa superior del cuerpo del gasificador		10	
Una vez colocada la tapa superior del reactor tomar las medidas de caudal 10 minutos. Las temperaturas se tomadas cada 10 minutos desde que se encendió la biomasa en la zona de combustión.		10	







<p>La biomasa debe ser administrada progresivamente cada 30 minutos, con los 30 kg de biomasa tendremos una producción constante de gas para más o menos 2 horas de funcionamiento del equipo desde que se cerró la tapa superior del gasificador</p>	<p>30 kg de biomasa.</p>	<p>20</p>	
<p>Luego de unos 10 minutos de colocada la tapa superior del reactor se puede observar la presencia del gas pobre producido.</p>		<p>10</p>	
<p>Realizar purgas de alquitrán en las tuberías de purga del filtro y del enfriador cada 30 minutos para evitar la acumulación de este.</p>		<p>10</p>	
<p>Realizar tomas de las variables de temperatura y caudal cada 10 minutos, mientras este encendida la llama de la salida de gas pobre.</p>		<p>1</p>	
<p>Se realiza una toma de una muestra del gas producido para ser enviado a un análisis de laboratorio donde se especificará las propiedades del gas pobre.</p>		<p>10</p>	
<p>Después de finalizado el proceso de gasificación se realiza la limpieza del equipo y la toma de muestras de residuos como el la ceniza y el alquitrán los cuales son medidos y pesados respectivamente</p>	<p>Se obtuvo 8.3kg de ceniza y 1.7 litros de alquitrán</p>	<p>60</p>	

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.



## ANEXO C: PROCEDIMIENTOS REALIZADOS EN LA TERCERA GASIFICACIÓN

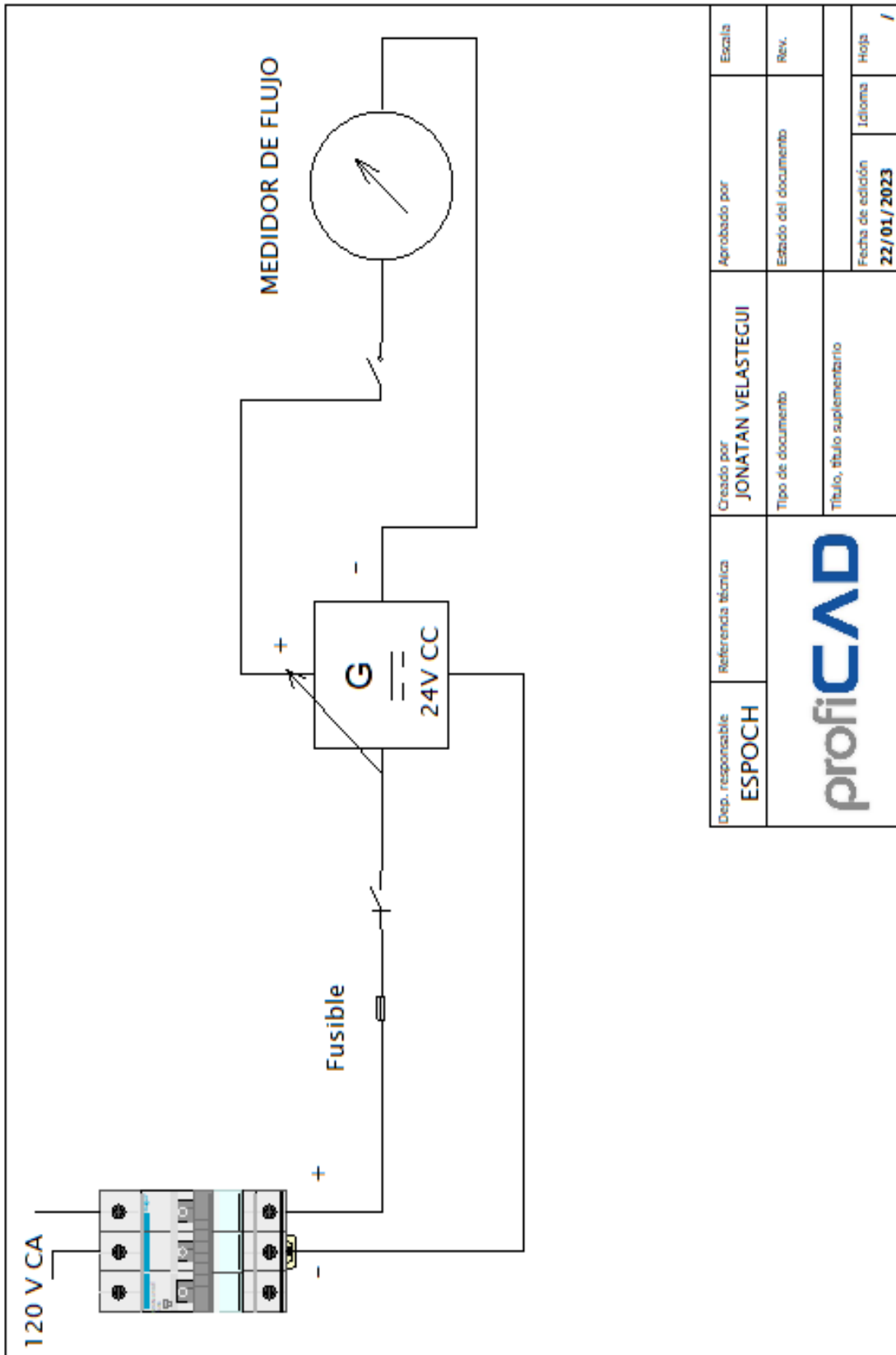
Actividad	Cantidad	Tiempo (minutos)	Imagen
Colocar la madera troceada dentro de la zona de combustión del gasificador y procedemos al encendido de esta.	20kg de madera trozada.	10	
Colocar las tapas de la zona de combustión del gasificador y prender el soplador de entrada de aire, para que esta continúe internamente.		20	
Luego de que está bien encendida la zona de combustión del gasificador administrar 30 kg de biomasa progresivamente por medio del sistema dosificador. Alimentar con 15 kg y luego 5 kg cada media hora progresivamente	30kg. De biomasa	20	
Observar que este encendida la biomasa suministrada y colocar la tapa superior del cuerpo del gasificador		10	
Una vez colocada la tapa superior del reactor tomar las medidas de caudal 10 minutos. Las temperaturas se toman cada 10 minutos desde que se encendió la biomasa en la zona de combustión.		10	

