



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Validación experimental del prototipo de gasificador de
biomasa de lecho fluidizado tipo burbujeante instalado en
la Universidad de Piura**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Hugo Gabriel Valdiviezo Córdova

Asesor(es):

Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana

Dr. Ing. Raúl La Madrid Olivares

Piura, noviembre de 2023

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Hugo Gabriel Valdiviezo Córdova, egresado del Programa Académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 72563348.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
“Validación experimental del prototipo de gasificador de biomasa de lecho fluidizado tipo burbujeante instalado en la Universidad de Piura”
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis¹ para optar el Título profesional² de Ingeniero Mecánico-Eléctrico.
2. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - Mario Daniel Marcelo Aldana, identificado con DNI N° 02850726
 - Raúl La Madrid Olivares, identificado con DNI N° 43356179
3. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
4. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
5. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
6. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 18/10/2023.



.....
Firma del autor optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

³ Idéntica al DNI; no se admite digital, salvo certificado.

Dedicatoria

A mi Padre celestial que siempre me bendice a pesar de mis debilidades.

A mi madre porque siempre tuvo esperanza en mí, a mi padre que me guía en el cielo, a mi hermana y a mis familiares que siempre me brindaron ayuda para seguir adelante.

A los ingenieros Mario Daniel Marcelo Aldana, Raúl La Madrid Olivares y Elder Marino Mendoza Orbegozo por brindarme la oportunidad de participar en el proyecto de investigación y ayudarme durante el desarrollo del mismo.



Resumen

En el marco investigativo de análisis de fuentes de energía renovable, la gasificación es una de las tecnologías con gran avance para obtener productos de gran potencial energético, tal es el caso del hidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos generados por la agroindustria local. La presente tesis denominada validación experimental del prototipo de gasificador de biomasa de lecho fluidizado tipo burbujeante instalado en la Universidad de Piura, tiene el propósito de validar de manera experimental la repotenciación del gasificador Udep.

El desarrollo inicial de la tesis tomó como referencia el diseño del Up Grade, realizando después el montaje de los sistemas auxiliares: el sistema de alimentación, el sistema de fluidización, el sistema de gasificación propiamente dicho, así como también el sistema de adquisición de datos e instrumentación. Determinándose que el material inerte, arena de río tamizada con un rango de medida de granulometría, permite la fluidización de tipo burbujeante. Se verificó que gasificar biomasa local: la cascarilla de café, cascarilla de cacao y cáscara de arroz son las apropiadas para el correcto funcionamiento del sistema de alimentación.

Durante la realización del proyecto se llevaron a cabo pruebas de fluidización en las cuales se reconoció un fenómeno denominado histéresis, así mismo, se obtuvo la mínima frecuencia que debe girar el blower para producir fluidización tipo burbujeante. En la gasificación en inerte se verificó el aumento de temperatura en el lecho y la capacidad de calentamiento durante la fluidización turbulenta. Se analizaron los peligros y evaluación de riesgos del sistema a fin de que tanto operadores del gasificador como visitantes puedan poner en práctica medidas de seguridad.

En esta investigación comparando los resultados de proyectos anteriores del gasificador, con el actual, se valida la ingeniería de diseño y el análisis para su repotenciación; concluyendo que el gasificador Udep cumple con el propósito de generar gas de síntesis para el estudio de su composición.

Tabla de contenido

Introducción.....	10
Capítulo 1 Antecedentes	11
1.1 La Biomasa	11
1.2 La tecnología de gasificación	12
1.2.1 Fluidización.....	12
1.2.2 Gasificación	13
1.3 Syngas	16
1.4 Gasificador Udep.....	17
Capítulo 2 Descripción de la repotenciación del gasificador Udep.....	21
2.1 Justificación de la repotenciación del gasificador	21
2.2 Descripción de sistemas.....	21
2.2.1 Sistema de fluidización.....	21
2.2.2 Sistema de alimentación de Biomasa	23
2.2.3 Sistema de gasificación	24
2.3 Materiales	26
2.3.1 Material inerte	26
2.3.2 Biomasa.....	27
2.4 Instrumentación.....	27
Capítulo 3 Montaje de sistemas mecánicos y equipos de medición	29
3.1 Montaje de sistemas mecánicos.....	29
3.1.1 Montaje del reactor	29
3.1.2 Montaje de la estructura	29
3.1.3 Montaje del sistema de fluidización	30
3.1.4 Montaje del sistema de alimentación.....	31
3.2 Montaje de sistemas de medición del gasificador	32
3.2.1 Montaje del sistema de medición de temperatura	32
3.2.2 Montaje de medición de la velocidad del aire.....	33
3.3 Elaboración de protocolo de adquisición de datos del sistema	34
3.3.1 Sistema de adquisición de datos.....	34
3.3.2 Protocolo de adquisición de datos.....	37
3.4 Identificación de Peligros, evaluación y control de riesgos del sistema	38
Capítulo 4 Pruebas y resultados	40
4.1 Ensayos realizados	40
4.1.1 Fluidización.....	40
4.2 Resultados.....	42
4.2.1 Lecho fluidizado tipo burbujeante	42
4.2.2 Dosificación de biomasa	43
4.3 Perfil de temperaturas del reactor	44

Conclusiones 46
Recomendaciones 47
Referencias 48
Apéndices..... 49
Apendice A Mapa de riesgo del gasificador 50



Lista de tablas

Tabla 1	Principales productos gaseosos y condiciones de proceso de pirólisis de principales componentes de biomasa.	15
Tabla 2	Tipos de procesos de pirólisis, según las condiciones del proceso y la distribución de los productos.	15
Tabla 3	Matriz IPERC del gasificador.	39



