



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“ANÁLISIS TÉRMICO DEL GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT
DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

JONATHAN FRANCISCO BARBA PILATAXI

CÉSAR LIROY CABASCANGO ROMERO

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“ANÁLISIS TÉRMICO DEL GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT
DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES: JONATHAN FRANCISCO BARBA PILATAXI

CÉSAR LIROY CABASCANGO ROMERO

DIRECTOR: ING. EDWIN ÁNGEL JÁCOME DOMÍNGUEZ

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Jonathan Francisco Barba Pilataxi & César Liroy Cabascango Romero

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

Nosotros, Jonathan Francisco Barba Pilataxi y César Liroy Cabascango Romero, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

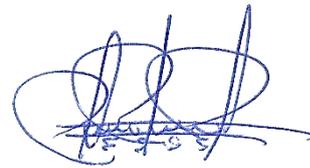
Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 28 de noviembre de 2023



Jonathan Francisco Barba Pilataxi

CI: 060551156-7

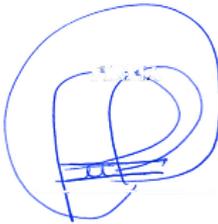


César Liroy Cabascango Romero

CI:100515523-7

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, “**ANÁLISIS TÉRMICO DEL GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT DE LA FACULTA DE MECÁNICA**”, realizado por los señores: **JONATHAN FRANCISCO BARBA PILATAXI Y CÉSAR LIROY CABASCANGO ROMERO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Marco Homero Almendariz Puente PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-11-28
Ing. Edwin Ángel Jácome Domínguez DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-11-28
Ing. Marco Antonio Ordóñez Viñán ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-11-28

DEDICATORIA

Primeramente, agradecerle a Dios por brindarme las fuerzas en este largo camino, por brindarme su guía, por cada aventura que me ha permitido llegar a este momento. El presente proyecto va dedicado a mis padres Luis Alfredo Barba Morales y Yolanda Susana Pilataxi Tiumaico, por su apoyo incondicional durante todo este tiempo, por los valores que me brindan, por la inspiración en cada palabra sin las cuales no hubiese logrado en mi formación profesional a Jenny que es un pilar fundamental en la consagración de este logro.

Jonathan Barba

Dedico principalmente este trabajo a Dios, mi salvador y creador que me ha bendecido mandando con un ángel tan hermoso a la cual llamo mamá, Gladys Cumandá Romero Alba sin ti nada de esto sería posible, gracias por dejar tus sueños a un lado para que yo cumpla los míos. Te amo mamita mía, gracias a mi padre Julio César Cabascango Álvarez también este sueño es para ti, a mis hermanos Cristhian “Valentía”, María “Carácter” y Antony “Honor” son mi ejemplo para seguir, y no puedo dejar de lado al grupo de los Flys y amigas, Toa Diaz por brindarme apoyo sin importar altas o bajas de la vida, Paola Mediavilla por estar ahí en momentos oscuros de mi vida, dando todo sin pedir nada a cambio, por eso y más.

Esto se hizo posible gracias a ustedes. Gracias Totales.

César C. Romero

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradeciendo a la Carrera de Mantenimiento Industrial por impartirme los conocimientos en cada etapa profesional con total excelencia académica y sobre todo humana.

Jonathan Barba

Agradezco a cada Docente de la Escuela de Mantenimiento Industrial por compartir sus conocimientos a lo largo de mis estudios. Y de manera especial a los Ingenieros Edwin Ángel Jácome Domínguez y Marco Antonio Ordóñez Viñán por su colaboración y tiempo empleado en la revisión del presente trabajo.

Cesar C. Romero

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	3

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Gasificación	4
2.2. Proceso de la gasificación	5
2.2.1. <i>Secado</i>	5
2.2.2. <i>Pirólisis</i>	5
2.2.3. <i>Oxidación</i>	5
2.2.4. <i>Reducción</i>	6
2.3. Especificaciones técnicas	6
2.3.1. Tipos de gasificadores	6
2.3.1.1. <i>Gasificadores de flujo de arrastre</i>	6
2.3.1.2. <i>Gasificadores de lecho fijo</i>	7
2.3.1.3. <i>Downdraft (corriente paralela)</i>	7
2.3.1.4. <i>Updraft (contracorriente)</i>	8
2.3.1.5. <i>Crossdraft (corriente cruzada)</i>	8
2.3.2. Gasificadores de lecho fluidizado	8

2.4.	Elección del tipo de gasificador	9
2.5.	Características del gasificador downdraft	9
2.6.	Layout gasificador downdraft	10
2.6.1.	<i>Cuerpo principal</i>	11
2.6.2.	<i>Ciclón</i>	11
2.6.3.	<i>Enfriador</i>	12
2.6.4.	<i>Filtro</i>	13
2.7.	Gas producido de gasificación de biomasa y sus constituyentes	14
2.8.	Biomasa	15
2.9.	Tipos de biocombustibles	15
2.9.1.	<i>Biocombustibles sólidos</i>	16
2.9.2.	<i>Biocombustibles líquidos</i>	16
2.9.3.	<i>Biocombustibles gaseosos</i>	17
2.9.4.	<i>Gas de gasógeno</i>	17
2.10.	Potencial de biomasa	17
2.11.	Uso de la energía de biomasa en el Ecuador	18
2.11.1.	<i>Sector industrial</i>	18
2.11.2.	<i>Sector residencial</i>	19
2.12.	Termocuplas	19
2.12.1.	<i>Termocupla tipo K</i>	20
2.13.	Termopozos	20
2.14.	Cromatografía de gases	21

CAPÍTULO III

3.	ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT	22
3.1.	Selección del combustible	22
3.2.	Termocuplas con cabezal	22
3.2.1.	<i>Modelo: K</i>	22
3.3.	Cable tipo k	24
3.4.	Controlador de temperatura	24
3.5.	Plancha de acero	25
3.6.	Experimentación	25
3.6.1.	<i>Datos primera gasificación</i>	30
3.6.2.	<i>Datos segunda gasificación</i>	31
3.6.3.	<i>Datos tercera gasificación</i>	33

3.7.	Balance de masa y energía en la gasificación	35
3.7.1.	<i>Gasificación 1</i>	36
3.7.2.	<i>Gasificación 2</i>	36
3.7.3.	<i>Gasificación 3</i>	36
3.8.	Análisis térmico.	37
3.8.1.	<i>Flujo másico</i>	37
3.8.2.	<i>Balance de energía.</i>	37
3.8.2.1.	<i>Balance de energía del gasificador.</i>	37
3.8.3.	<i>Cuantificación del volumen teórico de gas de síntesis.</i>	38
3.8.4.	<i>Volumen del aire teórico (Vao).</i>	39
3.8.5.	<i>Volumen teórico de nitrógeno (VN2o).</i>	40
3.8.6.	<i>Volumen de los gases triatómicos (VRO2o).</i>	40
3.8.7.	<i>Volumen teórico del vapor de agua (VH2Oo).</i>	40
3.8.8.	<i>Volumen de los gases producidos en el gasificador (Vg).</i>	40
3.8.9.	<i>Flujo volumétrico del gas pobre (Vgp).</i>	40

CAPÍTULO IV

4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	42
4.1.	Cálculos del poder calorífico del syngas de las 3 gasificaciones	43
4.1.1.	<i>Cálculo del poder calorífico del syngas obtenido de la primera gasificación</i>	43
4.2.	Cálculos del poder calorífico del syngas de las 3 gasificaciones	45
4.2.1.	<i>Cálculo del poder calorífico del syngas obtenido de la primera gasificación</i>	45
4.3.	Cálculos del poder calorífico del syngas de las 3 gasificaciones	47
4.3.1.	<i>Cálculo del poder calorífico del syngas obtenido de la primera gasificación</i>	47
4.4.	Interpretación de los componentes del syngas	48

CAPITULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1.	Conclusiones	51
5.2.	Recomendaciones	52

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1:	Características esenciales de cada tipo de gasificador.....	9
Tabla 2-2:	Características del gasificador Downdraft de la EPOCH.	9
Tabla 2-3:	Distribución por tamaños del polvo del gas Pobre.	13
Tabla 2-4:	Cantidades tolerables de contaminantes del gas pobre.....	14
Tabla 2-5:	Clasificación de los biocombustibles en función de su origen.	16
Tabla 2-6:	Potencial biomásico en Ecuador.....	18
Tabla 2-7:	Características técnicas.....	20
Tabla 3-1:	Guía de temperaturas máximas para termopares de aislamiento.....	23
Tabla 3-2:	Controlador de temperatura REX-C700.....	24
Tabla 3-3:	Especificaciones técnicas.	25
Tabla 3-4:	Composición de algunos tipos de biomasas en base seca.....	27
Tabla 3-5:	Valores del coeficiente de exceso de aire por tipo de combustible.	27
Tabla 3-6:	Datos de arranque de la primera gasificación.....	30
Tabla 3-7:	Datos primera gasificación	31
Tabla 3-8:	Datos de arranque de la segunda gasificación	31
Tabla 3-9:	Datos segunda gasificación	32
Tabla 3-10:	Datos de arranque de la segunda gasificación	33
Tabla 3-11:	Datos tercera gasificación.....	34
Tabla 3-12:	Balace de energía del gasificador.....	38
Tabla 3-13:	Cálculo del flujo másico del gas pobre de la madera eucalipto.....	39
Tabla 4-1:	Resultado de la primera gasificación.....	42
Tabla 4-2:	Resultado de la segunda gasificación	44
Tabla 4-3:	Resultado de la tercera gasificación	46
Tabla 4-4:	Hidrógeno.....	48
Tabla 4-5:	Oxígeno	48
Tabla 4-6:	Nitrógeno.....	48
Tabla 4-7:	Monóxido de carbono.....	49
Tabla 4-8:	Metano.....	49
Tabla 4-9:	Dióxido de carbono	49
Tabla 4-10:	Etano.....	50
Tabla 4-11:	Agua	50

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1:	Sinter gas que alimenta un motor de combustión interna.	4
Ilustración 2-2:	Clasificación de gasificadores.....	6
Ilustración 2-3:	Layout gasificador downdraft ESPOCH.....	10
Ilustración 2-4:	Representación gráfica del gasificador downdraft ESPOCH.....	10
Ilustración 2-5:	Esquema cuerpo principal del gasificador.	11
Ilustración 2-6:	Esquema ciclón.....	11
Ilustración 2-7:	Temperaturas de fluidos en el enfriador de gas y ventilador de aire	12
Ilustración 2-8:	Configuración de filtro de mangas.....	13
Ilustración 2-9:	Gasificador downdraft ESPOCH.....	14
Ilustración 2-10:	Representación esquemática de un cromatógrafo de gases.	21
Ilustración 3-1:	Termopozo en acero inoxidable 316, conexión roscada al elemento sensor. 23	
Ilustración 3-2:	Cable tipo k.....	24
Ilustración 3-3:	Controlador de temperatura REX-C700	24
Ilustración 3-4:	Placa de acero.	25
Ilustración 3-5:	Tablero de control del gasificador downdraft.....	25
Ilustración 3-6:	Troceado de eucalipto.	26
Ilustración 3-7:	Quema de biomasa.....	26
Ilustración 3-8:	Bolsa tedlar para muestreo de gas pobre.....	29
Ilustración 3-9:	Encendido y arranque del gasificador.....	30
Ilustración 3-10:	Variación de la temperatura para la obtención de gas.	31
Ilustración 3-11:	Encendido y arranque del gasificador.....	32
Ilustración 3-12:	Variación de la temperatura para la obtención de gas.	33
Ilustración 3-13:	Encendido y arranque del gasificador.....	33
Ilustración 3-14:	Variación de la temperatura para la obtención de gas.	34
Ilustración 3-15:	Diagrama de balance de masa en el gasificador.	35

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: INSTALACIÓN DE PLACAS PARA NUEVAS TERMOCUPLAS.

ANEXO B: INSTALACIÓN DEL NUEVO CABLE TIPO K.

ANEXO C: INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA.

ANEXO D: CONEXIÓN DEL CABLE TIPO K EL CONTROLADOR DE TEMPERATURA.

ANEXO E: PRUEBA DE LOS CONTROLADORES Y TERMOCUPLAS

ANEXO F: DATOS CROMATO-LÓGICOS DE LA PRIMERA GASIFICACIÓN.

ANEXO G: DATOS CROMATO-LÓGICOS DE LA SEGUNDA GASIFICACIÓN.

ANEXO H: DATOS CROMATO-LÓGICOS DE LA TERCERA GASIFICACIÓN.

ANEXO I: TABLA DE GAS IDEAL

RESUMEN

El gasificador Downdraft de la Facultad de Mecánica no contaba con instrumentación que permitiera evaluar los parámetros termodinámicos en varias etapas en la producción de gas. Por ello, se propuso implementar un sistema para recopilar datos térmicos en tiempo real con el fin de analizar los parámetros de funcionamiento del gasificador downdraft durante la producción de gas pobre que se realizaba durante cada etapa. El enfoque se centró en evaluar el rendimiento y la eficiencia del proceso de gasificación mediante la quema de biomasa de eucalipto como viruta y troceados de esta. El estudio examinó las temperaturas alcanzadas en las diferentes zonas del gasificador, como la zona de carga, la de pirólisis y la de gasificación, para comprender mejor los fenómenos térmicos y optimizar el diseño del sistema. Además, se analizaron variables clave como la velocidad del flujo de aire, la composición del gas de síntesis y la calidad del carbón producido. El objetivo principal del análisis térmico fue mejorar la eficiencia energética y la producción de gas combustible, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la búsqueda de fuentes de energía más limpias y renovables. Este enfoque en el gasificador Downdraft en la Facultad de Mecánica destacó la importancia de la investigación en tecnologías avanzadas para la conversión de biomasa en energía. Los resultados obtenidos tanto como el poder calorífico superior e inferior en la primera gasificación fueron de PCS:1139,97 KJ/m³; PCI:1144,95 KJ/m³, segunda gasificación: PCS:1197,19 KJ/m³; PCI:1099,12 KJ/m³ y tercera gasificación: PCS:1160,19 KJ/m³; PCI:1065,07 KJ/m³. Se concluye que se obtuvo un mejor balance másico y energético en la primera gasificación que fue un compuesto mixto de viruta y troceados de eucalipto ya que no se realizó una gran pérdida de energía en el transcurso del proceso y la masa introducida fue constante.

Palabras clave: <ANÁLISIS TÉRMICO> <GASIFICADOR DOWNDRAFT> <BALANCE ENERGÉTICO> <BALANCE MÁSCO> <CROMATOGRAFÍA> <GASIFICACIÓN> <SYNGAS>.

2288-DBRA-UPT-2023



SUMMARY

The Downdraft gasifier of Mechanics Faculty did not have instrumentation to evaluate thermodynamic parameters at various stages of gas production. Therefore, it was proposed to implement a system to collect thermal data in real-time to analyze the operating parameters of the downdraft gasifier during the production of lean gas that was carried out during each stage. The focus was on evaluating the performance and efficiency of the gasification process by burning eucalyptus biomass as chips and pieces of it. The study examined the temperatures reached in the different zones of the gasifier, such as the loading zone, the pyrolysis zone, and the gasification zone, to understand thermal phenomena better and optimize the system design. Key variables such as airflow velocity, syngas composition, and coal quality were also analyzed. The main objective of the thermal analysis was to improve energy efficiency and fuel gas production, contributing to sustainable development and the search for cleaner and renewable energy sources. This focus on the Downdraft gasifier in the Faculty of Mechanics highlighted the importance of research into advanced technologies for converting biomass to energy. The results obtained, as well as the upper and lower heating value in the first gasification, were PCS:1139.97 KJ/m³; PCI:1144.95 KJ/m³, second gasification: PCS:1197.19 KJ/m³; PCI:1099.12 KJ/m³ and third gasification: PCS:1160.19 KJ/m³; PCI:1065.07 KJ/m³. It is concluded that a better mass and energy balance was obtained in the first gasification, a mixed compound of eucalyptus chips and pieces, since there was no significant loss of energy during the process and the mass introduced was constant.

Keywords: <THERMAL ANALYSIS> <DOWNDRAFT GASIFIER> <ENERGY BALANCE> <MASS BALANCE> <CHROMATOGRAPHY> <GASIFICATION> <SYNGAS>.



Lic. Sandra Leticia Guijarro Paguay

C.I.: 0603366113

INTRODUCCIÓN

Se estima que el 80% del consumo energético mundial está basado en fuentes fósiles (Thirugnanasambandam et al. 2010, p. 313). El suministro limitado de dichos recursos restringe el desarrollo sostenible y acarrea serios problemas ambientales. Con el fin de superar estos desafíos, existen numerosas fuentes renovables de energías ambientalmente amigables y económicamente viables, como la energía solar y la de biomasa, que han venido despertando un interés creciente (Bai et al. 2015, p. 2).

La biomasa ha sido una de las principales fuentes de energía para la humanidad desde los albores de la civilización, y aunque su importancia disminuyó después de la expansión del petróleo y el carbón a fines del siglo XIX, en los últimos años ha habido un renovado interés en la energía de biomasa ocasionado por los problemas ambientales derivados del uso de los combustibles fósiles, las potencialidades de la biomasa como fuente de energía y los beneficios que ella ofrece desde el punto de vista medioambiental (Martillo et al. 2019, p. 455).