<p>La biomasa debe ser administrada progresivamente cada 30 minutos, con los 30 kg de biomasa tendremos una producción constante de gas para más o menos 2 horas de funcionamiento del equipo desde que se cerró la tapa superior del gasificador</p>	<p>30 kg de biomasa.</p>	<p>20</p>	
<p>Luego de unos 10 minutos de colocada la tapa superior del reactor se puede observar la presencia del gas pobre producido.</p>		<p>10</p>	
<p>Realizar purgas de alquitrán en las tuberías de purga del filtro y del enfriador cada 30 minutos para evitar la acumulación de este.</p>		<p>10</p>	
<p>Realizar tomas de las variables de temperatura y caudal cada 10 minutos, mientras este encendida la llama de la salida de gas pobre.</p>		<p>1</p>	
<p>Se realiza una toma de una muestra del gas producido para ser enviado a un análisis de laboratorio donde se especificará las propiedades del gas pobre.</p>		<p>10</p>	
<p>Después de finalizado el proceso de gasificación se realiza la limpieza del equipo y la toma de muestras de residuos como el la ceniza y el alquitrán los cuales son medidos y pesados respectivamente</p>	<p>Se obtuvo 7.9kg de ceniza y 1.6 litros de alquitrán</p>	<p>60</p>	

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

**ANEXO D: MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL MEDIDOR DE FLUJO DE VORTEX**

**ANEXO E: DIAGRAMA ELÉCTRICO DE ALIMENTACIÓN DEL EQUIPO MEDIDOR DE FLUJO DE VORTEX.**



Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.



## ANEXO F: PLAN DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO MEDIDOR DE FLUJO

### Plan de mantenimiento preventivo de Medidor de Flujo de Gas de Vortex

**Finalidad del mantenimiento:** Conservar el equipo y su instalación en perfectas condiciones de cumplir su función para la que fueron proyectados y definidos

#### Objetivos:

Prolongar la vida útil del equipo.

Conservar el equipo en condiciones seguras de operación.

Evitar fallas imprevistas en el equipo al momento de su operación.

PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO		Fecha de elaboración: 10/01/2023		
		Fecha de revisión: 20/01/2023		
		Fecha de aprobación: 20/01/2023		
Elaborado por: Nelson Jonatan Velastegui Casco		Revisa: Ing. Ángel Jácome		Aprueba: Ing. Marco Ordoñez
Área: Generación de gas pobre de la Facultad de Mecánica de la Espoch.				
Nombre del subsistema: Cuantificador de gas pobre			Código:	
Equipo	Tarea	Frecuencia (horas)	Responsable	Instrumentos o herramientas para utilizar
Medidor de gas de Vortex.	Desmontaje de equipo medidor de flujo de línea de operación.	10	Encargados de realizar prácticas en el área de generación de biogás de la Facultad de Mecánica	Destornilladores planos y estrella, laves de tubo 2" y 4".
Medidor de gas de Vortex.	Desmontaje de bridas laterales del equipo medidor de flujo.	10	Encargados de realizar prácticas en el área de generación de biogás de la Facultad de Mecánica	2 llaves 24mm, guaipe.
Medidor de gas de Vortex.	Desmontaje de elementos interiores de medidor de flujo	10	Encargados de realizar prácticas en el área de generación de biogás de la Facultad de Mecánica	Alicate para anillos de sujeción.
Medidor de gas de Vortex.	Realizar la limpieza del interior del equipo medidor de flujo.	20	Encargados de realizar prácticas en el área de generación de biogás de la Facultad de Mecánica	Guaípe, brocha, alcohol industrial, atomizador
Medidor de gas de Vortex.	Realizar la limpieza de bridas, tuberías, retenedores, generador de vórtice del equipo medidor de flujo	10	Encargados de realizar prácticas en el área de generación de biogás de la Facultad de Mecánica	Guaípe, brocha, alcohol industrial, atomizador
Tuberías de conexión laterales	Montaje de elementos interiores de medidor de flujo	10	Encargados de realizar prácticas en el área de generación de biogás de la Facultad de Mecánica	Alicate para anillos de sujeción

Medidor de gas de Vortex.	Realizar el montaje de las bridas del equipo medidor de flujo	10	Encargados de realizar prácticas en el área de generación de biogás de la Facultad de Mecánica	2 llaves 24mm, teflón, empaques de junta de papel victoria y teflón.
Medidor de gas de Vortex.	Realizar el montaje del equipo en las líneas de funcionamiento	10	Encargados de realizar prácticas en el área de generación de biogás de la Facultad de Mecánica	Llaves de tubo 2" y 4" guaipe, teflón.