Lista de figuras

Figura 1	Esquema de generación de Biomasa Local.	11
Figura 2	Gráfico de participación de las fuentes en la producción interna de energía primaria 2020	12
Figura 3	Esquema simplificado de fluidización de un sólido.....	12
Figura 4	Esquema del proceso de fluidización del material inerte en el gasificador.....	13
Figura 5	Esquema del proceso de gasificación.....	14
Figura 6	Esquema simplificado del contenido de syngas.....	16
Figura 7	Figura del gasificador en sus inicios.	18
Figura 8	Figura del gasificador en fase de pruebas.....	19
Figura 9	Diseño del gasificador en la etapa final.....	20
Figura 10	Esquema de la placa distribuidora.	22
Figura 11	Datos del blower (soplador).....	22
Figura 12	Esquema real del sistema de fluidización.	23
Figura 13	Esquema del sistema de alimentación.....	23
Figura 14	Esquema real del sistema de alimentación.....	24
Figura 15	Esquema del reactor del gasificador.....	24
Figura 16	Esquema del ciclón del gasificador.....	25
Figura 17	Esquema del quemador.....	25
Figura 18	Tipos de arena comercial que se encuentra en venta de agregados.....	26
Figura 19	Obtención de material inerte para fluidización.	26
Figura 20	Tablero de general del gasificador.	27
Figura 21	Secuencia del montaje del reactor.....	29
Figura 22	Instalación de las vigas del mezanine.....	30
Figura 23	Instalación de las planchas de metal.....	30
Figura 24	Instalación de la escalera metálica.....	30
Figura 25.	Sistema del blower	31
Figura 26	Instalación del sistema de alimentación.....	31
Figura 27	Instalación de motores, cajas reductoras, sistema de transmisión.....	32
Figura 28	Instalación de tolva	32
Figura 29	Montaje de sensores de temperatura	33
Figura 30	Instalación del medidor de velocidad del aire.	33
Figura 31	Pantalla principal del software del gasificador	34
Figura 32	Ventana estado trituradora.....	35
Figura 33	Ventana estado blower.	35
Figura 34	Interfaz del quemador.....	36
Figura 35	Ventana estado tornillo.....	36
Figura 36	Ventana estado alimentador.....	37
Figura 37	Interfaz de calibración de sensores de temperatura, presión y flujo.	37

Figura 38	Vertiendo material inerte en el reactor para las pruebas.....	40
Figura 39	Gráfico de la velocidad del aire vs frecuencia del blower ascendente.....	41
Figura 40	Gráfico de la velocidad del aire vs frecuencia del blower descendente.....	41
Figura 41	Figura del estado de la mínima fluidización y lecho fijo.....	42
Figura 42	Fluidización del tipo burbujeante del lecho del gasificador.....	42
Figura 43	Atascamiento de la biomasa en el ducto de alimentación.....	43
Figura 44	Flujo de biomasa en el tornillo sin fin.....	44
Figura 45	Flujo de biomasa en el sistema de alimentación.....	44
Figura 46	Calentamiento del lecho en fluidización burbujeante turbulenta.....	45



Introducción

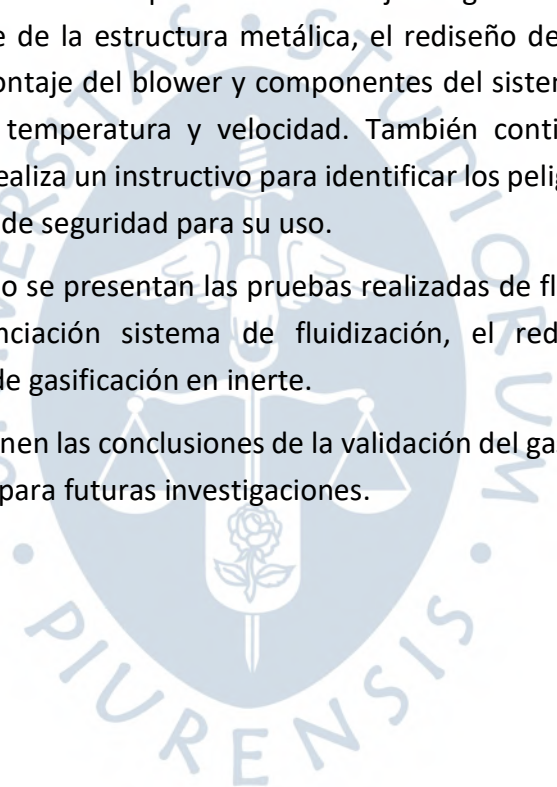
En la investigación se desarrolla un procedimiento para la validación experimental de la repotenciación del gasificador de la Universidad de Piura. La estructura que sigue, comienza en el primer capítulo que presenta los antecedentes que fundamentan la investigación, citando a nivel histórico desde sus inicios hasta la actualidad.

En el capítulo dos se describe el sistema de alimentación, el sistema de fluidización, el sistema de gasificación, los materiales y los equipos de medición que se utilizarán en la adquisición de datos.

En el capítulo tres se detalla el proceso de montaje del gasificador repotenciado, en el cual se expone el montaje de la estructura metálica, el rediseño de escalera de acceso, el montaje del reactor, el montaje del blower y componentes del sistema de fluidización, y, el montaje los sensores de temperatura y velocidad. También contiene el protocolo para adquisición de datos y se realiza un instructivo para identificar los peligros, evaluar los riesgos y recomendar las medidas de seguridad para su uso.

En el último capítulo se presentan las pruebas realizadas de fluidización, se valida los resultados de la repotenciación sistema de fluidización, el rediseño del sistema de alimentación y el sistema de gasificación en inerte.

Finalmente se exponen las conclusiones de la validación del gasificador y se presentan algunas recomendaciones para futuras investigaciones.