A nivel internacional, en el marco del paradigma del desarrollo sustentable, resulta vital la incorporación de fuentes energéticas renovables. En el documento final de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (RIO+20) realizada en Julio de 2012, en su inciso 128 se enfatiza la necesidad de aumentar la participación de fuentes de energía renovable en la matriz energética, junto con la adopción de medidas de planificación regional (Vicente et al. 2016, p. 152).

En ese sentido, la producción de biomasa en el Ecuador se hace indispensable debido al incremento de fuentes alternativas de energía, esta se dispone en abundancia y tiene mucho menor impacto al medio ambiente que los combustibles fósiles para cada uno de los agroecosistemas. La operación racional de las instalaciones de gasificación de biomasa contribuye también a la reducción de las emisiones contaminantes, costos de generación (Pico et al. 2019, p. 138).

En el estudio de los Gasificadores tipo Downdraft, la calidad del gas que produce el montaje depende no solo de las propiedades del flujo de gas, del agente gasificante utilizado, del tipo de biomasa y del diseño del reactor, sino también de los parámetros de operación (Sharma 2011, p. 421).

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

La gasificación es un proceso de oxidación de la biomasa a través de un proceso termoquímico el cual la descompone en un gas de síntesis (SYNGAS), este tiene unas propiedades térmicas que permiten su utilización como fuente de energía, específicamente su versatilidad da la opción de inyección a un motor de combustión para generación de energía eléctrica (Rodríguez y Plazas 2022, p. 5).

Los análisis paramétricos de la gasificación se desarrollan para evaluar las variables termodinámicas del gasificador fundamentalmente: consumo de biomasa, poder calorífico y flujo de gas generado. Los resultados de estos estudios dependen del tipo de gasificador, agente de gasificación, biomasa utilizada y parámetros de operación (Martillo et al. 2019, p. 455).

El gasificador tipo *Downdraft* de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH en el área de térmica consta de una serie de controladores térmicos que permiten evaluar parámetros de temperatura acorde a una diversa biomasa de proyectos anteriormente realizados, El problema se presenta debido a que día a día la tecnología tiene grandes logros que permiten evaluar de forma más precisa y con resultados en tiempo real de los factores temperatura por lo cual con la instalación de la instrumentación moderna y mediante exámenes se lograra identificar el punto de operación para definir protocolos operativos del gasificador.

Los estudios paramétricos de la gasificación se desarrollan por etapas para evaluar los parámetros termodinámicos del gasificador, por esto se plantea instalar un sistema de adquisición de datos de temperatura para determinar la temperatura en distintas etapas en la obtención de gas de síntesis a través de reacciones químicas de oxidación y reducción que tiene este proceso (Martillo et al. 2019, p. 455).

1.2. Justificación

Por medio del siguiente proyecto se determinará el rango de temperaturas que tomará durante las etapas de obtención de un gas (secado, pirólisis y gasificación), mediante la instalación de termocuplas con termo pozos a lo largo del proceso termodinámico.

En este estudio, la temperatura se convierte en el factor central para examinar cómo se comporta el gasificador. Este análisis permitirá definir las especificaciones técnicas del gasificador *Downdraft* al quemar desechos forestales, proporcionando así datos concretos sobre su rendimiento (Martillo et al. 2019, p. 455).

Para la ejecución del proyecto de integración se procederá a el análisis acerca de los térmicos de funcionamiento del gasificador tipo *Downdraft* el mismo que está ubicado en la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, con la adecuada instalación de las termocuplas con termopozos a lo largo del proceso de gasificación para monitorear y obtener una correcta adquisición de datos durante el proceso.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general

Analizar los parámetros termodinámicos del gasificador tipo *Downdraft* de la Facultad de Mecánica.

1.3.2. Objetivos específicos.

Establecer el estado del arte sobre el análisis térmico de gasificadores tipo *Downdraft*.

Definir las condiciones óptimas de operación del gasificador tipo *Downdraft* para obtener gas de síntesis de alta calidad.

Establecer el análisis termodinámico del gasificador tipo *Downdraft* de la Facultad de Mecánica, por medio de análisis químicos de los gases y sólidos que se genera en el proceso.

Obtener el balance másico y balance energético que se aprovecha en forma de gas combustible, así como la cantidad de energía que se pierde en forma de calor, mediante el análisis y la medición de la temperatura de gases de escape.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Gasificación.

En la gasificación de la biomasa es una ciencia de más de cien años de antigüedad. Hoy es observada como una alternativa a los combustibles convencionales. Gasificación es un proceso térmico en el cual combustibles sólidos tales como madera, residuos agrícolas y otros tipos de biomasa seca son convertidos en un gas combustible con el objeto de producir el llamado “Sinter gas” o también llamado “gas producido” que puede ser quemado en motores de combustión interna, turbinas o en equipos de producción de calor y potencia (Bailey 1977, p. 50).

El sistema de gasificación para generar calor y energía consta principalmente de tres componentes: un gasificador, un dispositivo para depurar el gas y un convertidor de energía, que típicamente puede ser un motor o una turbina. En este proceso, la mayor dificultad estriba en el filtrado del “sinter gas”, pues se requiere de equipos con capacidad para operar con gases a elevadas temperaturas, con partículas en suspensión de diferentes tipos y algunas veces altos flujos de masa.

En la siguiente figura se puede apreciar un sistema de gasificación que posee accesorios para el filtrado y lavado del gas que posteriormente es usado en un motor de combustión interna.

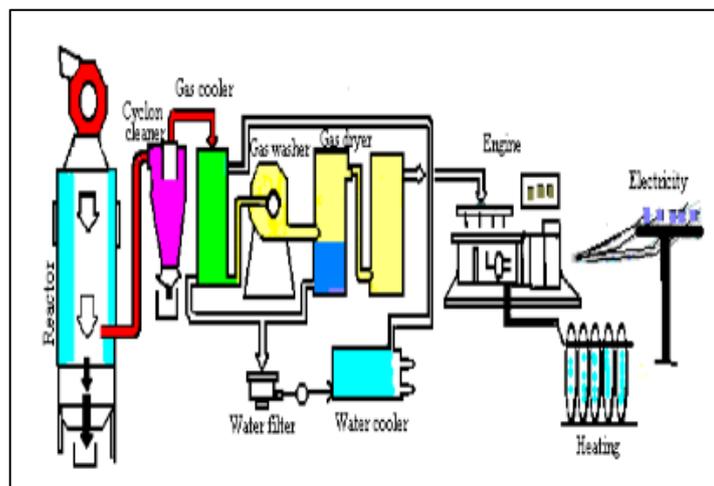


Ilustración 2-1: Sinter gas que alimenta un motor de combustión interna.

Fuente: (Estrada y Zapata 2004, p. 155).

Los principios fundamentales de la gasificación de la biomasa se dan a notar desde finales del siglo XVIII, pero las primeras aplicaciones comerciales se remontan a 1830. Hacia comienzos de 1850 un gran número de lámparas de alumbrado público en Londres ya funcionaban con gas producido de la gasificación de biomasa, este experimento constituyó en el comienzo definitivo de las investigaciones en esta área (Estrada y Zapata 2004, p. 155).

2.2. Proceso de la gasificación.

Es fundamental la gasificación es el desarrollo de conversión de la biomasa sólida en un gas combustible que contiene monóxido de carbono e hidrogeno primeramente por medio de un proceso termoquímico.

Este proceso se cumple en una cámara cerrada y sellada que opera un poco por debajo de la presión atmosférica. Este proceso se desarrolla en varias etapas como sigue (Jilles 1999, p. 2).

2.2.1. Secado.

En este procedimiento el volumen de agua contenida en la biomasa es retirado a una temperatura superior a los 100 °C (Jilles 1999, p. 2).

2.2.2. Pirólisis.

La biomasa sufre una descomposición térmica por la ausencia de oxígeno. A su vez la pirólisis se subdivide en lenta y rápida.

2.2.3. Oxidación

Se lo realiza entre temperaturas de 200 a 500 °C, el aire es introducido en este proceso. así como gases inertes son adicionados en este proceso.

En este proceso se destruyen las sustancias orgánicas mediante el calentamiento en un ambiente libre de oxígeno, dando como resultado de esta reacción, fracciones gaseosas, líquidas y sólidas. La pirólisis implica una serie intrincada de reacciones químicas, junto con procesos de transferencia de materia y calor. Se puede afirmar que la pirólisis se inicia aproximadamente a 200°C y se vuelve prácticamente completa alrededor de los 500°C. Aunque la pirólisis está en función del tiempo de residencia del residuo del reactor (Villacis 2016, p. 10).

2.2.4. Reducción

En esta zona se presentan numerosas reacciones químicas debido a las altas temperaturas.

2.3. Especificaciones técnicas

2.3.1. Tipos de gasificadores

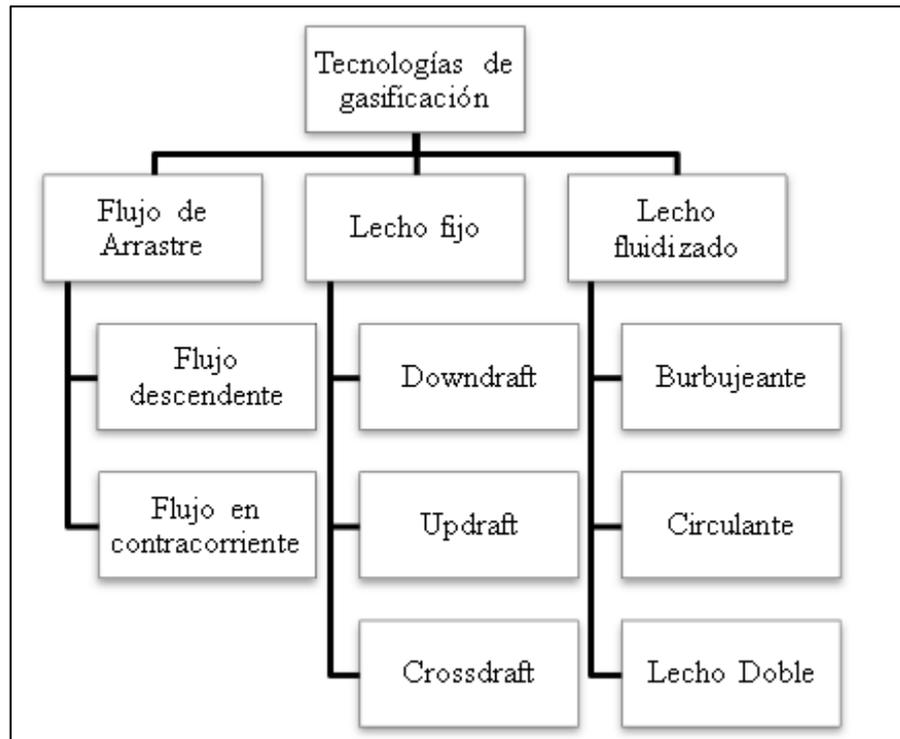


Ilustración 2-2: Clasificación de gasificadores.

Fuente: (Aristizábal y Valencia 2015, p. 5)

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

2.3.1.1. Gasificadores de flujo de arrastre

Un flujo conjunto de carbón finamente pulverizado con el agente oxidante es inyectado al reactor. El carbón rápidamente se calienta y reacciona con el agente oxidante. El tiempo de residencia de un gasificador de flujo de arrastre es del orden de segundos o decenas de segundos. Debido a tan corto tiempo de residencia, los gasificadores de flujo de arrastre deben operar a altas temperaturas para alcanzar una alta conversión de carbón. Consecuentemente, la mayoría de los gasificadores de este tipo utilizan oxígeno y operan arriba de la temperatura de escorificación del carbón (Bermudez y Bogotá 2008, p. 24).

2.3.1.2. *Gasificadores de lecho fijo*

Los gasificadores de lecho fijo (con alimentación por lotes) y semimóvil (con alimentación continua) cuentan con una región de reacción estacionaria generalmente sostenida por una estructura de rejilla. En estos sistemas, la biomasa se introduce desde la parte superior del reactor para crear una capa de partículas sólidas a través de la cual se inyecta el agente gasificante. Las partículas sólidas de biomasa se desplazan gradualmente hacia la parte inferior del reactor durante el proceso de descomposición, lo que le confiere el nombre de "lecho fijo" a este tipo de gasificador, a este tipo de gasificadores también se conoce como de lecho móvil porque el combustible se mueve lentamente hacia abajo en el reactor (Carrasco 2015, p. 51).

Dentro de los tipos de gasificadores de lecho fijo hay tres tipos y estos se clasifican obedeciendo la dirección del flujo entre los cuales son: *Downdraft* o de corriente paralela, *Updraft* o contracorriente y *Crossdraft* o también conocido como de corriente cruzada.

2.3.1.3. *Downdraft (corriente paralela).*

En esta tecnología, el agente oxidante (vapor, oxígeno y/o aire) fluye a través del combustible de alimentación en la misma dirección. El gas de síntesis abandona el gasificador a una alta temperatura y puesto que todo el alquitrán pasa por un lecho muy caliente de carbonizado mientras el gas de síntesis sale, los niveles de alquitranes se mantienen bastante bajos (Bermudez 2013, p. 25).

La biomasa pasa por las mismas etapas de la misma forma que lo haría en un *Updraft*, pero con la excepción que en este caso el agente oxidante no va en dirección contraria al paso de biomasa.

En este tipo de reactores se tiene que el agente oxidante entra al reactor no por debajo sino de forma horizontal en una zona conocida como garganta, en la cual se da la etapa de gasificación con temperaturas alrededor de los 1000 °C, y gracias a la forma de esta garganta se obtiene flujo de gas con tiro invertido.

De la manera anteriormente explicada tanto la biomasa como el gas producto tienen sentido descendente. La principal ventaja o beneficio de este tipo de gasificadores es el gas producto considerado relativamente limpio, con poco contenido de alquitrán, para ser empleado casi directo a motores.

Esta ventaja se obtiene debido a que el craqueo del tar continúa luego que los productos pasan de la zona de gasificación por el lecho de carbón (Alegría 2017, p. 15).

2.3.1.4. *Updraft (contracorriente).*

El gasificador “*Up Draft*” es esencialmente el mismo diseño que el “*Down Draft*”, excepto por el agente oxidante, que ahora fluye en la dirección opuesta al combustible de alimentación. El rendimiento de este tipo de gasificador es relativamente bajo.

El gas de síntesis abandona el gasificador a temperaturas que generalmente resultan en una necesidad intensiva de limpieza porque el proceso produce grandes cantidades de alquitrán (Bermudez 2013, p. 25).

2.3.1.5. *Crossdraft (corriente cruzada).*

El gasificador “*Up Draft*” es esencialmente el mismo diseño que el “*Down Draft*”, excepto por el agente oxidante, que ahora fluye en la dirección opuesta al combustible de alimentación. El rendimiento de este tipo de gasificador es relativamente bajo.

El gas de síntesis abandona el gasificador a temperaturas que generalmente resultan en una necesidad intensiva de limpieza porque el proceso produce grandes cantidades de alquitrán (Bermudez 2013, p. 25).

2.3.2. ***Gasificadores de lecho fluidizado.***

Un gasificador de lecho fluidizado se diferencia de uno de lecho fijo por la velocidad del gas agente de entrada al sistema.

La velocidad de entrada del agente fluidizante es importante ya que se requiere que el material inerte dentro del reactor y la biomasa que continuamente será suministrada mantengan cierto nivel o altura.

En un reactor de lecho fluidizado el agente fluidizante entra desde una zona más baja que la alimentación de la biomasa y el gas producto sale por la parte superior del mismo (Alegría 2017, p. 15).

Tabla 2-1: Características esenciales de cada tipo de gasificador.

Tipo de gasificador	Características	
	Capacidad máxima (t/h)	Temperatura de operación (°C)
Lecho fijo		
Downdraft	0.5	1000
Crossdraft	1	900
Updraft	10	1000
Lecho fluidizado		
Lecho f. doble	10	800
Lecho f. circulante	20	850
Lecho f. burbujeante	20	1000
Fujo de arraste	38	1200

Fuente: (Aristizábal y Valencia 2015, p. 5)

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

2.4. Elección del tipo de gasificador

produce la menor cantidad de alquitranes y es sencillo en cuanto al modo de operación. La gran totalidad de los gasificadores de pequeño rango u escala usados para la producción de electricidad son de tipo downdraft y existen varios casos en los que se usa esta categoría para proyectos de cooperación al desarrollo en electrificación rural.

El gas generado en los gasificadores downdraft suele estar con una composición aproximada de un 20% de H₂, 20% de CO y un pequeño porcentaje de CH₄, y gases no combustibles como CO₂ y N₂. El gas producido contiene más del 70% de la energía de la biomasa en aplicaciones energéticas.

2.5. Características del gasificador downdraft.

El gasificador downdraft de Facultad de Mecánica de la ESPOCH, muestra los siguientes datos técnicos.

Tabla 2-2: Características del gasificador Downdraft de la EPOCH.