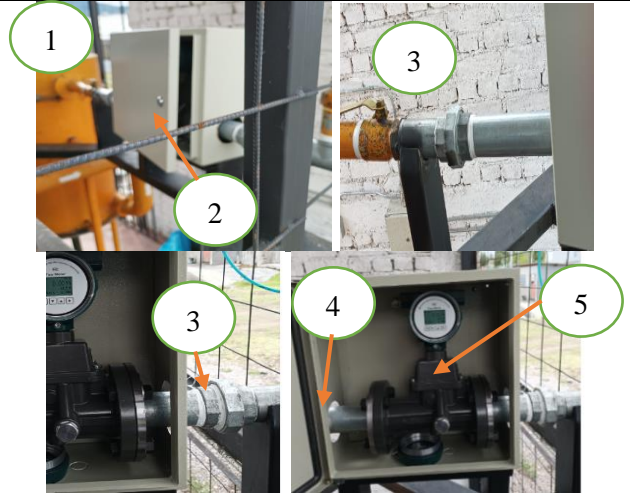




Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

<b>HOJA DE TAREAS DE MANTENIMIENTO</b>											
<b>Departamento/ Área</b>		<b>Tiempo disponible de operación</b>	<b>Realizada por:</b>	Nelson Velastegui							
Generación de gas pobre		90 min	<b>Fecha:</b>	10/01/2023							
<b>Nombre de la operación</b>		<b>Equipo/subsistema</b>	<b>Página:</b>	1 de 1							
Ruta de Mantenimiento Preventivo		Medidor de flujo/filtrado de gas pobre									
Base de conocimientos/formación (Entrenamiento)											
<b>Base de conocimientos</b>			<b>Capacitación /entrenamiento</b>								
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr><td>Mantenimiento industrial</td></tr> <tr><td>Seguridad industrial</td></tr> <tr><td>Manejo de herramientas</td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>			Mantenimiento industrial	Seguridad industrial	Manejo de herramientas		<table border="1" style="width: 100%;"> <tr><td>Capacitación en procesos de instalación de tuberías</td></tr> <tr><td>Capacitación en riesgos</td></tr> <tr><td>Entrenamiento en el uso de herramientas</td></tr> </table>		Capacitación en procesos de instalación de tuberías	Capacitación en riesgos	Entrenamiento en el uso de herramientas
Mantenimiento industrial											
Seguridad industrial											
Manejo de herramientas											
Capacitación en procesos de instalación de tuberías											
Capacitación en riesgos											
Entrenamiento en el uso de herramientas											
#	Tarea	Tiempo ciclo de tarea (min)	Frecuencia (semanas)	Total, de tiempo de ciclo (min)							
1	Desmontaje de equipo medidor de flujo de línea de operación.	5	2	10							
2	Desmontaje de bridas laterales del equipo medidor de flujo.	5	2	10							
3	Desmontaje de elementos interiores de medidor de flujo	5	2	10							
4	Realizar la limpieza del interior del equipo medidor de flujo.	10	2	20							







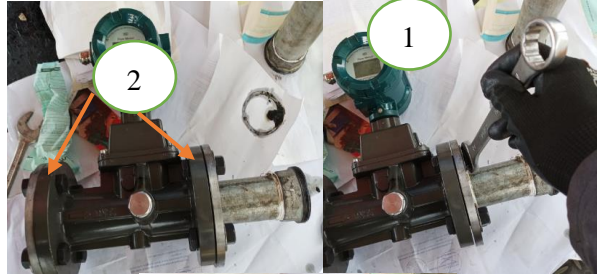


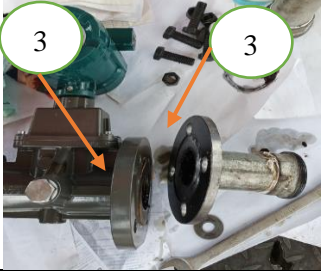
5	Realizar la limpieza de bridas, tuberías, retenedores, generador de vórtice del equipo medidor de flujo	20	2	20	
6	Montaje de elementos interiores de medidor de flujo	5	2	10	
7	Realizar el montaje de las bridas del equipo medidor de flujo	5	2	10	
8	Realizar el montaje del equipo en las líneas de funcionamiento	5	2	10	
<b>Total, de tiempo (min)</b>				<b>100 minutos</b>	
<b>Bloque de firma</b>			<b>Historial de cambios en el trabajo</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Revisa</b>	<b>Aprueba</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Cambio</b>
10/01/2023	Ing. Ángel Jácome	Ing. Marco Ordoñez			