Capítulo 1 Antecedentes

1.1 La Biomasa

La biomasa es materia orgánica, que tiene el potencial de convertirse en energía de calidad para uso y comercialización. Esta es considerada el combustible con gran potencial para el futuro debido principalmente a que se aprovechan los residuos sólidos agrícolas, forestales, industriales, ganaderas y urbanas.

Según el Ministerio del ambiente, en el año 2019, a nivel nacional, se generaron 7.8 millones de toneladas de residuos sólidos municipales. De ese total, 1.8 millones fueron inorgánicos (22.49 %) y 4.3 millones fueron de tipo orgánico (54.64 %). El 77.13 % de lo generado puede ser valorizable (Ministerio del Ambiente, 2019).

En presente proyecto de investigación utilizaremos cascarilla de café, bagazo de caña de azúcar, cáscara de cacao y cáscara de arroz ya que son residuos sólidos orgánicos que habitualmente se encuentran en comunidades agrícolas cercanas (Figura 1). La biomasa actualmente es aprovechada en la combustión, digestión anaerobia y gasificación, básicamente para producir calor y posteriormente transformarla en electricidad.

Figura 1

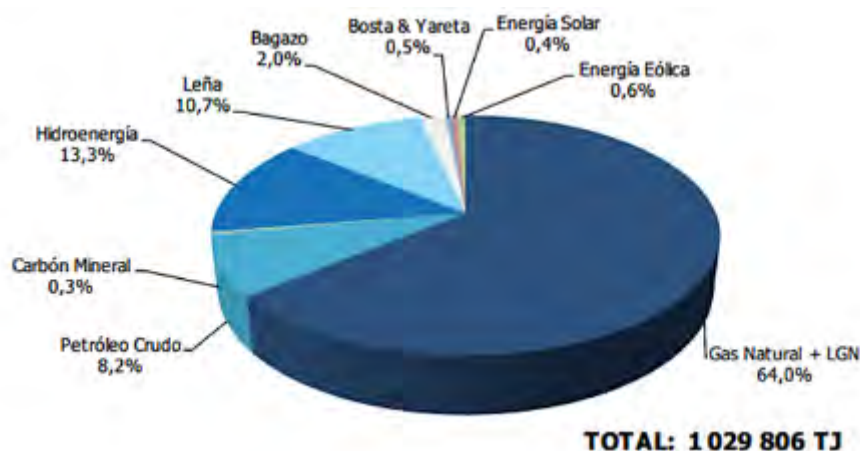
Esquema de generación de Biomasa Local.



En el año 2013 el bagazo representaba 0.49% de la participación entre las fuentes de producción de electricidad y el biogás 0.08% (Ministerio del Ambiente, 2019, pág. 50). En el 2020 el bagazo tiene la participación del 2.0% de las fuentes en la producción interna de energía Primaria (Ver Figura 2) mostrando un crecimiento en el uso de biomasa en el Perú; sin embargo, es un crecimiento lento. Se puede corroborar un avance de la investigación en esta área con varios proyectos en desarrollo, tales como, North Fork en Estados Unidos, Belišće MDC en Croacia y Larisa en Grecia.

Figura 2

Gráfico de participación de las fuentes en la producción interna de energía primaria 2020



Nota. Adaptado de Balance Nacional de Energía (2018)

1.2 La tecnología de gasificación

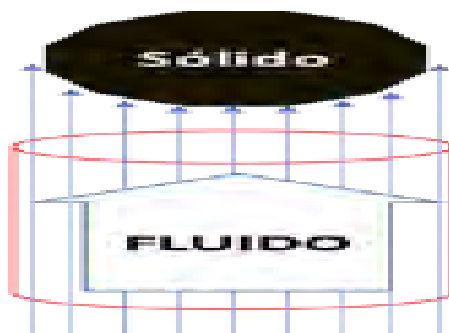
La gasificación es un proceso termoquímico en que la biomasa, el material con contenido de carbono, se transforma en un gas combustible en presencia de un agente gasificante de cantidades de oxígeno menores a las requeridas estequiométricamente.

1.2.1 Fluidización

La fluidización sucede cuando partículas sólidas considerablemente pequeñas son suspendidas por el flujo de un fluido que en dirección de abajo hacia arriba vence el peso de las partículas (Ver figura 3). El agente gasificante puede ser un líquido o un gas, en el caso específico del gasificador UDEP se utilizará aire como medio fluidizante. La fluidización es el proceso que consiste en dar el comportamiento de fluido a la arena que está en la placa de distribución de aire.

Figura 3

Esquema simplificado de fluidización de un sólido.

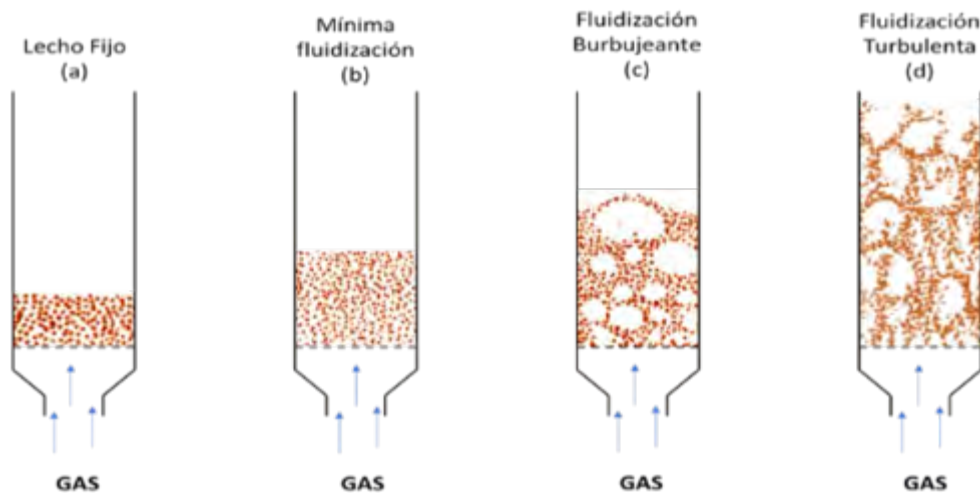


De manera experimental durante el proceso de fluidización se inicia con un ingreso de aire a baja velocidad y gradualmente ir incrementándola. Cuando la velocidad del aire es baja