Características	
Gasificador	Downdraft/lecho fijo
Combustible	Biomasa con humedad no \geq 25%
Capacidad de procesamiento	40 kg/h
Dimensiones de biomasa	Troceados de 10 cm o 12 cm
Agente gasificante	Aire
Sistema de tratamiento de gas producido	Ciclón, enfriador y filtro de gas

Fuente: (Orozco 2017a, p. 36)

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

2.6. Layout gasificador downdraft

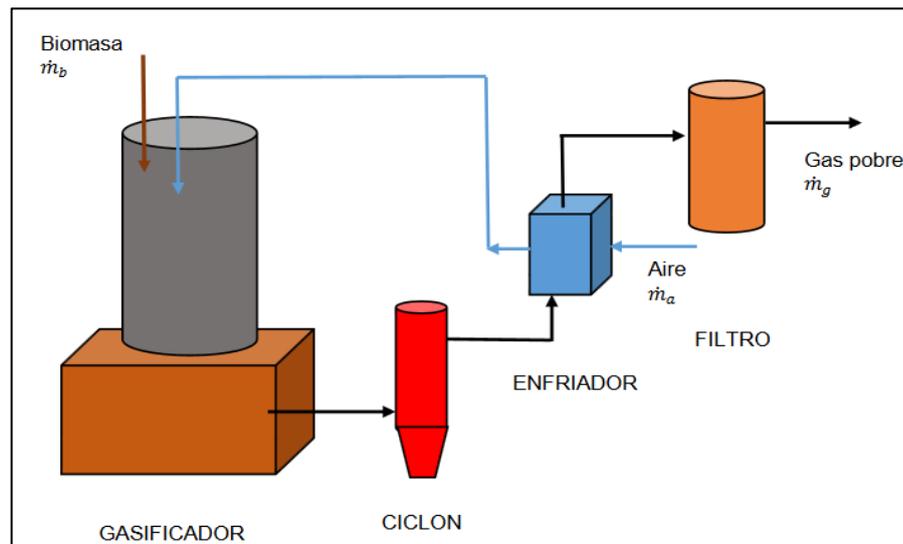


Ilustración 2-3: Layout gasificador downdraft ESPOCH

Fuente: (Orozco 2017a, p. 36)

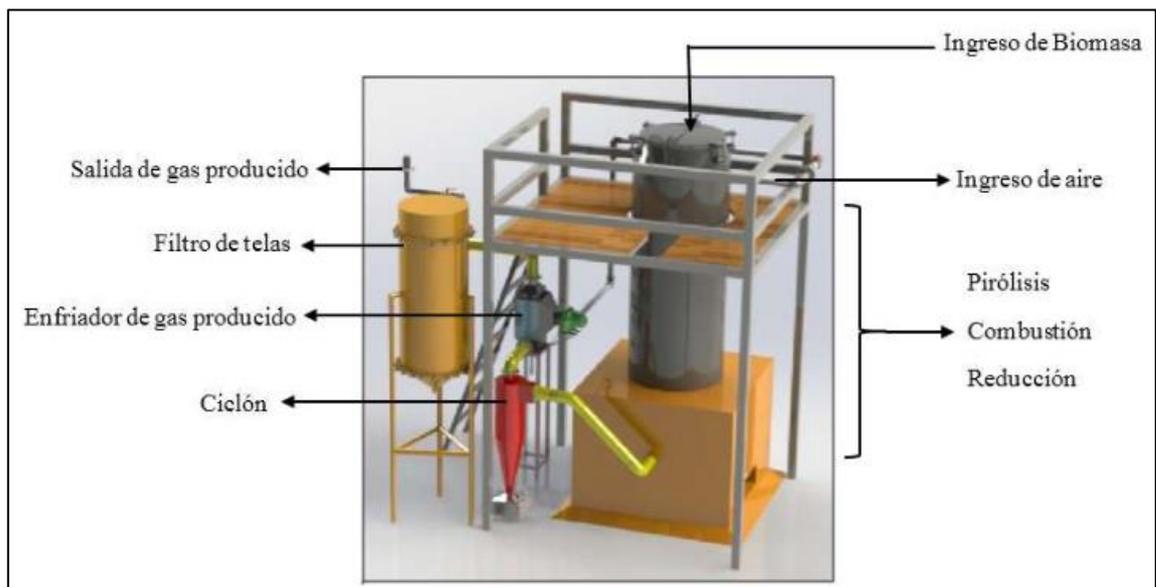


Ilustración 2-4: Representación gráfica del gasificador downdraft ESPOCH

Fuente: (Orozco 2017a, p. 36)

Como se evidencia en las ilustraciones 2-3 y 2-4, la introducción de la biomasa se realiza desde la parte superior, y el aire, agente gasificante, se inyecta desde una tubería que recorre axialmente el eje del cuerpo central, la impulsión de aire se realiza por medio de un ventilador centrífugo y es este mismo elemento es el encargado de dotar la energía necesaria para que la corriente de gas pobre llegue hasta la salida.

2.6.1. *Cuerpo principal.*

Es el lugar donde se producen las reacciones termoquímicas al encontrarse la biomasa con el agente gasificante aire, las principales dimensiones se encuentran a continuación, Ilustración 2.5 (Orozco 2017, p. 12).

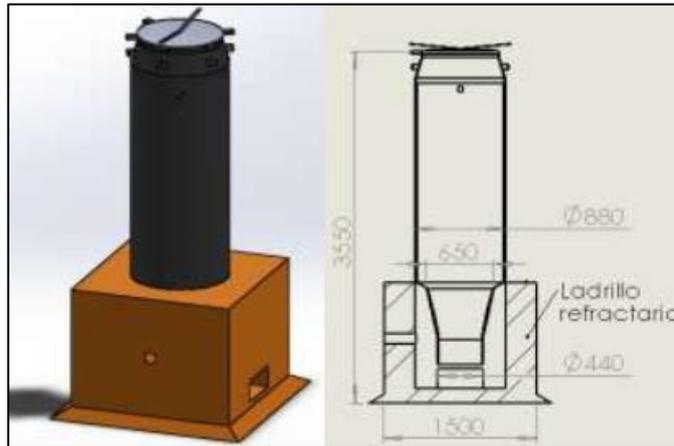


Ilustración 2-5: Esquema cuerpo principal del gasificador.
Fuente: (Orozco 2017a, p. 36)

2.6.2. *Ciclón*

Es el inicial proceso de preparación del gas, ya que se encarga de capturar las partículas de mayor tamaño. Cuando se emplea biomasa residual de la industria maderera, las partículas pequeñas del combustible tienden a aumentar las concentraciones de polvo en el gas en comparación con el uso de trozos de madera más grandes. En gasificadores convencionales de tipo downdraft, se genera una cantidad de polvo que oscila entre 0,5 y 5 g/m³, medida conocida como concentración de partículas en la corriente gaseosa (C_{par}). Del total de polvo producido, aproximadamente el 60 al 65% se separa en el ciclón (RLC 2013, p. 25). Véase Ilustración 2.6.

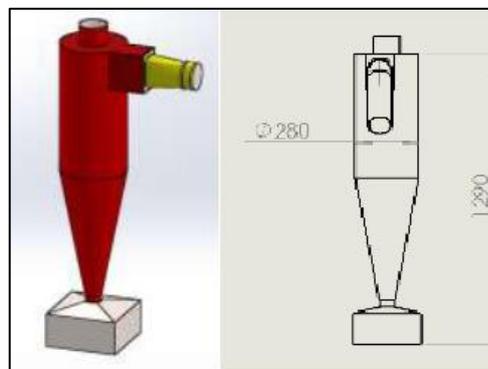


Ilustración 2-6: Esquema ciclón
Fuente: (Orozco 2017, p. 12).

2.6.3. Enfriador

La necesidad de enfriamiento del gas producto depende del uso que se le otorgue. Cuando se destina a la generación de energía térmica como la quema directa en calderas, no es un condicional la disminución de la temperatura del gas producto y se lo puede usar directamente.

En cambio, cuando se pretenda destinarlo a la generación de energía eléctrica o motriz como en el caso de un motor de combustión interna, es crucial enfriar el gas pobre generado para aumentar su densidad antes de ingresar a la cámara de combustión y para prevenir la condensación al entrar en contacto con el aire (Basu 2010, p. 65).

El gas pobre generado, después de pasar por el ciclón, tiene una temperatura cercana a los 115-120 °C; se busca reducir esa temperatura a alrededor de 70 °C. El calor desprendido por el enfriamiento puede ser aprovechado para calentar el aire que ingresa al gasificador con lo cual se vería mejorado el ciclo completo de gasificación al ahorrar la disipación de energía al medio ambiente. El aire a temperatura ambiente se encuentra a 20 °C y después del intercambio de calor tiene un valor cercano a los 48 °. El enfriador es un intercambiador de flujo cruzado el mismo que se representa gráficamente en la en la Ilustración 2.7.

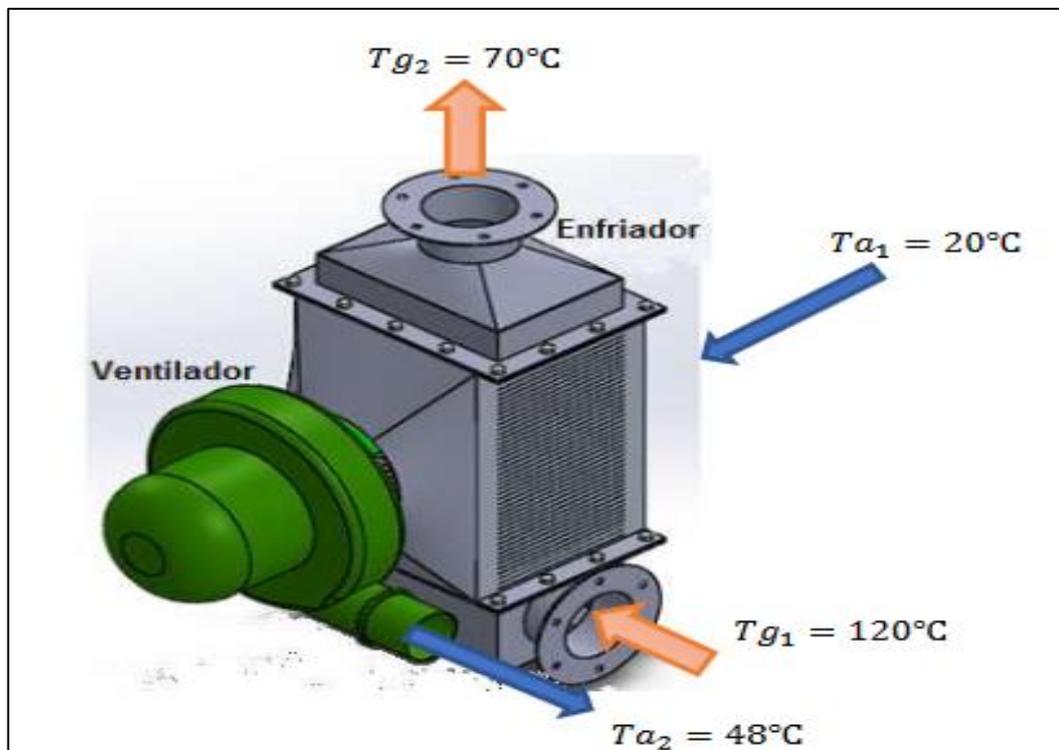


Ilustración 2-7: Temperaturas de fluidos en el enfriador de gas y ventilador de aire
Fuente: (Orozco 2017, p. 12)

2.6.4. Filtro

El sistema de filtrado utiliza tela de lana de vidrio porque puede soportar temperaturas de hasta 260 °C. La disposición geométrica se realiza en mangas circulares y opera mediante un proceso de filtración exterior. Esto implica que el flujo de gas se distribuye alrededor de las mangas, y el gas limpio se elimina a través de un compartimento superior. La temperatura de los gases al llegar al filtro en el gasificador mencionado es de alrededor de 70 °C. El filtro obedece a la metodología de diseño planteada por (Echeverri 2008, p.5). Véase la Ilustración 2-8.

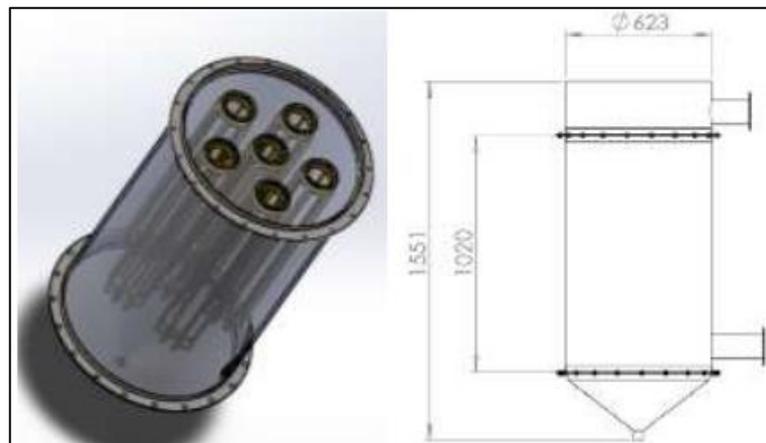


Ilustración 2-8: Configuración de filtro de mangas

Fuente: (Orozco 2017, p. 12)

La cantidad de cenizas en el gas producido es de 0,5 g/m³ como se indicó anteriormente, al pasar por el ciclón este retiene el 60% de las mismas, es decir que el valor de la concentración de partículas en la corriente gaseosa al entrar al filtro es $C_{par} = 0,2 \text{ g/m}^3$ que corresponde a partículas de tamaño menor a 75µm, refiérase a la Tabla 2.3.

En la Tabla 2.4 se puede observar los valores tolerables de contaminantes del gas pobre, si se considera una eficiencia de filtrado del 75%, la cantidad de partículas que tendría el gas filtrado sería del 50 mg/m³ lo cual indicaría que está dentro del rango según esta tabla.

Tabla 2-3: Distribución por tamaños del polvo del gas Pobre.

Tamaño partículas de polvo [µm]	Porcentaje en el gas %
Más de 1 000	1,7
1 000 - 250	24,7
250 - 102	23,7
102 - 75	7,1
75 - 60	8,3
Menos de 60	30,3
Pérdidas	4,2

Fuente: (Orozco 2017, p. 12)

Tabla 2-4: Cantidades tolerables de contaminantes del gas pobre

Agente	Cantidad
Polvo	Menos de 50 mg/m ³ de gas. Preferentemente 5 mg/m ³ de gas
Alquitranes	Menos de 500 mg/m ³ de gas.
Ácidos	Menos de 50 mg/m ³ de gas (medido como ácido acético).

Fuente: (Orozco 2017, p. 12)

Otro parámetro importante es el tiempo de acumulación de partículas el, el cual tiene un valor de 16 horas y se refiere al tiempo que puede trabajar el equipo antes de necesitar una limpieza, en este tiempo el filtro genera una caída de presión de $\Delta P = 143 \text{ mmH}_2\text{O}$.

Es importante considerar que al interior del filtro no se requiere condensación, ya que esta humedad no solo se adhiere a las paredes de este sino también a la tela provocando una filtración inadecuada, por lo que el mismo se encuentra aislado térmicamente por una capa de lana de vidrio de 1 in de espesor.



Ilustración 2-9: Gasificador downdraft

Fuente: Barba, J; Cabascango, C., 2023

2.7. Gas producido de gasificación de biomasa y sus constituyentes.

El gas generado después de un proceso de gasificación contiene una mezcla de gases combustibles y no combustibles, agua, polvo y compuestos de sulfuro como (H₂S) y compuestos de nitrógeno como (NH₃, HCN) que son indeseables por generar condensados corrosivos y contaminantes en los gases de escape como los NO_x que son grandes contribuyentes al fenómeno de la lluvia ácida (Estrada y Zapata 2004, p. 155).

Una característica general de los gases combustibles producto de la gasificación de biomasa es el valor de su poder calorífico bajo (LHV). Este valor es muy inferior al poder calorífico de los hidrocarburos de uso común en la industria y en el transporte (Estrada y Zapata 2004, p. 155).

2.8. Biomasa.

La biomasa es un tipo de energía renovable que remplazara la utilización de combustibles fósiles (carbón mineral y gas natural).

Biomasa es principalmente compuesta de carbón, oxígeno, hidrógeno y pequeñas fracciones de elementos minerales como potasio, fósforo, sulfuro y otras.

Los componentes principales son normalmente conocidos como celulosa y hemicelulosa. Cuando la biomasa es incinerada, el carbono reacciona con el oxígeno ocasionando bióxido de carbono, agua y calor. Las plantas verdes absorben agua, dióxido de carbono y energía solar de la atmósfera, y mediante un proceso, transforman estos elementos en carbohidratos que se convierten en madera y tejido vegetal. En resumen, se genera nueva biomasa como resultado de este proceso (Estrada y Zapata 2004, p. 155).

Por lo general, implica el uso de materiales vegetales como cultivos, restos de cultivos, algas, desechos de madera de construcción y tala de árboles, desechos de construcción y demolición, desechos urbanos sólidos, así como lodos de estaciones de tratamiento de aguas (conocidos como biosólidos) (Aristizábal y Valencia 2015, p. 5).

2.9. Tipos de biocombustibles.

La biomasa es una excelente alternativa energética por dos razones.

- La primera es que, a partir de ella se pueden obtener una gran diversidad de productos.
- La segunda, se adapta perfectamente a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Así, por medio de procesos específicos, se puede llegar a obtener toda una serie de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden ser utilizados para cubrir las necesidades energéticas de confort, transporte, cocinado, industria y electricidad, o servir de materia prima para la industria en general. (Fernández 1994, p. 21).

Tabla 2-5: Clasificación de los biocombustibles en función de su origen.