**Realizado por:** Velastegui Nelson, 2023.







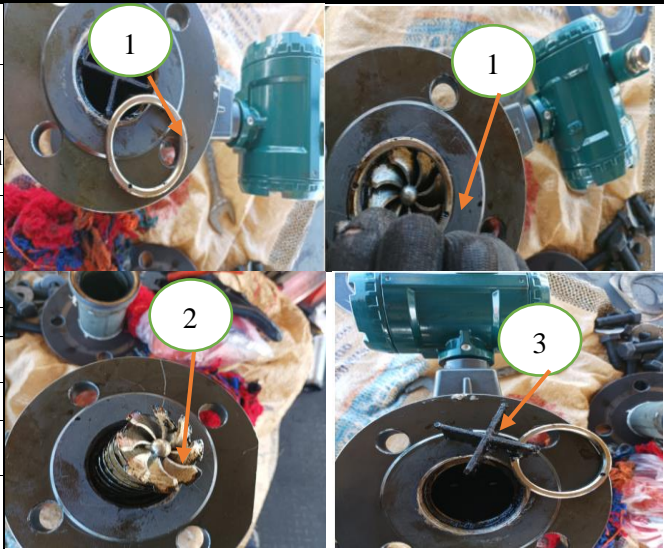


Página 1 de 8		HOJA DE INSTRUCCIONES DE TAREA			Departamento / Área		Generación de gas pobre			
		Tarea: 1	Descripción de la tarea: Desmontaje de medidor de flujo de la línea de operación			Fecha de Realización	15/01/2023	Realizada por:	Nelson Jonatan Velastegui	
Descripción del equipo/No.		Ubicación		Símbolo de operación	 Seguridad  Critico  Secuencia mandatoria en los pasos  Calidad  Secuencia mandatoria de pasos  Medio Ambiente	Tiempo estándar				
Medidor de flujo de gas pobre.		Espoch Facultad de Mecánica				10				
P	Sim.	No	Descripción de Pasos	Detalle del Paso	Diagramas: (Herramientas, Partes Especiales, EPP Especiales, Layouts, etc.)					
		1	Identificar la ubicación del equipo a ser intervenido.	Identificar el área de medición de gas pobre						
		2	Realizar la apertura de la compuerta de caja y desconectar la alimentación eléctrica	Utilizar la llave de triangulo, verificar que se encuentre desconectadas las líneas de alimentación eléctrica.						
		3	Aflojar y retirar los universales los laterales que sujetan al equipo.	Utilizar las llaves de tubo de 4" y 2".						
		4	Aflojar y retiras la conexión de tubería de lado izquierdo del medidor de flujo.	Utilizando la llave de tubo de 2".						
		5	Retirar el equipo del gabinete y ubicarlo en un lugar más adecuado para su limpieza.	Trasportar con extrema precaución para evitar daños en el equipo.						
<b>Bloque de Firmas</b>					<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción del cambio</b>			
<b>Turno</b>		<b>Revisa</b>	<b>Aprueba</b>							
1	Firma	Ing. Ángel Jácome	Ing. Marco Ordoñez							
	Fecha	18/01/2023	19/01/2023							
2	Firma									
	Fecha									

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

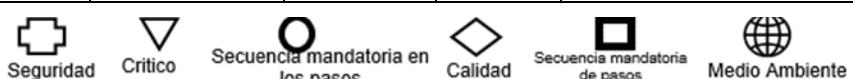

Página 2 de 8	<b>HOJA DE INSTRUCCIONES DE TAREA</b>				<b>Departamento / Área</b>		Generación de gas pobre			
	<b>Tarea: 2</b>		<b>Descripción de la tarea:</b> Desmontaje de bridas laterales del equipo medidor de flujo			<b>Fecha de Realización</b>	15/01/2023	<b>Realizada por:</b>	Nelson Jonatan Velastegui	
	<b>Descripción del equipo/No.</b>		<b>Ubicación</b>		<b>Símbolo de operación</b>	 Seguridad  Critico  Secuencia mandatoria en los pasos  Calidad  Secuencia mandatoria de pasos  Medio Ambiente	<b>Tiempo estándar</b>			
	Medidor de flujo de gas pobre.		Espoch Facultad de Mecánica							10
<b>P</b>	<b>Sim.</b>	<b>No</b>	<b>Descripción de Pasos</b>		<b>Detalle del Paso</b>		<b>Diagramas: (Herramientas, Partes Especiales, EPP Especiales, Layouts, etc.)</b>			
		1	Aflojar los pernos de anclaje de bridas		Utilizar dos llaves 24mm.					
		2	Retirar los pernos de anclaje de las bridas.		Destornillar los pernos quitar tuercas y arandelas.					
		3	Retirar las bridas y empaques de las partes laterales del equipo.		Remover los empaques de papel victoria utilizando una espátula.					
										
<b>Bloque de Firmas</b>						<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción del cambio</b>		
<b>Turno</b>		<b>Revisa</b>		<b>Aprueba</b>						
1	Firma	Ing. Ángel Jácome		Ing. Marco Ordoñez						
	Fecha	18/01/2023		19/01/2023						
2	Firma									
	Fecha									

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.