sucede que las partículas se mantienen en su posición inicial, debido a que el fluido se filtra a través de los espacios vacíos entre partículas estacionarias, este estado se denomina Lecho Fijo (Ver figura 4 a), mientras se va incrementando la velocidad del aire, algunas de las partículas comienzan a separarse y otras a vibrar en regiones restringidas, y se continúa aumentando la velocidad del aire se llegará a una velocidad en la que todas las partículas son suspendidas por el fluido, en este momento la fuerza de rozamiento del fluido contrarresta el peso de las partículas, a este estado se denomina Mínima Fluidización (Ver figura 4 b), en este caso se puede apreciar el distanciamiento de las partículas al aumentar la altura del lecho. Cabe señalar que en algunas bibliografías se menciona, que al aumentar la velocidad después de haber alcanzado el estado de mínima fluidización se da una expansión suave y progresiva en el lecho, sin embargo, esto se da cuando el gas es muy denso y las partículas son considerablemente ligeras. Por otro lado, al ir aumentando el flujo, se observa la formación de burbujas y no hay variación considerable en la altura del lecho, a este estado se denomina fluidización burbujeante (Ver Figura 4 c). Continuando con el aumento de velocidad del gas, las burbujas son más grandes y se desplazan vigorosamente, denominándose fluidización turbulenta (Ver Figura 4 d).

Figura 4

Esquema del proceso de fluidización del material inerte en el gasificador.



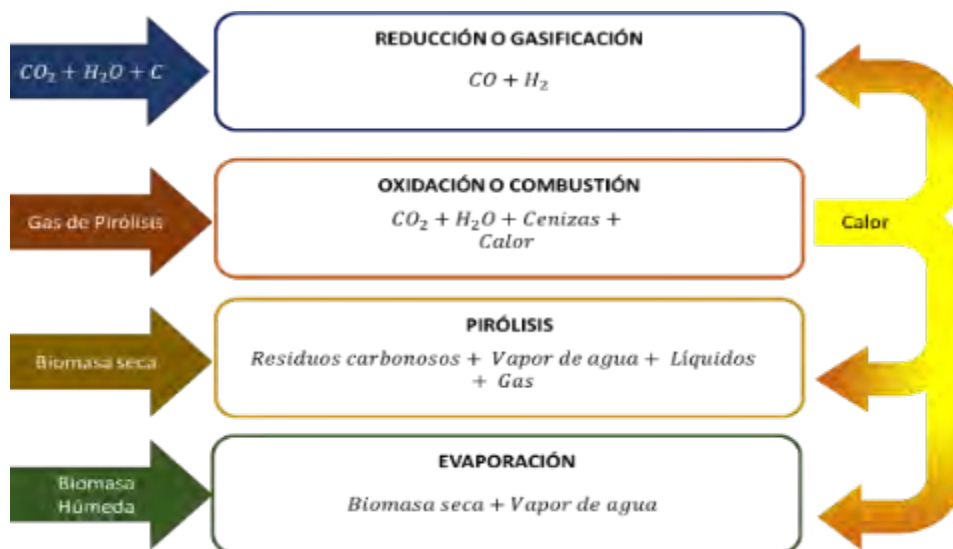
1.2.2 Gasificación

La gasificación es esencialmente la conversión de combustibles sólidos en una mezcla de gases combustibles e impurezas denominado gas de síntesis, en algunas bibliografías se le llama syngas. En el siguiente esquema se resume el proceso de gasificación (Ver Figura 5), el proceso termoquímico inicia con la evaporación de la humedad que hay en la biomasa, posteriormente la biomasa seca se transforma en residuos carbonosos, líquidos combustibles y mezcla de gases, a los que denominaremos gas de pirólisis, los cuales se transforman mediante combustión en dióxido de carbono, vapor de agua, cenizas y al ser un proceso exotérmico se libera calor, sin embargo la esencia del proceso es la gasificación donde el

dióxido de carbono, el vapor de agua y carbono reaccionan endotérmicamente obteniendo monóxido de carbono e hidrógeno.

Figura 5

Esquema del proceso de gasificación



Sin embargo, las reacciones no se realizan secuencialmente, sino que se realizan en simultáneo.

En los siguientes apartados se describen las etapas del proceso de gasificación:

a) Secado o evaporación

El secado de la biomasa se da al ingreso de la biomasa al reactor. La humedad o agua que se encuentra en la biomasa eleva su temperatura hasta que cambia a fase vapor a los 100 °C, después aumenta su temperatura a la máxima temperatura que se encuentra en el reactor.

Este proceso requiere de energía adicional, por lo que no es favorable que la biomasa ingrese húmeda, debiéndose realizar un pre-secado antes de utilizarse en el gasificador.

b) Pirólisis

La biomasa seca continúa un proceso termoquímico donde la estructura molecular de la materia, generalmente orgánica, se descompone en estructuras más pequeñas. Este proceso se realiza con ausencia de Oxígeno, por lo que el producto obtenido depende de la temperatura y la velocidad de calentamiento del reactor. La siguiente tabla se muestra los principales productos gaseosos de los componentes de la biomasa y su temperatura de descomposición.

Tabla 1

Principales productos gaseosos y condiciones de proceso de pirólisis de principales componentes de biomasa.