Origen			Especies
Tipos	Cultivos energéticos	Agrícolas	Cardo, sorgo, girasol, soja, maíz, etc.
	Restos de tratamientos silvícolas	Forestales	Chopos, sauces, eucaliptos, robinias, etc.
	Restos de industrias forestales	Podas, claras, clareos, restos de cortas finales	Especies forestales de los montes.
		Industrias de primera transformación de la madera	Especies de madera española o importada utilizada por las industrias

Fuente: (Álvarez et al. 2012, p. 2)

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

2.9.1. *Biocombustibles sólidos.*

En el ámbito del grupo de los biocombustibles sólidos, los más relevantes son los de tipo primario, constituidos por materias lignocelulósicas procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza.

La paja y los restos de poda de vid, olivo y frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas y aclareos de las masas forestales son materia típica para elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario.

También las cáscaras de frutos secos y huesos de aceituna y otros frutos, los orujillos procedentes de la extracción del aceite de orujo en las almazaras y los restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una buena materia prima para la fabricación de biocombustibles sólidos.

Otro gran grupo de biocombustibles sólidos lo constituye el carbón vegetal, que como efecto de un tratamiento térmico con un pequeño contenido en oxígeno de la biomasa leñosa, pero al ser el resultado de una variación termoquímica de la biomasa primaria, debe ser considerado de naturaleza secundaria (Fernández 1994, p. 21).

2.9.2. *Biocombustibles líquidos.*

La designación de biocombustibles líquidos se utiliza en una serie de productos de origen biológico aplicables como combustibles de sustitución de los derivados del petróleo o como aditivos de éstos para su uso en motores (Fernández 1994, p. 21).

2.9.3. Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos que se pueden llegar obtener a partir de la biomasa están el gas de gasógeno, el biogás y el hidrógeno (Fernández 1994, p. 21).

2.9.4. Gas de gasógeno.

Al someter la biomasa (o el cisco y la brea resultantes de la pirólisis) a altas temperaturas (entre 800 y 1.500°C) en ausencia de oxígeno, se originan productos gaseosos, con un poder calorífico bajo (de 1.000 a 1.200 kcal/m³) consistentes, principalmente, en N₂, CO, H₂, CH₄ y CO₂ en proporciones variables (Fernández 1994, p. 21).

2.10. Potencial de biomasa.

A nivel mundial están disponibles 13 000 MMt de biomasa anual, que se utilizan para alimentación animal, humana y energía, representando el 60%, 15% y 25% respectivamente (Lemaitre et al. 1999, p. 33).

La demanda creciente de biomasa ha generado impactos en la producción agrícola, debido a que existe el cuestionamiento de usar el suelo para la siembra de cultivos energéticos poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de cada país (Sims 2003, p. 24).

A pesar de aquello, esto representa una oportunidad para países de economías emergentes basadas en la agricultura, pecuaria y agroindustria como es el caso de ALC (Lemaitre et al. 1999, p. 33) ya que por la diversidad de biomasa que tiene la región, representa oportunidades estratégicas para el desarrollo regional y local, además de permitir la diversificación de sus matrices productivas y energéticas (Vargas et al. 2021, p. 8).

Ecuador es un país con tradición agrícola y ganadera que genera gran cantidad de biomasa que puede ser aprovechada energéticamente. Esto se ve representado en la producción de energía primaria del año 2015, en el que se utilizaron 1,47 MMt de bagazo de caña y 0,72 MMt de leña para generación eléctrica (Vargas et al. 2021, p. 8). En la Tabla 2-2, se indica el potencial biomásico que tiene Ecuador, el cual proviene de los sectores agrícolas, pecuarios, forestales y municipales.

Con lo que respecta a biomasa residual del sector agrícola se generan aproximadamente 18,23 MMt/año de residuos.

Tabla 2-6: Potencial biomásico en Ecuador.

Sector de biomasa residual	Producto	Tipo de residuo	Producción (MMt/año)
Agrícola	Arroz	Pajilla y cáscara	2,11
	Banano	Raquis,seudotallo, hojas y rechazo.	4,93
	Cacao	Mazorca, raquis y rechazo de producto	2,02
	Café	Poda, renovación de plantas, cascara y pulpa	0,10
	Caña de azúcar	Tallos, hojas, bagazo	0,79
	Maíz duro	Hojas, tallo y mazorcas	0,43
Pecuario	Avícola	Excretas	0,51
	Porcino	Excretas	0,06
	Vacuno (carne)	Excretas	0,01
	Vacuno (leche)	Excretas	0,86
Forestal	Forestal	Ramas, corteza, raíces, aserrín y astillas	0,22
Municipales	Municipales	-	1,70

Fuente: (Vargas et al. 2021, p. 8).

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En el sector pecuario se producen 1,44 MMt/año de biomasa residual, en el sector forestal se originan 0,22 MMt/año y el sector urbano genera 1,70 MMt/año de desechos municipales. Se puede llegar apreciar que, a partir de residuos agrícolas como hojas de maíz, cascarilla de arroz, fruto de palma y cáscara de frutas se podría generar el 50% de la demanda de energía eléctrica nacional. Por otro lado, en el año 2015 se produjeron 158 000 m³ de residuos de madera (Vargas et al. 2021, p. 8).

2.11. Uso de la energía de biomasa en el Ecuador.

En Ecuador el uso de energías renovables se ha convertido en una de las fuentes más utilizadas en diferentes sectores tales como:

2.11.1. Sector industrial.

La producción de vapor representa un consumo intensivo de energía y emplea principalmente bagazo, diésel y fuel oil donde el bagazo cubre más del 63% de la demanda energética para la producción de vapor, en la industria azucarera la baja eficiencia de esta fuente energética se traduce en la quema de considerables volúmenes de su producto; su contribución energética es importante por ser una fuente de energía renovable que reduce la demanda de hidrocarburos en el sector.

Se ha cuantificado que existe un consumo mínimo de leña para la producción de calor de aproximadamente 71.000 Tonelada Equivalente de Petróleo (TEP) (Herrera 2019, p. 34).

2.11.2. Sector residencial.

La distribución del consumo energético en este sector es de 1.622 kT equivalente de Petróleo KTEP/1994, el 62,6% corresponde a la energía utilizada en la zona rural, esto se explica por el tipo de fuente que se emplea, lo que tiene directa relación con la eficiencia de conversión energética, es decir, debido al bajo rendimiento de las fuentes energéticas tradicionales el consumo final energético del sector rural es mayor que el sector urbano.

El uso energético con mayor porcentaje de la biomasa en los hogares es para cocción de alimentos en el sector rural, seguido por el calentamiento de agua. Cabe destacar que a pesar de la alta tasa de penetración de energéticos como el Gas Licuado de Petróleo (GLP), una gran proporción de hogares (más del 77% en el área rural y del 11% en la urbana) continúan empleando la leña y otras formas de biomasa como fuente de energía (Herrera 2019, p. 34).

2.12. Termocuplas

La temperatura es una medida de intervención en procesos industriales complejos como la destilación, regulación de hornos, gasificadores, control de hornos y calderos, generación de energía mediante vapor de agua, refrigeración, etc. Así como también en trabajos experimentales es necesario que se lo mida de la forma más exacta posible.

Por tal motivo para mediciones se utilizará termocuplas ya que hay ser una herramienta de medición de temperatura muy eficaz y ampliamente utilizadas. Debido a su tamaño pequeño y respuestas rápidas significan que son herramientas eficaces para trabajar en entornos peligrosos o hostiles, y son capaces de medir temperaturas externas con precisión y rapidez desde los 0 °C a 2500°C según la configuración específica y necesidad requerida.

Las termocuplas son los sensores de temperatura más comúnmente utilizado en la industria. Una termocupla es conformada de dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente).

Normalmente las termocuplas industriales se consiguen encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina) , en un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido adentro de una caja redonda de aluminio (cabezal) (ARIAN 2013, p. 1).

La norma IEC 60584-1:2013 especifica funciones de referencia y tolerancias para termopares designados por letras (tipos R, S, B, J, T, E, K, N, C y A). Las temperaturas se expresan en grados Celsius según la escala internacional de temperatura de 1990, ITS-90 (símbolo t_{90}), y la EMF (símbolo E) está en microvoltios.

Tabla 2-7: Características técnicas.

Termocuplas	Cable + Aleación	Cable – Aleación	Temperatura (°C)	Rango (Min, Max) mV	Volts Max
J	Hierro	cobre/nickel	(-180, 750)	42.2	
K	Nickel/cromo	Nickel/alumnio	(-180, 1372)	54.8	
T	Cobre	cobre/nickel	(-250, 400)	20.8	
R	87% Platino 13% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	21.09	
S	90% Platino 10% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	18.68	
B	70% Platino 30% Rhodio	94% Platino 6% Rhodio	(0, 1820)	13.814	

Fuente: (ARIAN 2013, p. 1).

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

2.12.1. Termocupla tipo K

La termocupla elegida es del tipo K, ya que es muy común y usada, además que sus rangos de medida son altos. Una termocupla tipo K es simplemente la unión dos alambres de distinto material unidos. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los milivoltios (Bermudez y Bogotá 2008, p. 24).

2.13. Termopozos

Son accesorios que cumplen con la función de proteger el elemento primario de temperatura, bien sea termopar, RTD o termistor, del daño mecánico o químico que pueda ocasionar el proceso, pero incrementan la dinámica del sensor al introducir una resistencia térmica adicional.

Se fabrican a partir de materiales resistentes a la temperatura y la corrosión, con alta conductividad térmica para disminuir la resistencia térmica y que soporten la temperatura máxima del proceso (Bermudez y Bogotá 2008, p. 24).

2.14. Cromatografía de gases

La cromatografía de gases es una técnica analítica de uso extendido, utilizada para determinar la composición de una muestra, garantizando la precisión de sus resultados analíticos. Permite la separación de mezclas complejas, que una vez aisladas y detectados, permite la cuantificación de todos los componentes individuales de una muestra problema, a través de los respectivos tiempos de retención, correspondientes a cada uno de los picos cromatográficos (Arroyo 2018, p. 28).

Es un método cuantitativo físico de separación en el que intervienen dos fases, una móvil que se compone de un gas inerte como: nitrógeno, hidrógeno, helio, argón, o anhídrido carbónico, y otra estacionaria que se mantiene fija en el interior de una columna cromatográfica, en donde el analito o muestra a investigar, es acarreada por el gas inerte cuya elección depende del tipo de detector utilizado, posterior se distribuyen entre las fases dependiendo de su afinidad por cada una de ellas.

La muestra que ingresa al cromatógrafo para su análisis, se volatiliza y se toma con una micro jeringa para luego inyectarla a través de la columna cromatográfica, produciendo la elusión por el flujo constante de la fase móvil (Moncayo 2022, p. 25).

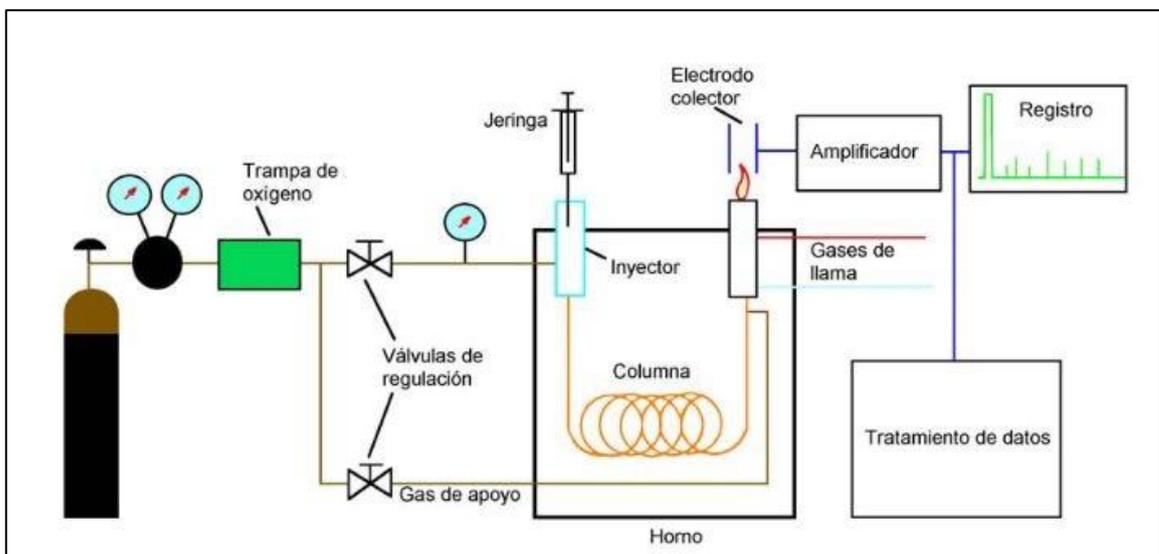


Ilustración 2-10: Representación esquemática de un cromatógrafo de gases.

Fuente: (Moncayo 2022, p. 25).

La norma UNE-EN ISO 6974-5:2015 sobre el gas natural. Permite la determinación de la composición y de la incertidumbre asociada por cromatografía de gases. Método isotermal para el nitrógeno, dióxido de carbono, hidrocarburos C1 a C5 y C6+.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT

Considerando los parámetros operativos, se lleva a cabo un análisis termodinámico del gasificador. En cada zona de gasificación, se identificarán las variables de entrada con el fin de obtener las variables de salida, con sus respectivas curvas de temperatura y su eficiencia de acuerdo con el poder calorífico del gas en dependencia directa de la biomasa utilizada en la gasificación, y así mismo se realice con deficiencia de aire.

3.1. Selección del combustible.

El término biomasa engloba las materias forestales generadas a través de la fotosíntesis y de sus derivados, tales como: residuos forestales y agrícolas, residuos animales y la materia orgánica contenida en los residuos industriales, domésticos y municipales, etc.

En nuestro caso hemos escogido como fuente de alimentación para el gasificador a los biocombustibles de madera, específicamente a las especies de eucaliptos por sus propiedades y su ciclo relativamente rápido de reposición.

3.2. Termocuplas con cabezal.

Termocuplas fabricadas para medir temperaturas extremas, soporta hasta 1.300°C. Su bulbo de alta alúmina protege el termopar interno de los diferentes entornos y de daños mecánicos y químicos.

3.2.1. Modelo: K

- Características: Elaborado a medida y terminado en cabezal de acero inoxidable AISI 316 para intemperie, con tapa roscada, entrada de cable y conexión a proceso en ángulo de 90°.
- Disponible en formato simple y doble. Suministrado con unos prensaestopas M20 x 1.5mm para cables de 6 a 14mm.
- Con cabezal en aluminio, bakelita o a prueba de estallidos y corrosiones generados por estas en la intemperie.

- Para termocupla tipo: K.
- Se fabrica en diámetros estándar:
- Para termocuplas en tubo inoxidable: 1/2.
- Longitud fabricada: 300mm
- Con rosca: 1/2.

Tabla 3-1: Guía de temperaturas máximas para termopares de aislamiento.

Material de vaina	Diámetro de vaina	Tipo de termopar					Propiedades
		K	J	T	N	E	
304L	8,00 mm	800°C	720°C	370°C	-	800°C	AISI 304 Acero Inoxidable 18/8 Cr/Ni Acero inoxidable austenítico resistente a la oxidación y apto para su uso en aire hasta aproximadamente 800°C sin oxidación excesiva ni pérdida de resistencia. A temperaturas negativas no se volverá quebradizo. Normalmente no es magnético, pero puede aparecer ligeramente magnetizado después de una exposición severa al frío. El contenido de carbono está limitado a un máximo de 0.03% que le proporciona una inmunidad al decaimiento de la soldadura (weld decay).

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023



Ilustración 3-1: Termopozo en acero inoxidable 316, conexión roscada al elemento sensor.

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

3.3. Cable tipo k

Se trata de un termopar aislado con vástago corto de acero inoxidable, resorte de flexión y cable de extensión de longitud definida en múltiplos de metro.



Ilustración 3-2: Cable tipo k

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

3.4. Controlador de temperatura.

Tabla 3-2: Controlador de temperatura REX-C700.

Número de modelo:	TREX-C700
Teoría:	Controlador de temperatura
Rango de temperatura:	0-1300 °C
Dimensión perforada:	68*68 mm (ancho x alto)
Dimensión externa:	72*72*100 mm (ancho x alto x profundidad)
Deflexión de control:	+1 dígito
Uso:	Industrial
Exactitud:	0.1
Color de la carcasa:	negro
Modo de control disponible:	PID; ON-OFF; transmisión
Unidades de visualización:	LED doble de 4 dígitos
Señal de entrada disponible:	CT; IDT; señal lineal
Fuente de alimentación:	Potencia estándar: 85~265VAC SMPS (fuente de alimentación conmutada)

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023



Ilustración 3-3: Controlador de temperatura REX-C700

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

3.5. Plancha de acero.

La placa de Acero es utilizada en la elaboración de estructuras, tanques, maquinaria industrial, postes, carrocerías, cubiertas, armaduras etc.

Tabla 3-3: Especificaciones técnicas.

Especificaciones de la Placa de acero		
Ancho	Largo	Espesor
100mm	100mm	10mm

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023



Ilustración 3-4: Placa de acero.
Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

3.6. Experimentación.

Inspeccionar el gasificador compuertas cerradas, tuberías de flujo de aire, suministro de energía al ventilador. Verificación de instrumentos caudalímetros, termocupla y pirómetro.