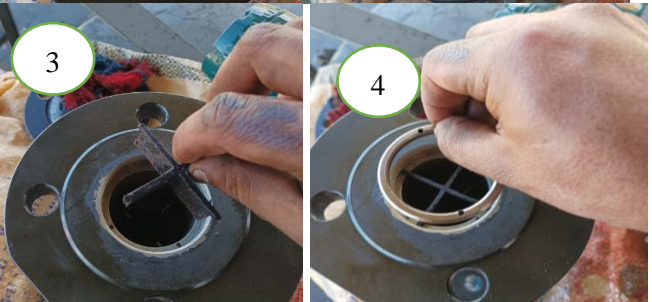


Página 3 de 8		HOJA DE INSTRUCCIONES DE TAREA			Departamento / Área		Generación de gas pobre				
		Tarea: 3	Descripción de la tarea: Desmontaje de elementos interiores de medidor de flujo			Fecha de Realización	15/01/2023	Realizada por:	Nelson Jonatan Velastegui		
Descripción del equipo/No.		Ubicación		Símbolo de operación	 Seguridad	 Critico	 Secuencia mandatoria en los pasos	 Calidad	 Secuencia mandatoria de pasos	 Medio Ambiente	Tiempo estándar
Medidor de flujo de gas pobre.		Espoch Facultad de Mecánica									10
P	Sim.	No	Descripción de Pasos		Detalle del Paso		Diagramas: (Herramientas, Partes Especiales, EPP Especiales, Layouts, etc.)				
		1	Localizar y aflojar las bridas de sujeción de los lados exteriores del equipo.		Utilizando un alicate para retenedores.						
	○	2	Retirar el espiral generador de Vortex		Retirar utilizando una pinza.						
	+	3	Retirar elementó eliminador de Vortex.		Retirar utilizando un poco de presión sin causar daños al elemento.						
<b>Bloque de Firmas</b>							Fecha	Nombre	Descripción del cambio		
Turno		Revisa	Aprueba								
1	Firma	Ing. Ángel Jácome	Ing. Marco Ordoñez								
	Fecha	18/01/2023	19/01/2023								
2	Firma										
	Fecha										

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.



Página 5 de 8		HOJA DE INSTRUCCIONES DE TAREA			Departamento / Área		Generación de gas pobre				
		Tarea: 5	Descripción de la tarea: Realizar la limpieza de bridas, tuberías, retenedores, generador de vórtice del equipo medidor de flujo			Fecha de Realización	15/01/2023	Realizada por:	Nelson Jonatan Velastegui		
Descripción del equipo/No.		Ubicación		Símbolo de operación							Tiempo estándar
Medidor de flujo de gas pobre.		Espoch Facultad de Mecánica			Seguridad	Critico	Secuencia mandatoria en los pasos	Calidad	Secuencia mandatoria de pasos	Medio Ambiente	10
P	Sim.	No	Descripción de Pasos		Detalle del Paso		Diagramas: (Herramientas, Partes Especiales, EPP Especiales, Layouts, etc.)				
		1	Rociar las bridas con alcohol industrial		Retirar la suciedad con un guipé.						
	○	2	Rociar el generador de vórtice con alcohol industrial.		Retirar la suciedad con un guipé						
	○	3	Rociar retenedores con alcohol industrial.		Retirar la suciedad con un guipé						
	○	4	Rociar el elemento eliminador de vórtice con alcohol industrial.		Retirar la suciedad con un guipé.						
	○	5	Rociar el interior de las tuberías.		Retirar la suciedad con un guipé						
Bloque de Firmas							Fecha	Nombre	Descripción del cambio		
Turno		Revisa		Aprueba							
1	Firma	Ing. Ángel Jácome		Ing. Marco Ordoñez							
	Fecha	18/01/2023		19/01/2023							
2	Firma										
	Fecha										

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

Página 6 de 8	<b>HOJA DE INSTRUCCIONES DE TAREA</b>				<b>Departamento / Área</b>		Generación de gas pobre					
	<b>Tarea: 6</b>		<b>Descripción de la tarea:</b> Montaje de elementos interiores de medidor de flujo			<b>Fecha de Realización</b>	15/01/2023	<b>Realizada por:</b>	Nelson Jonatan Velastegui			
	<b>Descripción del equipo/No.</b>		<b>Ubicación</b>		<b>Símbolo de operación</b>	 Seguridad	 Critico	 Secuencia mandatoria en los pasos	 Calidad	 Secuencia mandatoria de pasos	 Medio Ambiente	<b>Tiempo estándar</b>
	Medidor de flujo de gas pobre.		Epoch Facultad de Mecánica			10						
<b>P</b>	<b>Sim.</b>	<b>No</b>	<b>Descripción de Pasos</b>		<b>Detalle del Paso</b>		<b>Diagramas: (Herramientas, Partes Especiales, EPP Especiales, Layouts, etc.)</b>					
		1	Colocar el espiral de generación de vórtice en el extremo izquierdo.		Centrar bien evitando daños en el elemento		 					
		2	Colocar la brida de sujeción y ajustamos hasta que este quede fijo		Utilizar el alicate para manipulación de bridas							
		3	Colocar el elemento para la disipación de vórtice el extremo derecho del medidor de flujo		Ubicar en la misma posición que fue retirado.							
		4	Ubicar en posición la brida de sujeción de este elemento y ajustamos utilizando el alicate.		Utilizar el alicate para manipulación de bridas							
<b>Bloque de Firmas</b>					<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción del cambio</b>					
<b>Turno</b>		<b>Revisa</b>		<b>Aprueba</b>								
1	Firma	Ing. Ángel Jácome		Ing. Marco Ordoñez								
	Fecha	18/01/2023		19/01/2023								
2	Firma											
	Fecha											

Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.

Página 7 de 8	<b>HOJA DE INSTRUCCIONES DE TAREA</b>				<b>Departamento / Área</b>		Generación de gas pobre						
	<b>Tarea: 7</b>		<b>Descripción de la tarea:</b> Realizar el montaje de las bridas del equipo medidor de flujo			<b>Fecha de Realización</b>		15/01/2023		<b>Realizada por:</b>		Nelson Jonatan Velastegui	
	<b>Descripción del equipo/No.</b>		<b>Ubicación</b>		<b>Símbolo de operación</b>	☒	▽	○	◇	◻	🌐	<b>Tiempo estándar</b>	
	Medidor de flujo de gas pobre.		Espoch Facultad de Mecánica			Seguridad	Crítico	Secuencia mandatoria en los pasos	Calidad	Secuencia mandatoria de pasos	Medio Ambiente	10	
<b>P</b>	<b>Sim.</b>	<b>No</b>	<b>Descripción de Pasos</b>			<b>Detalle del Paso</b>			<b>Diagramas: (Herramientas, Partes Especiales, EPP Especiales, Layouts, etc.)</b>				
		1	Colocar los empaques de papel victoria en los extremos del equipo.			Deben estar bien centrados para que no produzcan obstrucciones en la tubería.							
	○	2	Ubicar las bridas en el lugar que corresponde a cada lado del equipo medidor de flujo.			Verificar que estén bien centradas.							
	○	3	Colocar los pernos M16 con su rodela y tuerca respectivamente.			Ajustar hasta que estén bien sujetas							
	○	4	Ajustar los pernos M16			Utilizar 2 llaves 24mm.							
<b>Bloque de Firmas</b>						<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción del cambio</b>					
<b>Turno</b>		<b>Revisa</b>		<b>Aprueba</b>									
1	Firma	Ing. Ángel Jácome		Ing. Marco Ordoñez									
	Fecha	18/01/2023		19/01/2023									
2	Firma												
	Fecha												

**Realizado por:** Velastegui Nelson, 2023.

Página 8 de 8		HOJA DE INSTRUCCIONES DE TAREA			Departamento / Área		Generación de gas pobre				
		Tarea: 8	Descripción de la tarea: Realizar el montaje del equipo en las líneas de funcionamiento			Fecha de Realización	15/01/2023	Realizada por:	Nelson Jonatan Velastegui		
Descripción del equipo/No.		Ubicación		Símbolo de operación	Seguridad	Critico	Secuencia mandatoria en los pasos	Calidad	Secuencia mandatoria de pasos	Medio Ambiente	Tiempo estándar
Medidor de flujo de gas pobre.		Espoch Facultad de Mecánica			Seguridad          Critico          Secuencia mandatoria en los pasos          Calidad          Secuencia mandatoria de pasos          Medio Ambiente						10
P	Sim.	No	Descripción de Pasos		Detalle del Paso		Diagramas: (Herramientas, Partes Especiales, EPP Especiales, Layouts, etc.)				
		1	Colocar el equipo en el gabinete y posicionarlo bien para su conexión.		Tratar el equipo con cuidado						
		2	Enroscar la tubería del lado derecho del equipo		Ajustar con la llave de tubo de 4"						
		3	Enroscar el universal del izquierdo del equipo.		Ajustar con la llave de tubo de 4"						
		4	Enroscar el universal del derecho del equipo		Utilizando la llave de tubo de 2".						
		5	Realizar un reajuste de las uniones antes mencionadas.		Utilizar las llaves de tubo de 4" y 2"						
		6	Conectar la alimentación eléctrica del medidor de flujo		Revisar que la electricidad del sistema esté desconectada						
<b>Bloque de Firmas</b>							Fecha	Nombre	Descripción del cambio		
Turno		Revisa		Aprueba							
1	Firma	Ing. Ángel Jácome		Ing. Marco Ordoñez							
	Fecha	18/01/2023		19/01/2023							
2	Firma										
	Fecha										