Componentes de la biomasa	Proporción en la biomasa, %	Temperatura de descomposición, °C	Energía de activación E_a , k.l/mol	Principal producto gaseoso
Celulosa	40-50	250-380	145-285	CO
Hemicelulosa	20-40	200-380	90-125	CO ₂
Lignina	10-25	180-900	30-39	H ₂ , CH ₂

Nota. Adaptado de biomasa lignocelulósica. Parte II: Tendencias en la pirólisis de biomasa (2018, pág. 9)

Según la velocidad de calentamiento y rango de temperatura del reactor, la pirolisis se clasifica en pirolisis lenta, intermedia y rápida. En cada una de estas clasificaciones se generan diferentes porcentajes de gas, líquidos y sólidos.

Tabla 2

Tipos de procesos de pirólisis, según las condiciones del proceso y la distribución de los productos.

Tipo de pirólisis	Temperatura	Velocidad de calentamiento	Tiempo de retención	Bio-char	Bio-oil	Bio-gas
	(°C)	(°C/min)	(s)	(%)	(%)	(%)
Pirólisis lenta	300-400	0,1-2	-1800-2400	>35	>30	>40
Pirólisis intermedia	300-500	300	>5	>25	>75	>20
Pirólisis rápida o flash	400-950	1000	0,03-1,5	>25	<70	>16

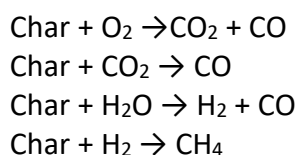
Nota. Adaptado de biomasa lignocelulósica. Parte II: Tendencias en la pirólisis de biomasa (2018, pág. 13)

c) Oxidación o combustión

Los residuos carbonosos reaccionan con el oxígeno del aire que ingresa al reactor entre un rango de temperatura de 600°C y 1400°C. Las reacciones en esta zona son completas e incompletas, liberando energía en forma de calor, produciéndose principalmente monóxido de carbono y dióxido de carbono, adicionalmente el poco oxígeno sobrante, se mezcla con metano e hidrógeno producidos previamente en el proceso de pirólisis y se forma dióxido de carbono y vapor de agua. Se necesita reducir al mínimo la oxidación en el reactor, ya que se requiere mantener la temperatura de las reacciones endotérmicas en el reactor, pues cualquier aumento de temperatura durante el proceso de gasificación sería contraproducente.

d) Reducción o gasificación

Es la parte más importante de la gasificación, donde el residuo carbonoso o Char reacciona con los productos generados con los procesos anteriores y el agente gasificante, dentro de las cuales encontramos las endotérmicas, donde Char reacciona con el dióxido de carbono o vapor de agua, y las exotérmicas donde el Char reacciona con el oxígeno y el hidrógeno. Los productos de las reacciones son monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano.



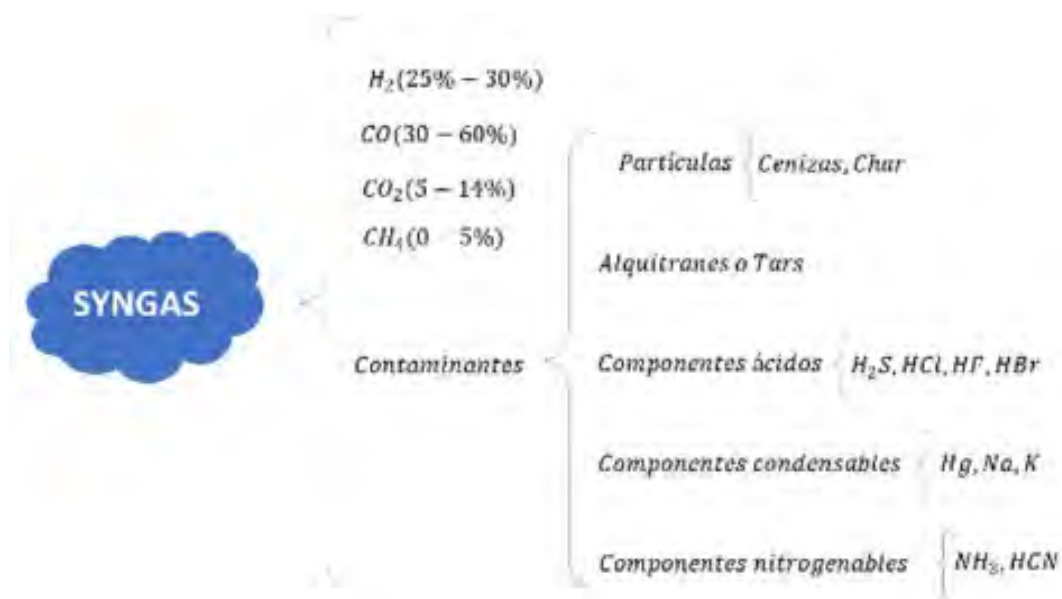
En este proyecto se utiliza aire como agente gasificante lo cual da entender que los gases resultantes sean dióxido de carbono y monóxido de carbono. Sin embargo, debido a que la biomasa tiene un porcentaje de humedad, el vapor que se genera se combina con el char para dar hidrógeno.

1.3 Syngas

El resultado del proceso de gasificación es el syngas, que es la mezcla de varios productos químicos aprovechables, así como también de impurezas. Los productos aprovechables del syngas son el monóxido de carbono, el hidrógeno y el metano que posteriormente se evaluará su aplicación para su transformación en energía térmica. A continuación, se muestra un esquema (Ver figura 6) del contenido del syngas. Dicho contenido varía en función de la biomasa y de la gasificación.

Figura 6

Esquema simplificado del contenido de syngas.