Ilustración 3-5: Tablero de control del gasificador downdraft
Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Registrar el peso de la biomasa residual de la industria de la madera a través de la balanza, se preparan porciones de 40 kg cada una para ser suministradas una porción en cada gasificación. Se utilizan para la experimentación residuos de madera trozada de eucalipto de dimensiones aproximadas de 5cm x 5cm x 12cm.



Ilustración 3-6: Troceado de eucalipto.
Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Arrancar el gasificador, consiste en el lapso que se le da al gasificador para que la mayor parte del equipo adquiera una temperatura de trabajo, en otras palabras, sirve para calentar el conjunto. Este calor se lo obtiene de la combustión completa de la biomasa preferentemente en el hogar durante una hora, que es el intervalo de tiempo recomendado (Basu 2010, p. 65).



Ilustración 3-7: Quema de biomasa
Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Para tener una combustión completa se debe agregar la cantidad adecuada de aire, conocida como valor estequiométrico o masa de aire estequiométrico, el mismo que depende de la composición química del combustible (Basu 2010, p. 65).

Ecuación
$$m_{at} = 0,1153 * C + 0,3434 (H - O/8) + 0,0434 * S \quad (3-1)$$

Donde:

- m_{at} es la masa de aire estequiométrico en $\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$
- C, H, O y S es el porcentaje de masa de carbono, hidrogeno, oxígeno y azufre en la correspondientemente en el combustible de uso.

La composición química de biomasa se la puede obtener de un análisis de laboratorio para valores exactos del combustible con el que se está tratando, sin embargo, los valores referenciales para varios recursos se enlistan en la Tabla 3-4

Tabla 3-4: Composición de algunos tipos de biomazas en base seca

Combustible	Carbono %	Hidrógeno %	Nitrógeno %	Azufre %	Oxígeno %	Cenizas %	Humedad %	PCI (MJ/kg)
Eucalipto	49,01	6,02	0,2	0,12	42,38	2,28	8,45	1953
Pino	53,43	6,64	0,14	0,05	38,87	0,85	-	19,38
Laurel	52,45	6,36	0,4	-	40,13	0,59	10	19,98

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Para asegurar la combustión completa del combustible se agrega una cantidad adicional de aire o un exceso de aire que será el valor real de masa de aire con el que se produce la combustión. Este exceso de aire es requerido debido al tipo de combustible, la relación entre la masa real de aire y la masa de combustible se conoce como coeficiente de exceso de aire s y los valores que se recomiendan utilizar para combustibles sólidos, líquidos y gaseosos se encuentran en la Tabla 3-5.

$$\text{Ecuación} \quad S = \frac{m_{ar}}{m_{at}} \quad (3-2)$$

Donde

- S es el coeficiente de exceso de aire, adimensional
- m_{at} es la masa de aire real en $\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$

Tabla 3-5: Valores del coeficiente de exceso de aire por tipo de combustible.

Combustibles	Coefficiente de exceso de aire s
Sólidos	1,5 – 2,0
Líquidos	1,1 – 1,2
Gaseosos	1 – 1,1

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Poner en marcha el gasificador, finalizada la etapa de arranque el equipo debe comenzar su trabajo produciendo gas pobre, las condiciones de operación se debe considerar mantenerlas estables. La cantidad de aire proporcionada como agente gasificante constituye solamente una fracción de la

masa de aire estequiométrica, y este porcentaje varía según el tipo específico de gasificador que se esté utilizando. Por lo tanto, el requisito de aire para gasificación se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación} \quad m_{ag} = m_{at} * ER \quad (3-3)$$

Donde:

- m_{ag} es la masa de aire requerido para gasificación en $\frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{combustible}}}$
- ER es un parámetro conocido como relación de equivalencia $0,2 < ER < 0,3$, para gasificadores downdraft se recomienda valores de 0,2 a 0,25 (Basu 2010, p. 65).

El control del caudal de ingreso de aire tanto para el arranque como para la puesta en marcha del gasificador, se lo realiza por medio de una válvula de bola. Con las ecuaciones 3.3 y 3.2 se obtienen las masas de aire real para el arranque y para la gasificación, para transformar estos datos a flujos volumétricos se debe considerar el valor de la densidad del aire en las condiciones de trabajo, presión atmosférica en Riobamba y temperatura de aire a la salida del ventilador.

$$\text{Ecuación} \quad \dot{V}_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} = \frac{m_a * \dot{m}_b}{\frac{P_{atm}}{R_a * T_a}} \quad (3-4)$$

Donde:

- \dot{V}_a es el caudal de ingreso de aire en m^3/s
- \dot{m}_a es el caudal másico de aire en kg/s
- ρ_a es la densidad del aire
- m_a es la masa de aire real o de gasificación en kg/kg
- $\dot{m}_b = 40 \text{ kg}/\text{h}$ es el caudal másico de biomasa para arranque o en gasificación
- $P_{atm} = 72875 \text{ Pa}$ es la presión atmosférica en Riobamba
- $R_a = 287 \text{ J}$
- kg K es el constante particular del aire
- $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ en el arranque $48 \text{ }^\circ\text{C}$ en gasificación es la temperatura a la que sale el aire del ventilador en el arranque y en la gasificación.

- De una manera similar se puede identificar el caudal de salida de gas, tomando en cuenta los parámetros de salida del gas (Cengel y Ghajar, 2011).

Ecuación

$$V_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} = \frac{\dot{m}_g}{\frac{P_{atm}}{R_g * T_g}} \quad (3-5)$$

Donde:

- V_g es el caudal de salida de gas m^3/s
- \dot{m}_g es el flujo másico de gas en kg/s
- $R_g = 0,3144 \text{ kJ}$
- $kg \text{ K}$ es el constante particular del gas.
- $T_g = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ es la temperatura de salida del gas del filtro.
- Registrar las temperaturas y valores de presión diferencial para caudales, usando las termocuplas se mide las temperaturas indicadas T3, T5 y T6.

Tomar las muestras de gas pobre, después de haber funcionado el gasificador de manera estable durante un período de una hora se procede al muestreo del gas pobre. La muestra de gas pobre se la realiza en bolsas tedlar con capacidad para 2 y 3 litros, las cuales están fabricadas con un material químicamente inerte, polivinil fluoruro (PVF), y son específicas para el muestreo de líquidos o gases.

La temperatura del fluido de muestra para estas bolsas puede ser hasta 107°C , el tiempo de almacenamiento que resisten puede ser de 24 a 72 horas dependiendo del fluido. La toma se la debe realizar evitando la mezcla con aire circundante del ambiente y se colecta dos bolsas, pues es la cantidad mínima para el análisis en laboratorio.



Ilustración 3-8: Bolsa tedlar
Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Transportar e ingresar a análisis de laboratorio, el análisis cromatográfico del gas se lo lleva a cabo en la ciudad de Quito en el Departamento de Ingeniería Química Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional, el cambio pequeño de presión atmosférica no incurre en riesgo de daños en la bolsa, por lo que el porcentaje de llenado de estas será en su totalidad.

3.6.1. Datos primera gasificación

Tabla 3-6: Datos de arranque de la primera gasificación.

Temperatura °C		T2	T3	T6	T7	T8	T9
		Tiempo					
t0	4:20	26	33	31	25	45	16

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la ilustración 3-9 se observa las temperaturas iniciales al momento de realizar la gasificación.

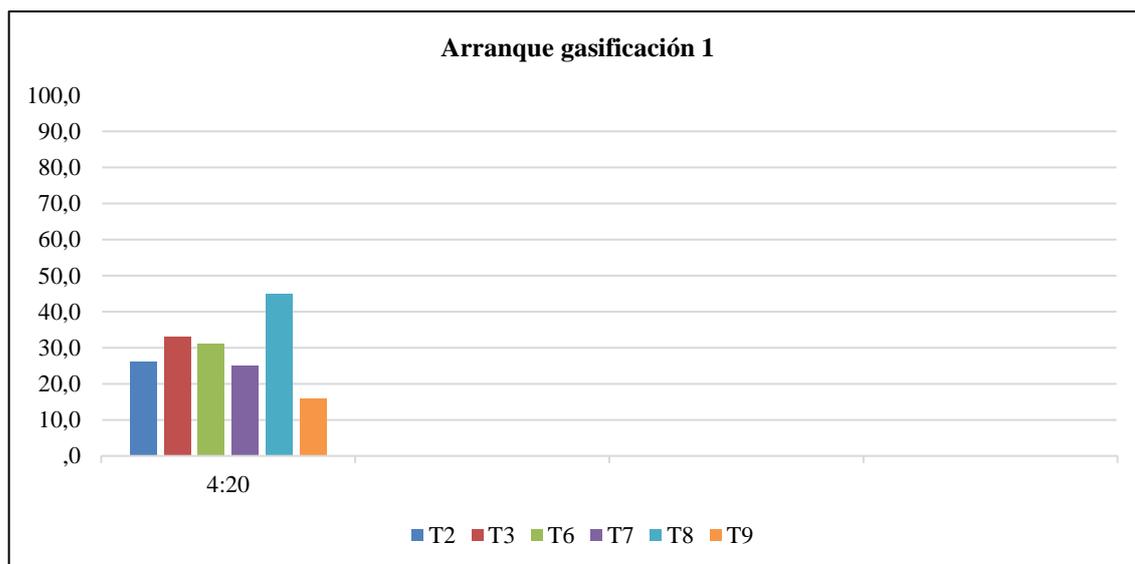


Ilustración 3-9: Encendido y arranque del gasificador.

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la tabla 3-7 se aprecia la variación de la temperatura durante la gasificación entre lapsos de 10 minutos por 1 hora, una vez cerrado las tapas del sub reactor a una temperatura de 750 °C, se alimentó con 15 kg de aserrín de eucalipto secuencial desde la tolva y con movimiento del tornillo sin fin a una velocidad de 1,5 rpm la llama permanece constante y la temperatura sube y baja aun rango de variación que permita que el sistema se ahogue para la obtención de llama su máximo alcance en esta gasificación es de 651°C, la muestra tomada es a una temperatura de 403°C en donde se mantuvo la llama azul y constante por 30 minutos.

Tabla 3-7: Datos primera gasificación

Temperatura °C		T2	T3	T6	T7	T8	T9
Tiempo							
t0	4:20	26	33	31	25	45	16
t1	4:30	51	81	55	39	104	22
t2	4:40	97	253	68	52	548	29
t3	4:50	187	470	80	70	572	17
t4	5:00	240	651	91	88	710	21
t5	5:10	195	519	159	113	555	18
t6	5:20	136	394	178	143	403	15

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

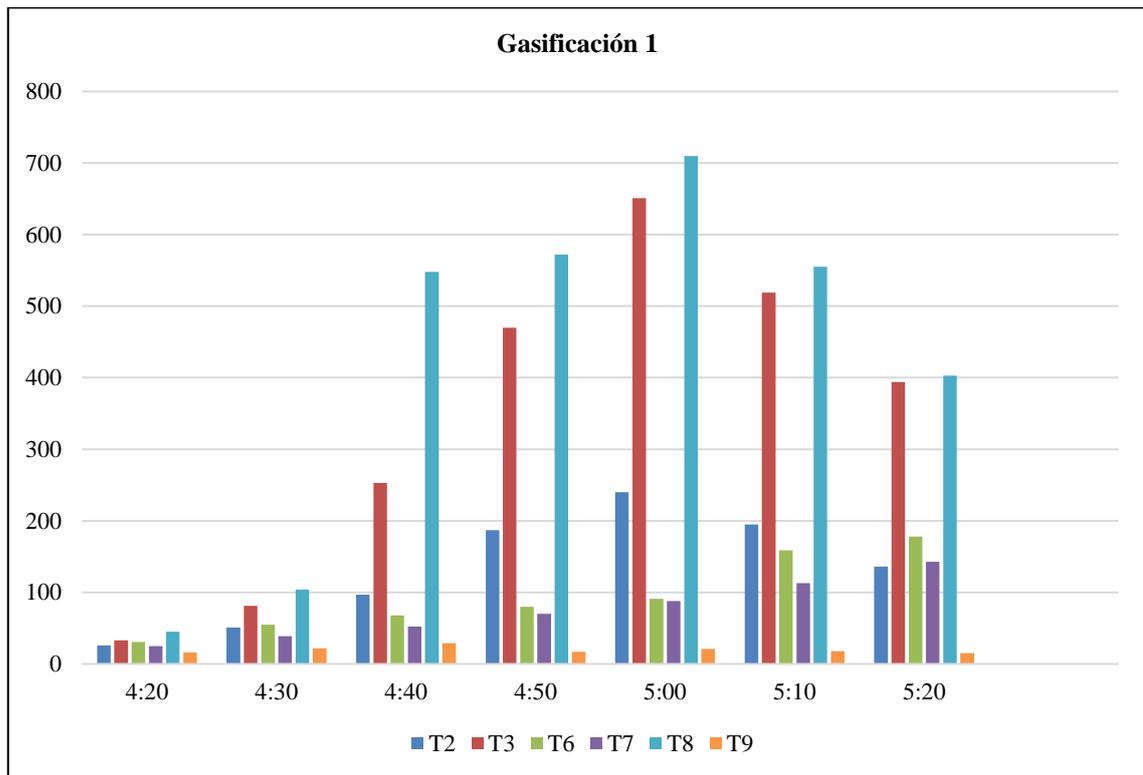


Ilustración 3-10: Variación de la temperatura para la obtención de gas.

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

3.6.2. Datos segunda gasificación

Tabla 3-8: Datos de arranque de la segunda gasificación

Temperatura °C		T2	T3	T6	T7	T8	T9
Tiempo							
t0	4:20	34	51	80	30	110	22

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la ilustración 3-11 se observa las temperaturas iniciales al momento de realizar la gasificación.

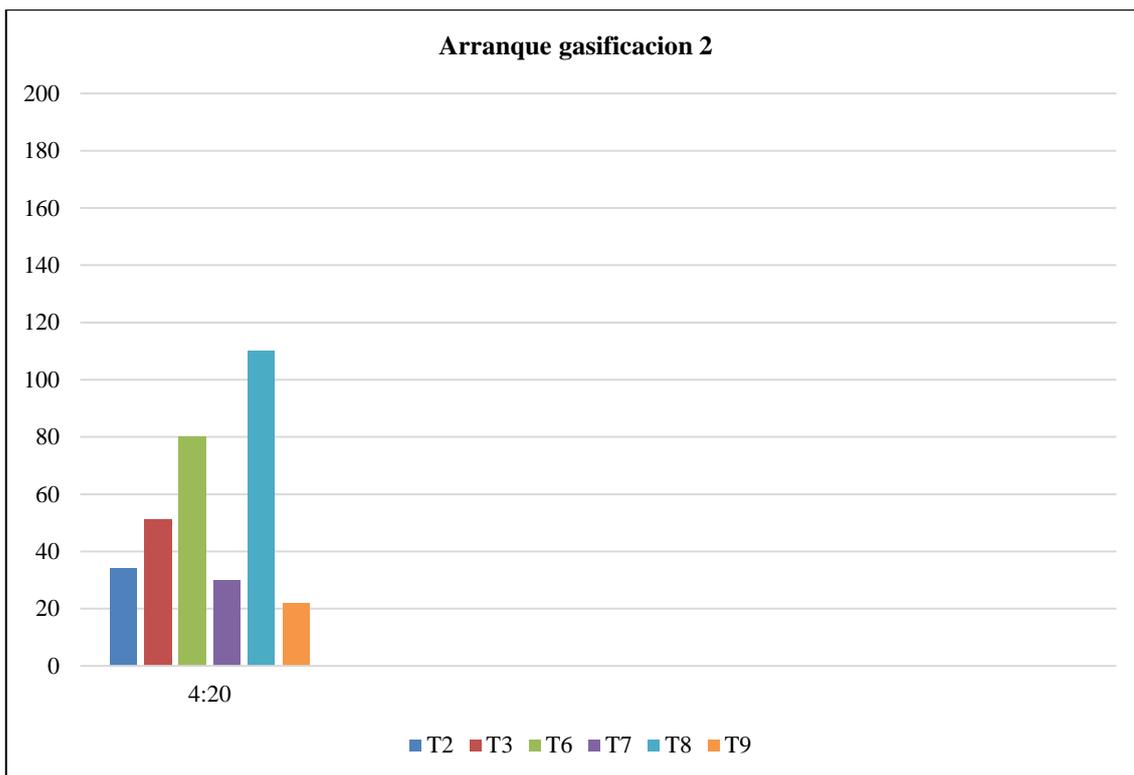


Ilustración 3-11: Encendido y arranque del gasificador.

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la tabla 3-8 se aprecia la variación de la temperatura durante la segunda gasificación entre lapsos de 10 minutos por 1 hora, una vez cerrado las tapas del sub reactor a una temperatura de 750 °C, se alimentó con 15 kg de aserrín de eucalipto secuencial desde la tolva y con movimiento del tornillo sin fin a una velocidad de 1,5 rpm la llama permanece constante y la temperatura sube y baja aun rango de variación que permita que el sistema se ahogue para la obtención de llama su máximo alcance en esta gasificación es de 813°C.

La muestra tomada es a una temperatura de 708°C en donde se mantuvo la llama azul y constante por 25 minutos.