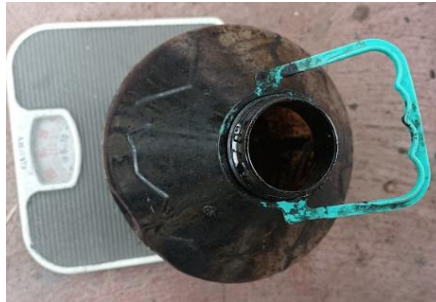
Realizado por: Velastegui Nelson, 2023.



**ANEXO G: ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE GAS POBRE.**

## ANEXO H: CÁLCULO DE DENSIDAD DEL ALQUITRÁN

### Primera gasificación:



Se midió la cantidad de alquitrán obteniendo 1.8 litros

Se pesó el fluido obteniendo 3.8 kg

$$\rho = m/v$$

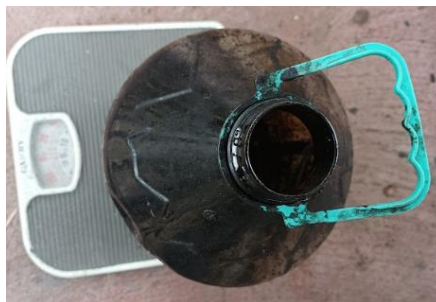
Dónde:  $\rho$  = densidad,  $m$  = masa= 3.8 kg,  $v$  = volumen = 1.8 lit.

$$v = 1.8 \text{ lit.} \cdot \frac{1000 \text{ m}^3}{1 \text{ lit}} = 0.0018 \text{ m}^3$$

$$\rho = m/v = 3.8 \text{ kg} / 0.0018 \text{ m}^3 = 2111.11 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 2111.11 \text{ kg/m}^3$$

### Segunda gasificación:



Se midió la cantidad de alquitrán obteniendo 1.7 litros

Se pesó el fluido obteniendo 3.9 kg

$$\rho = m/v$$

Dónde:  $\rho$  = densidad,  $m$  = masa= 3.9 kg,  $v$  = volumen = 1.7 lit.

$$v = 1.7 \text{ lit.} \cdot \frac{1000 \text{ m}^3}{1 \text{ lit}} = 0.0017 \text{ m}^3$$

$$\rho = m/v = 3.9 \text{ kg} / 0.0017 \text{ m}^3 = 2294.11 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 2294.11 \text{ kg/m}^3$$

### Tercera gasificación:



Se midió la cantidad de alquitrán obteniendo 1.6 litros

Se pesó el fluido obteniendo 3.7 kg

$$\rho = m/v$$

Dónde:  $\rho$  = densidad,  $m$  = masa= 3.7 kg,  $v$  = volumen = 1.6 lit.

$$v = 1.6 \text{ lit.} \cdot \frac{1000 \text{ m}^3}{1 \text{ lit}} = 0.0016 \text{ m}^3$$

$$\rho = m/v = 3.6 \text{ kg} / 0.0016 \text{ m}^3 = 2250 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 2250 \text{ kg/m}^3$$

### Cuarta gasificación:



Se midió la cantidad de alquitrán obteniendo 1.9 litros

Se pesó el fluido obteniendo 3.9 kg

$$\rho = m/v$$

Dónde:  $\rho$  = densidad,  $m$  = masa= 3.9 kg,  $v$  = volumen = 1.9 lit.

$$v = 1.9 \text{ lit.} \cdot \frac{1000 \text{ m}^3}{1 \text{ lit}} = 0.0019 \text{ m}^3$$

$$\rho = m/v = 3.9\text{kg}/0.0019\text{m}^3 = 2052.63\text{kg}/\text{m}^3$$

$$\rho = 2052.63\text{kg}/\text{m}^3$$