Nota. Adaptado de syngas composition (U.S. Department of Energy)

1.4 Gasificador Udep

En el año 2013 se desarrolla el proyecto “Diseño de un prototipo de gasificador para la evaluación teórica y validación experimental del proceso de gasificación de los residuos de caña de azúcar de la agroindustria del etanol para producción de energía térmica y/o eléctrica”. Este proyecto busca identificar y experimentar la tecnología de gasificación de manera apropiada utilizando los residuos del cultivo de caña de azúcar obteniéndose un valor agregado dada la rentabilidad al generar energía térmica (calor) o electricidad (utilizando el gas en motogeneradores). Siendo el prototipo de gasificador, una muestra, de la mejor alternativa para la gestión apropiada de los residuos.

En la tesis “Análisis de factibilidad para producción de energía utilizando un gasificador de hojas de caña de azúcar” (Estremadoyro, 2015), donde se presenta el diseño y dimensionamiento con un previo análisis de factibilidad, para la producción de energía utilizando residuos de la caña de azúcar.

En el año 2016, se continúa con los proyectos de investigación y se desarrolla el proyecto “Identificación energética de la producción de syngas utilizando un gasificador de lecho fluidizado de diferentes tipos de residuos de biomasa con fines de aprovechamiento térmico o eléctrico”,

A través de esta investigación se desarrolló un prototipo de gasificador de lecho fluidizado que permite el aprovechamiento de la biomasa que a través de procesos de conversión termoquímica se produce gas que puede ser aprovechado para la obtención de energía térmica y/o eléctrica. Este proceso permite reducir las emisiones contaminantes ocasionadas por combustión directa de biomasa.

En la investigación “Desarrollo de una metodología para validación experimental de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante” (García, 2017) se estudia la gasificación en lecho fluidizado burbujeante, diseña e implementa una planta piloto y se realiza una prueba de arranque utilizando hojas de caña de azúcar trituradas como combustible principal para la obtención de un gas de síntesis.

Figura 7

Figura del gasificador en sus inicios.



Nota. Imagen extraída de la tesis “Desarrollo de metodología para validación experimental de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante” (García Valladolid, 2017, pág. 76)

En diciembre del 2019 se inicia el proyecto “Estudio numérico-experimental para la generación de energía limpia con alta eficiencia utilizando residuos sólidos de biomasa y carbón mediante mediciones primarias de monitoreo térmico y diagnósticos de combustión”,

Esta investigación propone enfrentar los desafíos científicos, tecnológicos y económicos para el uso de biomasa, generándose energía con una alta eficiencia energética y baja contaminación, incluyéndose uso de residuos sólidos de biomasa, procesos termoquímicos como: la combustión de biomasa, gasificación de biomasa y cogasificación biomasa/carbón. Esto permite el logro de mejoras en la eficiencia de la generación de energía, producción de biocombustibles por gasificación y su sustentabilidad en el tiempo.

Un año después Suarez-Gil (2018) trabaja la tesis “Desarrollo de metodología para validación experimental de un gasificador utilizando cáscara de café” en el que se plantea el diseño sobre el dimensionamiento del reactor y se realiza una prueba experimental. En la investigación “Estudio del sistema de limpieza de gases de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante” (Chuquilin, 2020), se presenta un análisis de los resultados obtenidos en distintas pruebas del gasificador indicándose las condiciones de operación y rango de componentes que se espera obtener en un gasificador de lecho fluidizado burbujeante, planteándose un sistema de limpieza para el gasificador.

Figura 8

Figura del gasificador en fase de pruebas



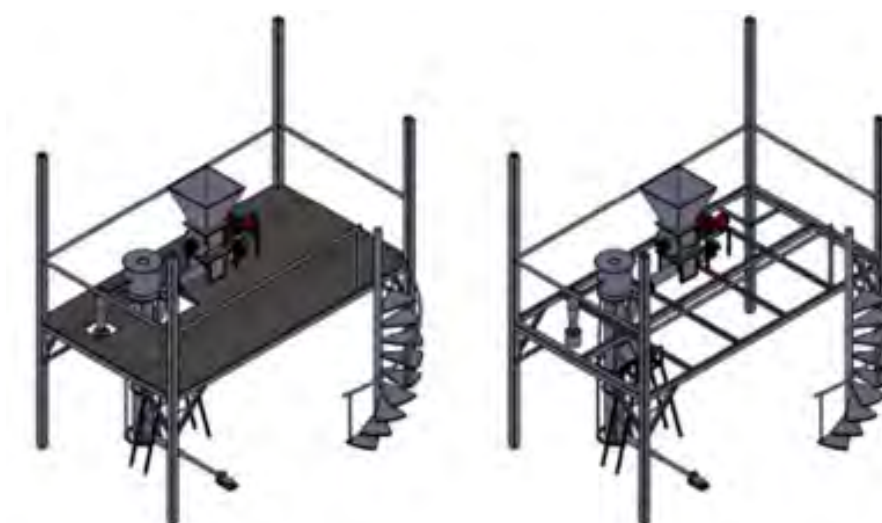
Nota. Extraída de la tesis “Desarrollo de metodología para validación experimental de un gasificador utilizando cáscara de café” (Suárez-Gil, 2018, pág. 61)

En el año 2022 se inicia segunda etapa del gasificador. En la investigación “Modelo matemático de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante” (Merino, 2022) presenta un modelo matemático unidimensional en el reactor para predecir la composición y poder calorífico inferior (PCI) del syngas resultante. En este mismo año, se continua con diseño y modelamiento del gasificador, a través de la investigación “Estudio numérico de la fluidización en inerte de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante” (Labán y López, 2022) en este trabajo se desarrolla un estudio fluido - dinámico respecto a los parámetros que permiten una óptima fluidización en un gasificador de lecho fluidizado burbujeante. Además, se analiza la geometría del sistema de alimentación de aire.