Tabla 3-9: Datos segunda gasificación

Tiempo / Temperatura °C		T2	T3	T6	T7	T8	T9
		t0	4:20	34	51	80	30
t1	4:30	118	322	106	17	249	29
t2	4:40	235	813	162	74	724	49
t3	4:50	125	673	182	108	580	52
t4	5:00	75	458	226	132	734	35
t5	5:10	55	438	198	153	689	28
t6	5:20	85	261	255	205	708	6

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

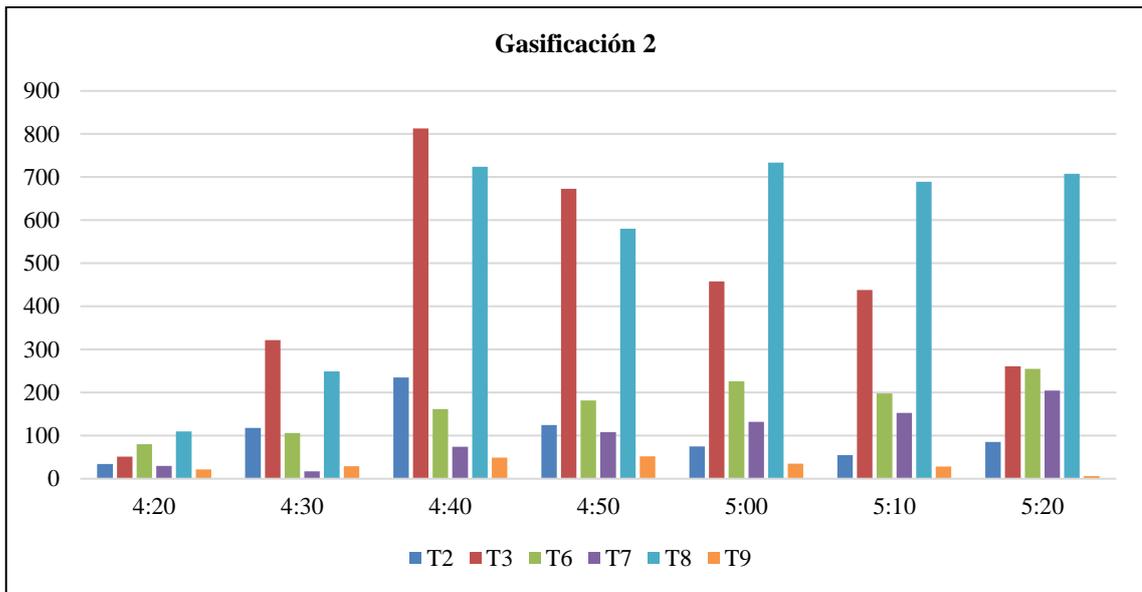


Ilustración 3-12: Variación de la temperatura para la obtención de gas.

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

3.6.3. Datos tercera gasificación.

Tabla 3-10: Datos de arranque de la segunda gasificación

Temperatura °C		T2	T3	T6	T7	T8	T9
		T2	T3	T6	T7	T8	T9
ti0	4:20	27	70	187	54	169	15

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la ilustración 3-13 se observa las temperaturas iniciales al momento de realizar la gasificación.

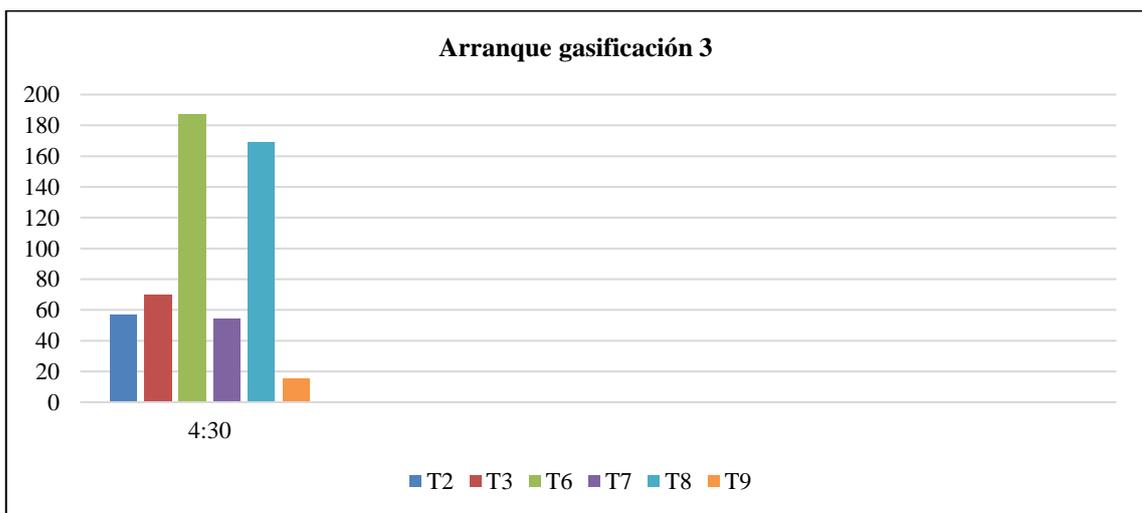


Ilustración 3-13: Encendido y arranque del gasificador

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la tabla 3-10 se aprecia la variación de la temperatura durante la segunda gasificación entre lapsos de 10 minutos por 1 hora, una vez cerrado las tapas del sub reactor a una temperatura de 750 °C, se alimentó con 15 kg de aserrín de eucalipto secuencial desde la tolva y con movimiento del tornillo sin fin a una velocidad de 1,5 rpm la llama permanece constante y la temperatura sube y baja aun rango de variación que permita que el sistema se ahogue para la obtención de llama su máximo alcance en esta gasificación es de 890°C, la muestra tomada es a una temperatura de 480°C en donde se mantuvo la llama azul y constante por 20 minutos.

Tabla 3-11: Datos tercera gasificación

Tiempo		Temperatura °C					
		T2	T3	T6	T7	T8	T9
t0	4:30	57	70	187	54	169	15
t1	4:40	132	568	206	116	627	22
t2	4:50	72	540	421	232	824	32
t3	5:00	105	336	456	323	717	18
t4	5:10	127	370	478	354	890	17
t5	5:20	87	356	415	390	690	18
t6	5:30	57	283	389	395	480	13

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

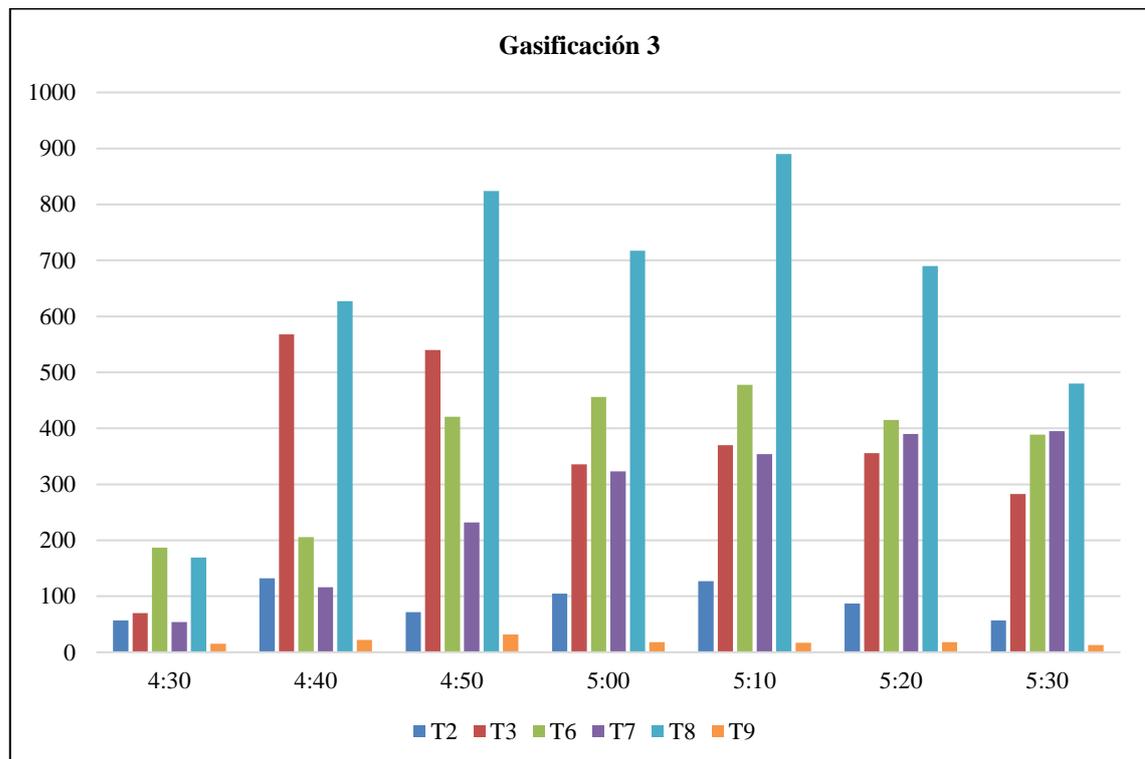


Ilustración 3-14: Variación de la temperatura para la obtención de gas.

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

3.7. Balance de masa y energía en la gasificación

La última etapa en el proceso de experimentación es el balance másico y energético para abordar el cálculo de la eficiencia. En el balance másico se utilizan los valores que se obtienen en la prueba de gasificación. Para cada flujo másico de biomasa, aire y gas producido se utilizan los instrumentos balanza digital y caudalímetros detallados anteriormente.

Para el caso de los condensados que se receiptan en el enfriador, su cantidad se la toma por la tubería de purga del enfriador, mientras que el pesaje de las cenizas se lo realiza después que se ha terminado la gasificación y se ha dejado enfriar completamente el equipo al menos 12 horas. La Figura 2.13 representa esquemáticamente los valores de masa de entrada y salida.

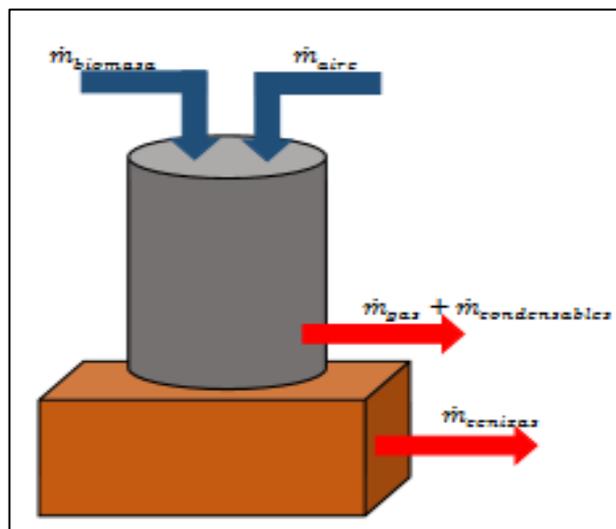


Ilustración 3-15: Diagrama de balance de masa en el gasificador.

Fuente: (Orozco 2017, p. 12).

$$\text{Ecuación} \quad \dot{m}_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} = \dot{m}_{\text{gas}} + \dot{m}_{\text{condensables}} + \dot{m}_{\text{ceniza}} \quad (3-6)$$

Donde:

- $\dot{m}_{\text{biomasa}} = \dot{m}_b = 40 \text{ kg/h}$ es la cantidad de biomasa forestal
- $\dot{m}_{\text{aire}} = \dot{m}_{\text{ag}}$ es el flujo másico de aire para gasificación en kg/h
- \dot{m}_{gas} es el flujo másico de gas pobre producido en kg/h
- $\dot{m}_{\text{condensables}}$ es el flujo másico de condensables producido en kg/h
- \dot{m}_{ceniza} es el flujo masico de cenizas producidas en kg/h

El balance de energía se lo realiza en base a los parámetros experimentales, el diagrama que indica el flujo de energía se presenta en la Figura 2.14.

$$\dot{m}_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{Gas}} * h_{\text{Aire}}$$

$$= \dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{Gas}} * h_{\text{Aire}}$$

$$\text{Ecuación} \quad + \dot{m}_{\text{cenizas}} * C_p_{\text{cenizas}} (T_{\text{cenizas}} - T_{\text{amb}}) + Q_{\text{perdido}} \quad (3-7)$$

3.7.1. Gasificación 1

Donde:

$PCI_{\text{biomasa}} = 15,36 \text{ kJ/m}^3$ es el poder calorífico inferior de la biomasa. Madera trozada de eucalipto.

$h_{\text{aire}} = 291,4125 \text{ kJ/kg}$ es la entalpía del aire, agente gasificante a $18,1^\circ\text{C}$ y $4,8953\text{kPa}$, PCI_{gas} es el poder calorífico inferior del gas producido en MJ/kg, se obtiene de los resultados de laboratorio cromatográfico realizados. Tabla 4.1, página 43

3.7.2. Gasificación 2

Donde:

$PCI_{\text{biomasa}} = 3518,62 \text{ kJ/m}^3$ es el poder calorífico inferior de la biomasa. Madera trozada eucalipto.

$h_{\text{aire}} = 291,4125 \text{ kJ/kg}$ es la entalpía del aire, agente gasificante a $18,1^\circ\text{C}$ y $4,8953\text{kPa}$, PCI_{gas} es el poder calorífico inferior del gas producido en MJ/kg, se obtiene de los resultados de laboratorio cromatográfico realizados. Tabla 4.2, página 44.

3.7.3. Gasificación 3

Donde:

$PCI_{\text{biomasa}} = 3677,44 \text{ kJ/m}^3$ es el poder calorífico inferior de la biomasa. Madera trozada de eucalipto.

$h_{aire} = 291,4125 \text{ kJ/kg}$ es la entalpía del aire, agente gasificante a $18,1^\circ\text{C}$ y $4,8953\text{kPa}$, PCI_{gas} es el poder calorífico inferior del gas producido en MJ/kg, se obtiene de los resultados de laboratorio cromatográfico realizados. Tabla 4.3, página 45.

3.8. Análisis térmico.

El análisis térmico de un gasificador tiene en cuenta todas las variables de temperatura tanto externas e internas que intervienen en cada etapa del proceso de gasificación, con el fin de determinar correctamente los parámetros de funcionamiento de este.

3.8.1. Flujo másico.

El flujo de masa es la relación directa que tiene, la masa de un fluido que circula en una tubería o ducto, y que es proporcional al área de la sección transversal de la misma, se encuentra en función de la densidad del fluido y a su velocidad.

El número de moléculas en un gas que fluye es una forma alternativa de medida de la velocidad a la que la masa de una sustancia pasa a través de una superficie

3.8.2. Balance de energía.

En la termodinámica se aplica en la transferencia de calor a medida que un sistema pasa por una transformación de un estado de equilibrio a otro.

Es decir, el cambio puro en aumento o disminuciones la energía total de un sistema en el curso del proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de este proceso.

$$E_{entra} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

$$E_{entra} - E_{salida} = \Delta Q + \Delta E_{masa} + \Delta W = \Delta E_{sistema}$$

$$\text{Ecuación} \quad E_{entra} - E_{salida} = Q_{entra} - Q_{salida} + E_{masa\ entra} - E_{masa\ salida} + W_{entra} - W_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (3-8)$$

3.8.2.1. Balance de energía del gasificador.

$$\text{Ecuación} \quad \dot{m}_{\text{Biomasa}} + \dot{m}_{\text{Aire}} = \dot{m}_{\text{Gas}} + \dot{m}_{\text{Ceniza}} + \dot{m}_{\text{Líquido}} \quad (3-9)$$

Donde:

- \dot{m}_B : \dot{m} Biomasa Cantidad de biomasa forestal utilizada en el gasificador [kg/h]
- \dot{m}_A : \dot{m} Aire Flujo másico de aire necesario para la gasificación [kg/h]
- \dot{m}_{Gas} : \dot{m} Gas Flujo másico de gas pobre [kg/h]
- \dot{m}_{Ceniza} : \dot{m} Ceniza Flujo másico de cenizas resultantes del proceso [kg/h]

Tabla 3-12: Balance de energía del gasificador.

Biomasa	Eucalipto
\dot{m}_{Biomasa}	1,25 kg/h
\dot{m}_{Aire}	3,466 kg/h
\dot{m}_{Gas}	4,67 kg/h
\dot{m}_{Ceniza}	0,046 kg/h

Fuente: (Jácome y Lanas 2016, p. 31)

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C, 2023.

$$\text{Ecuación} \quad \dot{m}_{\text{Biomasa}} + \dot{m}_{\text{Aire}} = \dot{m}_{\text{Gas}} + \dot{m}_{\text{Ceniza}} \quad [\text{Kg/h}] \quad (3-10)$$

$$\dot{m}_{\text{Aire}} = 4,67 + 0,0046 - 1,25 \quad [\text{Kg/h}]$$

$$\dot{m}_{\text{Aire}} = 3,466 \quad [\text{Kg/h}]$$

Las cantidades de biomasa que se utilizan se cuantifican de una manera experimental, es decir se pesan antes de ser introducidas al gasificador, seguidamente son transformadas con el pasar del tiempo en productos de gasificación como alquitranes y cenizas que se cuantifica de una misma manera, mediante el peso de esta.

El flujo de aire se cuantifica mediante el sensor instalado en la placa orificio el cual mide una presión diferencial y mediante la ecuación característica se obtiene el flujo másico.