En el 2021 da por concluido la fase de diseño y modelamiento de la segunda etapa del gasificador, Chira-Rodríguez comienza la tesis “Acondicionamiento del sistema de gasificación de lecho fluidizado tipo burbujeante instalado en la Universidad de Piura”(tesis en fase de revisión) en la cual diseña el subsistema de alimentación de biomasa, subsistema de admisión de aire y subsistema de encendido según metodología basada en la norma VDI 2221 de Diseño Mecánico y diseña los planos de ingeniería de detalle y establece especificaciones técnicas de cada equipo que conforma el gasificador para su mejora.

Figura 9

Diseño del gasificador en la etapa final.



Nota. Diseño compartido por Alonso Chira.

El gasificador actual cuenta con un nuevo sistema de alimentación de biomasa, sistema de fluidización, el reactor y el sistema de toma de datos.

La presente tesis inicia con la fase de experimentación, partiendo desde el montaje de la repotenciación del gasificador. Durante el planteamiento constructivo en campo, se observó unos detalles de diseño que estuvieron ocultos hasta el montaje, por lo que se hicieron modificaciones que se comentan en capítulos siguientes.

Capítulo 2

Descripción de la repotenciación del gasificador Udep

2.1 Justificación de la repotenciación del gasificador

En los inicios del proyecto, se realizaron las siguientes se tuvo las siguientes observaciones:

La alimentación de la biomasa al reactor no era la adecuada debido a que el tornillo sin fin no dosifica la cantidad de biomasa que ingresa al reactor, por otro lado, en el reactor se requería de una modificación en la posición del vector de calor, para una óptima transferencia de calor del quemador al material inerte y el sistema de flujo de aire no tenía la fuerza suficiente para la fluidización requerida, por otro lado, la distribución de aire en el lecho no era homogénea. Así también, la manipulación del gasificador era muy difícil, por lo que Ing. Raúl La Madrid en conjunto con el tesista Alonso Chira diseñaron la infraestructura y distribución del equipamiento para su uso y mantenimiento.

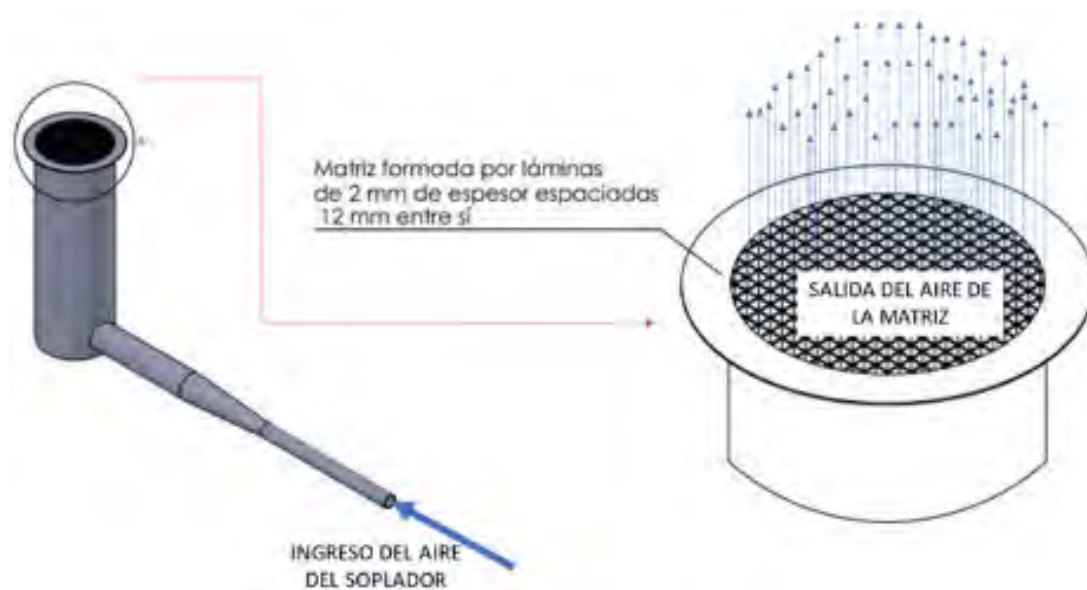
2.2 Descripción de sistemas

2.2.1 Sistema de fluidización

El anterior sistema de fluidización no tenía la placa distribuidora de flujo, solo se tenía la malla que permitía mantener el material inerte, pero impedía la correcta fluidización de manera homogénea de la arena, para mantener el material inerte dentro del reactor y aire fluidizaba de manera irregular. El sistema repotenciado de fluidización, cuenta con una placa de distribución de flujo (ver figura 10), un nuevo soplador seleccionado para las caídas de presión en sistema de fluidización (Ver Figura 11), un sensor de velocidad, válvula de seguridad y filtro de aire de manera organizada (Ver figura 12).

Figura 10

Esquema de la placa distribuidora.



Nota. Adaptación del diseño elaborado por Alonso Chira.

Figura 11

Datos del blower (soplador)



Nota. Foto tomada por el autor.

Figura 12

Esquema real del sistema de fluidización.



2.2.2 Sistema de alimentación de Biomasa

El sistema es controlado mediante un programa en el computador, en éste encontramos dos variables que podemos controlar, la velocidad de giro de la válvula rotativa y la velocidad de giro del tornillo sin fin. Al poder controlar estas velocidades controlamos el flujo de biomasa que ingresará al reactor (Ver figura 13).

Figura 13

Esquema del sistema de alimentación



Nota. Adaptación del diseño de Alonso Chira

En el sistema de alimentación del gasificador anterior no se dosificaba de manera continua la cantidad de biomasa. En el gasificador repotenciado, el sistema de alimentación se mejoró con una válvula giratoria que permite dosificar la cantidad de biomasa, el tornillo de 100 mm de diámetro transporta la dosis necesaria en sus hélices que tienen un espesor de 2 mm al reactor para el proceso de gasificación y recibe el trabajo de eje mediante motor trifásico, utilizando una caja reductora de velocidad que aumenta el torque en el giro (Ver figura 14).