3.8.3. *Cuantificación del volumen teórico de gas de síntesis.*

El volumen de aire teórico o estequiométrico se refiere al volumen de aire requerido para que el combustible se quemé por completo, y se calcula a partir de la reacción de combustión en condiciones ideales, la determinación del volumen teórico de gas de síntesis implica realizar

cálculos o estimaciones para conocer la cantidad anticipada de gas de síntesis que se generará en un procedimiento químico particular.

Este gas, compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), se forma comúnmente a partir de materiales ricos en carbono, como carbón, gas natural o biomasa, a través de procesos como la gasificación.

Es posible determinar este valor conociendo la composición elemental del combustible y considerando que el aire atmosférico contiene un 21% de oxígeno en volumen. Esto se aplica particularmente a combustibles en estado sólido (Restrepo et al. 2004, p. 73).

Tabla 3-13: Cálculo del flujo másico del gas pobre de la madera eucalipto.

Componente	%	Variación	Volumen de aire teórico	Volumen Nitro teórico	Volumen de gases tri	Volumen de vapor H ₂ O	Volumen gases prod	Flujo volumétrico gas pobre	Flujo masico gas pobre
C ^t	39,98	49-53	3,678119	2,90699401	0,746027	0,831028	3,012801	3,76600155	4,6698419
O ^t	35,91	40-43							
H ^t	4,98	5,8-6,3							
N ^t	0,16	0,2-1,1							
CENIZA	0,2	-							
S ^t	0	-							
Humedad de madera	22	-							
Combustible $\left[\frac{kg}{h}\right]$	1,25								

Fuente: (Jácome y Lanas 2016, p.3).

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

3.8.4. Volumen del aire teórico (V_a^o).

$$\text{Ecuación} \quad V_a^o = 0,0889(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t \quad \left[\frac{m^3}{kg}\right] \quad (3-11)$$

$$V_a^o = 3,678 \quad \left[\frac{m^3}{kg}\right]$$

3.8.5. Volumen teórico de nitrógeno ($V_{N_2}^o$).

Ecuación
$$V_{N_2}^o = 0,79V_a^o + \frac{N^t}{100} \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (3-12)$$

$$V_{N_2}^o = 2,90 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

3.8.6. Volumen de los gases triatómicos ($V_{RO_2}^o$)

Ecuación
$$V_{RO_2}^o = V_{CO_2} + V_{SO_2} = \frac{1,866(C^t + 0,375 S^t)}{100} \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (3-13)$$

$$V_{RO_2}^o = 0,74 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

3.8.7. Volumen teórico del vapor de agua ($V_{H_2O}^o$).

Ecuación
$$V_{H_2O}^o = 0,111H^t + 0,0124W_i + 0,0161(d)(V_a^o) \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (3-14)$$

$$V_{H_2O}^o = 1,358 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

3.8.8. Volumen de los gases producidos en el gasificador (V_g).

Ecuación
$$V_g = V_{RO_2}^o + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o + (\alpha - 1)V_a^o \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (3-15)$$

$$V_g = 3,52 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

3.8.9. Flujo volumétrico del gas pobre (V_{gp}).

Ecuación
$$V_{gp} = (B)(V_g) \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (3-16)$$

$$V_{gp} = 4,40 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

Para realizar la gasificación se obtuvo troceado de eucalipto y procurando que sean del tamaño establecido para el ingreso en la boquilla del gasificador (10x10 cm). El porcentaje de humedad se presentó entre 20 y 25 %, para efectos de cálculo se trabajó con 22%.

Las temperaturas óptimas sin que exista disminución en el caudal de gas de síntesis con biomasa forestal se encuentran entre (360°C y 450°C) en la zona de reducción de acuerdo con el balance de energía, y las termocuplas instaladas en el gasificador durante la gasificación.

4.1. Cálculos del poder calorífico del syngas de las 3 gasificaciones

4.1.1. Cálculo del poder calorífico del syngas obtenido de la primera gasificación

Las siguientes ecuaciones se emplean para calcular el valor del poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI) del syngas.

Poder calorífico superior

$$\begin{aligned} \text{Ecuación} \quad \text{PCS} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (m\text{H}_2 \times 33900) + (m\text{CH}_2 \times 13249) + (m\text{CO} \times 2412) & (3-17) \\ &+ (m\text{C}_2\text{H}_6 \times 12384) + (m\text{N}_2 \times 12018) \\ &+ (m\text{CO}_2 \times 11929) + (m\text{O}_2 \times 12009) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ecuación} \quad \text{PCS} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (7.59 \times 33900) + (3.44 \times 13249) + (22.63 \times 2412) & (3-18) \\ &+ (0.15 \times 12384) + (43.03 \times 12018) \\ &+ (20.45 \times 11929) + (1.63 \times 12009) \end{aligned}$$

$$\text{PCS} = 1139.97 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right)$$

Poder calorífico inferior

$$\begin{aligned} \text{Ecuación} \quad \text{PCI} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (m\text{H}_2 \times 28642) + (m\text{CH}_2 \times 11940) + (m\text{CO} \times 2412) & (3-19) \\ &+ (m\text{C}_2\text{H}_6 \times 11336) + (m\text{N}_2 \times 11065) \\ &+ (m\text{CO}_2 \times 11527) + (m\text{O}_2 \times 11260) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ecuación} \quad \text{PCI} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (7.59 \times 28642) + (3.44 \times 11940) + (22.63 \times 2412) & (3-20) \\ &+ (0.15 \times 11336) + (43.03 \times 11065) \\ &+ (20.45 \times 11527) + (1.63 \times 11260) \end{aligned}$$

$$\text{PCI} = 1144.95 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right)$$

Tabla 4-2: Resultado de la segunda gasificación

INFORMACION CLIENTE				
Cliente / Empresa:	Cesar Liroy Cabascango Romero		Persona de contacto:	Ing. Marco Santillan
Dirección / Telf.:	Av. 11 de Noviembre y Francisco Hall / 0963355603		E-mail:	cesar.cabascango@espoch.edu.ec
PARAMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-023-53-02		Fecha de muestreo:	12/7/2023
Tipo de muestra:	Gas de síntesis de trozos de madera de eucalipto 2		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar		Fecha inicio del ensayo:	19/7/2023
Fecha de recepción:	13/7/2023		Fecha entrega informe:	28/7/2023
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	21,0 °C	29,0 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía
Temperatura y Presión de muestra:	64,5 °F	0,7 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01
	18,1 °C	4895,3 Pa		PE-7.2-02
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno		6,48	0,200
	Oxígeno		2,87	0,070
	Nitrógeno		53,39	0,416
	Monóxido de carbono		13,81	0,075
	Metano		2,19	0,021
	Dióxido de carbono		19,97	0,216
	Etano		0,07	0,005
PROPIEDADES	Agua		0,72	0,046
	Densidad relativa		1,02	
	Peso molecular promedio [g/mol]		29,47	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,24	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		3776,43	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		3518,62	
Factor de compresibilidad (z)		1,0000		
CROMATOGRAMA			MUESTRA	
<p>Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y monóxido de carbono)</p>		<p>Columna Porapack Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)</p>		
DECLARATORIAS	<p>* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.</p>			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.			

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

4.2. Cálculos del poder calorífico del syngas de las 3 gasificaciones

4.2.1. Cálculo del poder calorífico del syngas obtenido de la primera gasificación

Las ecuaciones siguientes se emplean para calcular el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI) del syngas.

Poder calorífico superior

$$\begin{aligned} \text{PCS} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (m_{\text{H}_2} \times 33900) + (m_{\text{CH}_2} \times 13249) + (m_{\text{CO}} \times 2412) \\ &\quad + (m_{\text{C}_2\text{H}_6} \times 12384) + (m_{\text{N}_2} \times 12018) \\ &\quad + (m_{\text{CO}_2} \times 11929) + (m_{\text{O}_2} \times 12009) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PCS} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (6,48 \times 33900) + (2,19 \times 13249) + (13,81 \times 2412) \\ &\quad + (0,07 \times 12384) + (53,39 \times 12018) \\ &\quad + (19,97 \times 11929) + (2,87 \times 12009) \end{aligned}$$

$$\text{PCS} = 1197,19 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right)$$

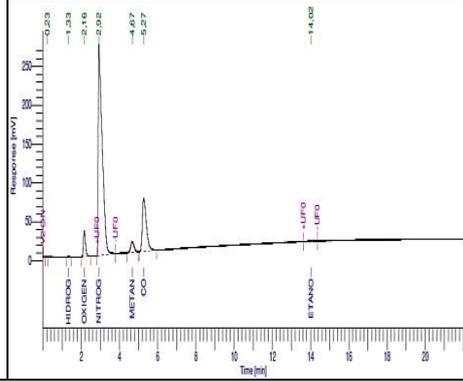
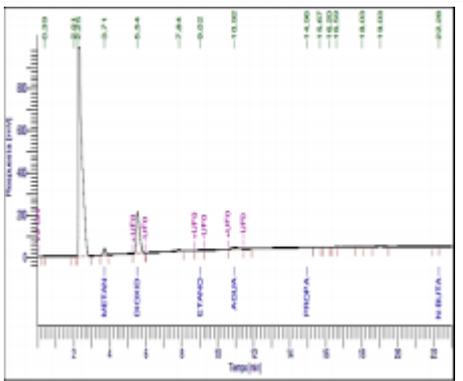
Poder calorífico inferior

$$\begin{aligned} \text{PCI} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (m_{\text{H}_2} \times 28642) + (m_{\text{CH}_2} \times 11940) + (m_{\text{CO}} \times 2412) \\ &\quad + (m_{\text{C}_2\text{H}_6} \times 11336) + (m_{\text{N}_2} \times 11065) \\ &\quad + (m_{\text{CO}_2} \times 11527) + (m_{\text{O}_2} \times 11260) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PCI} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (6,48 \times 28642) + (2,19 \times 11940) + (13,81 \times 2412) \\ &\quad + (0,07 \times 11336) + (53,39 \times 11065) \\ &\quad + (19,97 \times 11527) + (2,87 \times 11260) \end{aligned}$$

$$\text{PCI} = 1099,12 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right)$$

Tabla 4-3: Resultado de la tercera gasificación

INFORMACION CLIENTE				
Cliente / Empresa:	Cesar Liroy Cabascango Romero		Persona de contacto:	Ing. Marco Santillan
Dirección / Telf.:	Av. 11 de Noviembre y Francisco Hall / 0963355603		E-mail:	cesar.cabascango@espoch.edu.ec
PARAMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-023-53-03		Fecha de muestreo:	12/7/2023
Tipo de muestra:	Gas de síntesis de trozos de madera de eucalipto 3		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar		Fecha inicio del ensayo:	20/7/2023
Fecha de recepción:	13/7/2023		Fecha entrega informe:	28/7/2023
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	17,0 °C	30,0 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía
Temperatura y Presión de muestra:	64,5 °F	0,7 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01
	18,1 °C	4895,3 Pa		PE-7.2-02
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENT E		% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno		6,51	0,052
	Oxígeno		3,13	0,064
	Nitrógeno		50,61	0,306
	Monóxido de carbono		17,83	0,074
	Metano		2,08	0,009
	Dióxido de carbono		18,58	0,131
	Etano		0,12	0,001
Agua		1,03	0,034	
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,01	
	Peso molecular promedio [g/mol]		29,18	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,23	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		3912,68	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		3677,44	
Factor de compresibilidad (z)		1,0000		
CROMATOGRAMA			MUESTRA	
				
<p>Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y monóxido de carbono)</p>			<p>Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)</p>	
DECLARATORIAS	<p>* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.</p>			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.			

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

4.3. Cálculos del poder calorífico del syngas de las 3 gasificaciones

4.3.1. Cálculo del poder calorífico del syngas obtenido de la primera gasificación

Las ecuaciones siguientes se emplean para calcular el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI) del syngas.

Poder calorífico superior

$$\begin{aligned} \text{PCS} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (m_{\text{H}_2} \times 33900) + (m_{\text{CH}_2} \times 13249) + (m_{\text{CO}} \times 2412) \\ &\quad + (m_{\text{C}_2\text{H}_6} \times 12384) + (m_{\text{N}_2} \times 12018) \\ &\quad + (m_{\text{CO}_2} \times 11929) + (m_{\text{O}_2} \times 12009) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PCS} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (6,51 \times 33900) + (2,08 \times 13249) + (17,83 \times 2412) \\ &\quad + (0,12 \times 12384) + (50,61 \times 12018) \\ &\quad + (18,58 \times 11929) + (3,13 \times 12009) \end{aligned}$$

$$\text{PCS} = 1160,19 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right)$$

Poder calorífico inferior

$$\begin{aligned} \text{PCI} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (m_{\text{H}_2} \times 28642) + (m_{\text{CH}_2} \times 11940) + (m_{\text{CO}} \times 2412) \\ &\quad + (m_{\text{C}_2\text{H}_6} \times 11336) + (m_{\text{N}_2} \times 11065) \\ &\quad + (m_{\text{CO}_2} \times 11527) + (m_{\text{O}_2} \times 11260) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PCI} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) &= (6,51 \times 28642) + (2,08 \times 11940) + (17,83 \times 2412) \\ &\quad + (0,12 \times 11336) + (50,61 \times 11065) \\ &\quad + (18,58 \times 11527) + (3,13 \times 11260) \end{aligned}$$

$$\text{PCI} = 1065,07 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right)$$

4.4. Interpretación de los componentes del syngas

Interpretación de los componentes del syngas obtenido en los cinco procesos de gasificación

Hidrógeno

Tabla 4-4: Hidrógeno

COMPONENTE			
HIDROGENO (H)			
Biomasa	% de mezclas	%Moles	Desv. Std
Eucalipto	100	7.59	0.233
	100	6.48	0.200
	100	6.51	0.052

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Como se observa en la tabla 4-1, el hidrógeno en diferentes porcentajes de moles de las tres mezclas, la primera mezcla tiene el alto porcentaje de hidrogena, según las investigaciones esto nos indica que la primera mezcla se obtiene el mejor syngas.

Oxígeno

Tabla 4-5: Oxígeno

COMPONENTE			
OXIGENO (O)			
Biomasa	% de mezclas	%Moles	Desv. Std
Eucalipto	100	1.63	0.032
	100	2.87	0.070
	100	3.13	0.064

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la tabla 4-3 el oxígeno es un componente muy importante para la calidad del syngas en este caso es el más alto con 3,13 con relación a los otros análisis.

Nitrógeno

Tabla 4-6: Nitrógeno

COMPONENTE			
NITRÓGENO (N)			
Biomasa	% de mezclas	%Moles	Desv. Std
Eucalipto	100	43.03	0.259
	100	53.39	0.419
	100	50.61	0.306

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la tabla 4-2 se puede visualizar los porcentajes de moles del nitrógeno, en la segunda mezcla el nitrógeno tiene un alto de porcentaje de moles. Esto demuestra que la primera mezcla es mejor para producir el syngas.

Monóxido de carbono

Tabla 4-7: Monóxido de carbono

COMPONENTE			
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)			
Biomasa	% de mezclas	%Moles	Desv. Std
Eucalipto	100	22.63	0.025
	100	13.81	0.075
	100	17.83	0.074

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la siguiente tabla se puede notar al monóxido de carbono con distintos porcentajes de moles, en la primera combinación del aserrín con la cascarilla de arroz, tiene el alto CO con valor de 22.63

Metano

Tabla 4-8: Metano

COMPONENTE			
METANO (CH4)			
Biomasa	% de mezclas	%Moles	Desv. Std
Eucalipto	100	3.44	0.050
	100	2.19	0.021
	100	2.08	0.009

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

La tabla 4-8 muestra diferentes porcentajes de metano, la mezcla de 100 de la primera gasificación tiene el alto porcentaje de moles con valor de 3.44, esto nos indica que de la gasificación se obtuvo buen syngas.

Dióxido de carbono

Tabla 4-9: Dióxido de carbono

COMPONENTE			
DIÓXIDO DE CARBONO (CO2)			
Biomasa	% de mezclas	%Moles	Desv. Std
Eucalipto	100	20.45	0.280
	100	19.97	0.216
	100	18.58	0.131

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Etano

Tabla 4-10: Etano

COMPONENTE			
ETANO (C ₂ H ₆)			
Biomasa	% de mezclas	%Moles	Desv. Std
Eucalipto	100	0.15	0.004
	100	0.07	0.005
	100	0.12	0.001

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

En la tabla 4-10 indica el componente metano con diferentes valores de moles en porcentaje, la primera gasificación tiene el alto porcentaje de moles de 0.15 que las otras mezclas.

Agua

Tabla 4-11: Agua

COMPONENTE			
AGUA (H ₂ O)			
Biomasa	% de mezclas	%Moles	Desv. Std
Eucalipto	100	0.98	0.048
	100	0.72	0.046
	100	1.03	0.034

Realizado por: Barba, J; Cabascango, C., 2023

Tabla 4-11 muestra el porcentaje de agua obtenido mediante el análisis cromatografía, en este caso la tercera gasificación tiene el alto porcentaje de agua con un valor de 1.03. esto demuestra que el syngas es bueno por lo que sí está en el rango aceptable.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El gasificador tipo downdraft nos ayudó en progresar significativamente en la transformación de la biomasa utilizada en la creación de gases de combustión. Su eficacia y su capacidad de elaborar gas de síntesis con una gran concentración de monóxido de carbono lo transforma en una tecnología óptima en la generación de energía y elaboración de combustibles sostenibles.

Se requiere un equilibrio cuidadoso entre varios factores claves para garantizar condiciones operativas óptimas en el gasificador downdraft con el fin de producir gas de síntesis de alta calidad. En primer lugar, se debe mantener una temperatura de gasificación suficiente, normalmente entre 750 °C y 1000 °C aproximadamente, para promover la reacción de conversión deseada. Además, el control del suministro de oxígeno es esencial para evitar la formación excesiva de subproductos no deseados, la selección y preparación adecuada de biomasa o materias primas de alta calidad garantiza una alimentación uniforme y reduce la formación de alquitrán y cenizas.

El análisis termodinámico del gasificador tipo downdraft, mediante el análisis químico de los gases y sólidos producidos durante el proceso, ha arrojado datos alentadores sobre la eficiencia y la calidad del gas de síntesis obtenido tanto en los datos de balance masico y energético. Este enfoque nos permite comprender mejor las reacciones que ocurren durante la gasificación y evaluar la composición y propiedades del gas resultante. Utilizando este método, se podrían establecer parámetros claves para optimizar el rendimiento del gasificador ajustando variables como la temperatura, la relación aire-combustible y la selección de materia prima.

El balance de masa y energía durante la producción de gas, combinado con una estimación de la cantidad de energía perdida en forma de calor a través de mediciones de la temperatura de los gases de combustión, proporciona información sobre el rendimiento y eficiencia dentro del proceso, datos necesarios para cuantificar la proporción de energía contenida en el gas capturado y cómo se distribuye esta energía entre el beneficio deseado y las inevitables pérdidas.

5.2. Recomendaciones

La biomasa utilizada se debe encontrar con un porcentaje de entre el 10% al 15% de humedad, esto debido a que si cuenta con un porcentaje de humedad superior a esos valores va a complicar una correcta gasificación.

Tener una correcta implementación de EPP (Equipos de Protección Personal) ya que al realizar la gasificación interviene factores que pueden provocar lesiones como quemaduras por el calor generado o a su vez asfixias por el gas que produce a quienes estén realizando la práctica de la obtención de gas.

Hay que considerar circunstancias como la calidad y disponibilidad de la biomasa, la eficiencia energética y la calidad del gas obtenido, así mismo tener una toma de datos adecuados cada 10 a 15 minutos estos pueden ser la temperatura, el caudal del gas de salida, la masa de biomasa, el alquitrán, y las cenizas ya que estos van a ser de importancia al momento de realizar cálculos.

Tomar en cuenta las condiciones ambientales al momento de realizar la gasificación, están pueden influenciar al momento de encender el material, así mismo tener un correcto aislamiento para que no haya lugar por donde pueda escapar el gas generado con el fin de obtener toda la muestra posible en la tubería de salida.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ALEGRÍA, P.** *Identificación y control De Un Gasificador De Lecho Fluidizado. Universidad de Piura* [en línea] 2017. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11042/2896>.
2. **ÁLVAREZ, A et al.** *Caracterización química de biomasa Y Su Relación con el poder calorífico. Universidad de Oviedo*, 2012. pp. 1-12.
3. **ARIAN.** *¿Qué son y cómo funcionan las termocupla? Arian S.A Santiago de Chile* [en línea], 2013. pp. 10. Disponible en: <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>.
4. **ARISTIZÁBAL, M. y VALENCIA, L.** *Diseño conceptual de un gasificador para la producción de gas de síntesis a partir de residuos de poda generados en la universidad EAFIT. Universidad Eafit* [en línea] 2015, pp. 76. Disponible en: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/8277/Marcela_AristizabalAlvarez_Liliana_ValenciaNaranjo_2015.pdf?sequence=2%0Ahttps://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/8277/Marcela_AristizabalAlvarez_Liliana_ValenciaNaranjo_2015.
5. **ARROYO, J.** *Implementación de un método para la identificación de clenbuterol por cromatografía de gases acoplado al espectrómetro de masas en el Departamento de Toxicología, Escuela de Química Farmacéutica. Técnica Pecuaria en México*, 2018. pp. 57-67.
6. **BAI, Z et al.** *A polygeneration system for the methanol production and the power generation with the solar–biomass thermal gasification. Energy Conversion and Management*, 2015. pp. 190-201.
7. **BAILEY, M.** *Biomass Gasification - Technology and utilisation.* 1977.
8. **BASU, P.** *Pyrolysis and torrefaction* [en línea] 2010. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00003-9>.
9. **BERMUDEZ, A. y BOGOTÁ, A.** *Banco de pruebas para la caracterización de los diferentes tipos de sensores de temperatura. instname:Universidad Pontificia Bolivariana* [en línea], 2008. Disponible en:

<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/397>.

10. **BERMUDEZ, L.** *Simulación numérica tridimensional de un gasificador de flujo de arrastre de carbón mediante un modelo euleriano.* 2013.
11. **CARRASCO, L.** *Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis* [en línea] 2015. Disponible en: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:EM+Demystified:+An+Expectationmaximization+Tutorial#0%0Ahttps://www2.ee.washington.edu/techsite/papers/documents/UWEETR20100002.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/srep22311%0Ahttp://www.life.umd.ed>.
12. **ESTRADA, C. y ZAPATA, A.** *Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor.* 2004.
13. **FERNÁNDEZ, M.** *La energía de la biomasa.* 1994.
14. **HERRERA, R.** *Análisis térmico de un Gasificador Tipo Downdraft Al Combustionar Residuos Forestales.* Escuela Superior Politecnica De Chimborazo, 2019. pp. 105.
15. **JÁCOME, G. y LANAS, J.** *Evaluación termodinámica, y simulación del comportamiento de un gasificador tipo “downdraft” al combustionar madera (eucalipto), rechazos de café y cacao.* 2016.
16. **JILLES, P.** *Application of low calorific value gaseous fuels in gas turbine combustors.* *Renewable Energy*, 1999. pp. 248-254.
17. **LEMAITRE, G et al.** *Social dimensions of economic development and productivity: inequality and social performance.* 1999. pp. 77.
18. **MARTILLO, J et al.** *Estudios paramétricos de la gasificación de la tusa de maíz en gasificadores downdraft.* *Tecnología Química* [en línea] 2019. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v39n2/2224-6185-rtq-39-02-455.pdf>.
19. **MONCAYO, W.** *Determinación de etanol mediante cromatografía de gases, en muestras de sangre de víctimas sometidas a delitos sexuales en la provincia de chimborazo, durante el periodo de octubre 2020 a octubre de 2021.* 2022.
20. **OROZCO, L.** *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] 2017, pp. 244. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18894/1/CD-8286.pdf%0Ahttp://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18894%0Ahttp://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18894/1/CD-8286.pdf>.

21. **PICO, J et al.** *Modelado por técnicas de regresión de los parámetros energéticos de desempeño para gasificadores tipo downdraft.* *Revista de Ingeniería Energética*, 2019. pp. 138-147.
22. **RESTREPO, A et al.** *Diseño, construcción y evaluación de un equipo para el calentamiento de agua mediante la combustión de la cascarilla de arroz.* *Universidad Tecnológica de Pereira Colombia*, 2004.
23. **RLC.** *La Bioenergía en América Latina y El Caribe. El estado de arte en países seleccionados* [en línea]. 2013. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-as112s.pdf>.
24. **RODRIGUEZ, N. y PLAZAS, E.** *Análisis operativo de un gasificador downdraft de residuo maderable.* 2022., pp. 5.
25. **SHARMA, A.** *Experimental investigations on a 20 kWe, solid biomass gasification system.* *Biomass and Bioenergy*, 2011, pp. 421-428.
26. **SIMS, R.** *Bioenergy options for a cleaner environment.* 2003.
27. **THIRUGNANASAMBANDAM, M.** *A review of solar thermal technologies.* *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010.
28. **VARGAS, Y et al.** *Biomass potential in south America for the production of bioplastics.* *Revista Politecnica*, 2021, pp. 7-20.
29. **VICENTE, P et al.** *Estudio experimental de gasificación en un gasificador downdraft prototipo.* *Universidad Nacional de Salta*, 2016, pp. 63-73.
30. **VILLACIS, D.** *Diseño de un Sistema para la Obtención del Gas Pobre en el Gasificador Downdraft de la Escuela de Ingeniería Mecánica* [en línea] 2016. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/4944/1/15T00631.pdf>.

ANEXOS

ANEXO A: INSTALACIÓN DE PLACAS PARA NUEVAS TERMOCUPLAS.





ANEXO B: INSTALACIÓN DEL NUEVO CABLE TIPO K.



ANEXO C: INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA



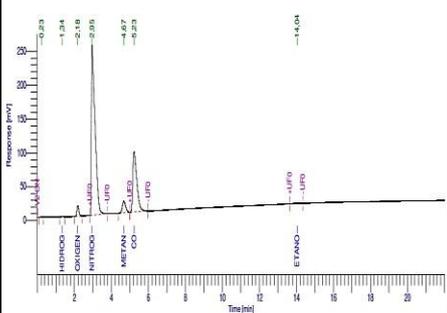
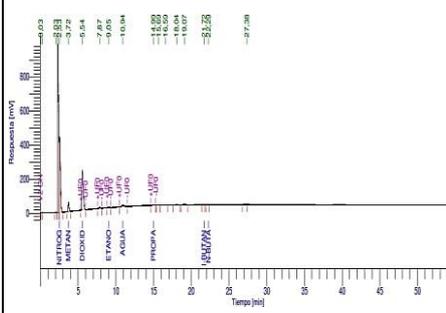
ANEXO D: CONEXIÓN DEL CABLE TIPO K EL CONTROLADOR DE TEMPERATURA.



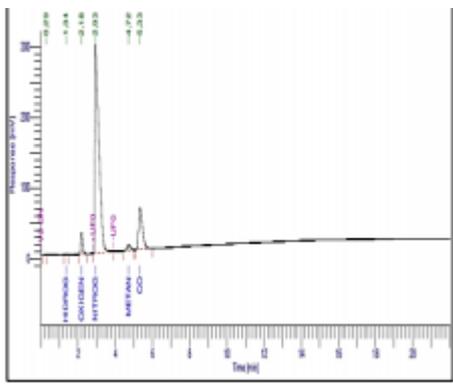
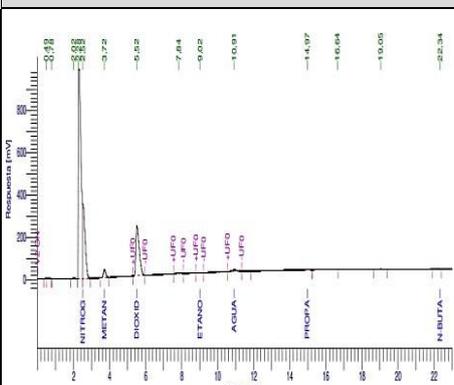
ANEXO E: PRUEBA DE LOS CONTROLADORES Y TERMOCUPLAS



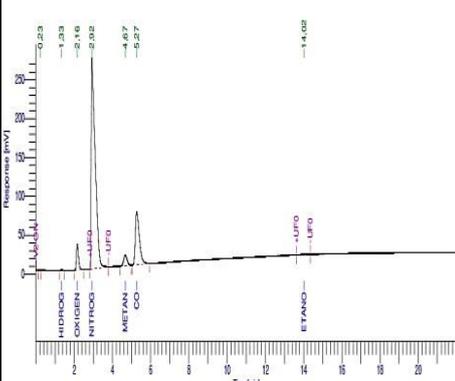
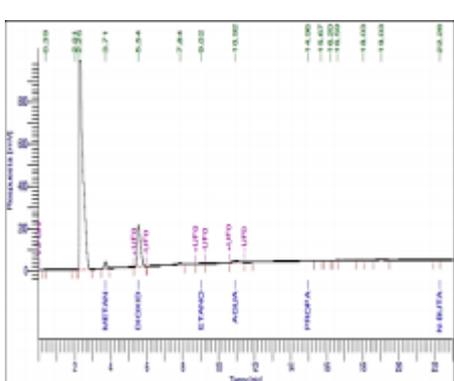
ANEXO F: DATOS CROMATO-LÓGICOS DE LA PRIMERA GASIFICACIÓN.

INFORMACIÓN CLIENTE				
Cliente / Empresa:	Cesar Liroy Cabascango Romero	Persona de contacto:	Ing. Marco Santillan	
Dirección / Telf.:	Av. 11 de Noviembre y Francisco Hall / 0963355603	E-mail:	cesar.cabascango@epoch.edu.ec	
PARÁMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-023-53-01	Fecha de muestreo:	12/7/2023	
Tipo de muestra:	Gas de síntesis de trozos de madera de eucalipto 1	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente	
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar	Fecha inicio del ensayo:	14/7/2023	
Fecha de recepción:	13/7/2023	Fecha entrega informe:	28/7/2023	
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	21,1 °C	31,0 %	Norma de referencia: ASTM D 1945: Cromatografía	
Temperatura y Presión de muestra:	64,5 °F	0,7 psi	Procedimiento interno: PE-7.2-01 PE-7.2-02	
	18,1 °C	4895,3 Pa		
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno		7,59	0,233
	Oxígeno		1,63	0,032
	Nitrógeno		43,03	0,259
	Monóxido de carbono		22,63	0,025
	Metano		3,44	0,050
	Dióxido de carbono		20,45	0,280
	Etano		0,15	0,004
Agua		0,98	0,048	
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,00	
	Peso molecular promedio [g/mol]		28,98	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,22	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		5126,67	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		4821,07	
	Factor de compresibilidad (z)		1,0000	
CROMATOGRAMA			MUESTRA	
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y monóxido de carbono)		Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)		
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.			

ANEXO G: DATOS CROMATO-LÓGICOS DE LA SEGUNDA GASIFICACIÓN.

INFORMACIÓN CLIENTE				
Cliente / Empresa:	Cesar Liroy Cabascango Romero	Persona de contacto:	Ing. Marco Santillan	
Dirección / Telf.:	Av. 11 de Noviembre y Francisco Hall / 0963355603	E-mail:	cesar.cabascango@epoch.edu.ec	
PARÁMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-023-53-02	Fecha de muestreo:	12/7/2023	
Tipo de muestra:	Gas de síntesis de trozos de madera de eucalipto 2	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente	
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar	Fecha inicio del ensayo:	19/7/2023	
Fecha de recepción:	13/7/2023	Fecha entrega informe:	28/7/2023	
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	21,0 °C 29,0 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía	
Temperatura y Presión de muestra:	64,5 °F 0,7 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01	
	18,1 °C 4895,3 Pa		PE-7.2-02	
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno		6,48	0,200
	Oxígeno		2,87	0,070
	Nitrógeno		53,39	0,416
	Monóxido de carbono		13,81	0,075
	Metano		2,19	0,021
	Dióxido de carbono		19,97	0,216
	Etano		0,07	0,005
Agua		0,72	0,046	
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,02	
	Peso molecular promedio [g/mol]		29,47	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,24	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		3776,43	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		3518,62	
	Factor de compresibilidad (z)		1,0000	
CROMATOGRAMA			MUESTRA	
				
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y monóxido de carbono)			Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)	
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.			

ANEXO H: DATOS CROMATO-LÓGICOS DE LA TERCERA GASIFICACIÓN.

INFORMACIÓN CLIENTE			
Cliente / Empresa:	Cesar Liroy Cabascango Romero	Persona de contacto:	Ing. Marco Santillan
Dirección / Telf.:	Av. 11 de Noviembre y Francisco Hall / 0963355603	E-mail:	cesar.cabascango@esPOCH.edu.ec
PARÁMETROS DE LA MUESTRA			
Identificación:	M-LAI-023-53-03	Fecha de muestreo:	12/7/2023
Tipo de muestra:	Gas de síntesis de trozos de madera de eucalipto 3	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar	Fecha inicio del ensayo:	20/7/2023
Fecha de recepción:	13/7/2023	Fecha entrega informe:	28/7/2023
CONDICIONES DE TRABAJO			
Temperatura y %HR ambiente:	17,0 °C 30,0 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía
Temperatura y Presión de muestra:	64,5 °F 0,7 psi 18,1 °C 4895,3 Pa	Procedimiento interno:	PE-7.2-01 PE-7.2-02
RESULTADOS			
COMPOSICIÓN	COMPONENTE	% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno	6,51	0,052
	Oxígeno	3,13	0,064
	Nitrógeno	50,61	0,306
	Monóxido de carbono	17,83	0,074
	Metano	2,08	0,009
	Dióxido de carbono	18,58	0,131
	Etano	0,12	0,001
PROPIEDADES	Agua	1,03	0,034
	Densidad relativa	1,01	
	Peso molecular promedio [g/mol]	29,18	
	Densidad de la muestra (g/L)	1,23	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]	3912,68	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]	3677,44	
Factor de compresibilidad (z)	1,0000		
CROMATOGRAMA		MUESTRA	
			
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y monóxido de carbono)	Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)		
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.		
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.		

ANEXO I: TABLA DE GAS IDEAL

TABLA A-17

Propiedades de gas ideal del aire

<i>T</i>	<i>h</i>	<i>P_r</i>	<i>u</i>	<i>v_r</i>	<i>s^o</i>	<i>T</i>	<i>h</i>	<i>P_r</i>	<i>u</i>	<i>v_r</i>	<i>s^o</i>
K	kJ/kg		kJ/kg		kJ/kg · K	K	kJ/kg		kJ/kg		kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.44	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75105	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						