Figura 14

Esquema real del sistema de alimentación.



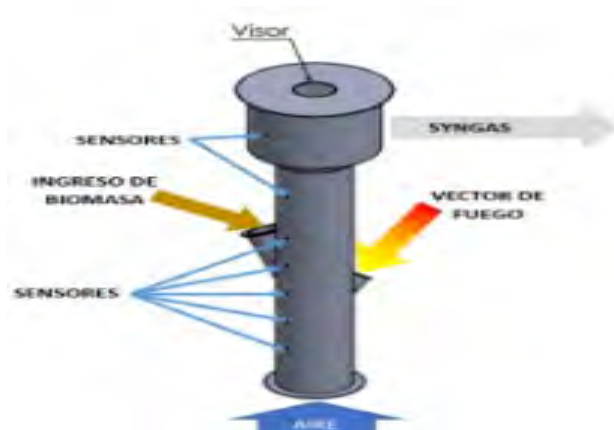
2.2.3 Sistema de gasificación

a) Reactor

En el reactor se cambió la ubicación de la alimentación de biomasa y el vector de fuego, adicionalmente se reubicó la disposición de sensores que nos permiten medir la temperatura en cada sector del reactor (Ver figura 15).

Figura 15

Esquema del reactor del gasificador.



Nota. Adaptación del diseño de Alonso Chira

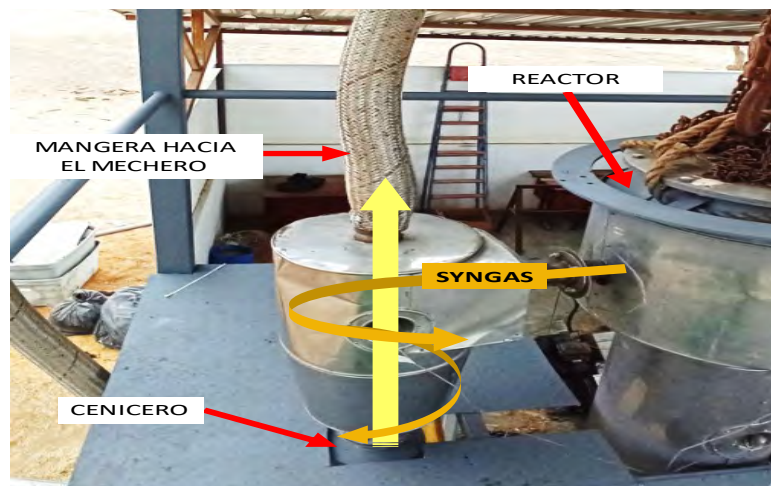
b) Ciclón

El ciclón permite eliminar las impurezas y limpiar de cenizas al syngas, cuenta con material termoaislante igual que el reactor (Ver figura 16).

En la parte inferior del ciclón se tiene un contenedor donde se depositan las cenizas y alquitran. Tiene 20 cm de diámetro y 20 cm de altura y con una rejilla para poder limpiarlo.

Figura 16

Esquema del ciclón del gasificador.

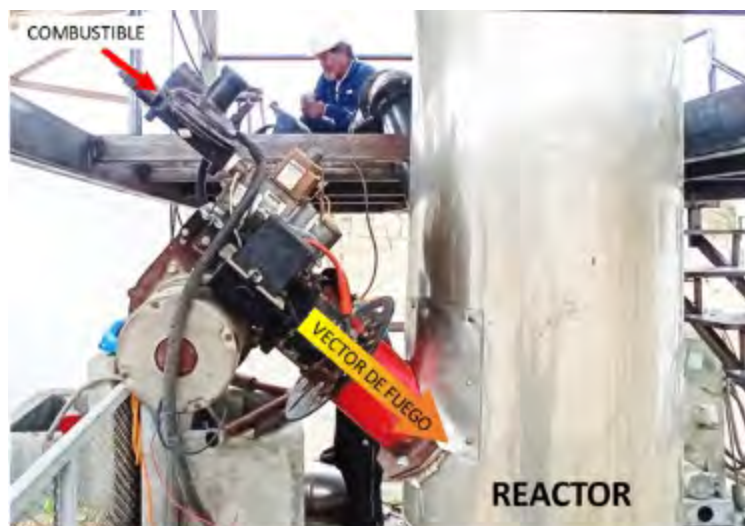


Quemador

Dispositivo que permitirá elevar la temperatura del material inerte en el reactor con una potencia de 117.23 kW. En el reactor se encuentran los sensores de temperatura los cuales mediante el programa de la computadora permite controlar por un sistema ON-OFF el quemador (Ver figura 17).

Figura 17

Esquema del quemador.



2.3 Materiales

2.3.1 Material inerte

El material inerte que utilizaremos para la fluidización es arena. En la siguiente figura se presentan tres tipos diferentes de arena: arena fina, arena intermedia y arena gruesa. Se colocó una moneda para tener una idea de forma práctica de la granulometría (Ver figura 18).

Figura 18

Tipos de arena comercial que se encuentra en venta de agregados.



Nota. Fotografías tomadas por el autor.

Entre las arenas se compró la arena cuyos granos tenga una medida de 1mm, la que cumple en mayoría es la arena intermedia, arena de río.

El diámetro del grano de arena se obtuvo a partir de tamizar en dos mallas de diferente tamaño la arena de río, de esa manera obtuvimos un diámetro máximo y mínimo del grano para utilizarlo como material inerte en la gasificación (Ver figura 19). Al terminar el tamizado de las 10 bolsas de arena intermedia, se obtuvo 22 kg de arena.

Figura 19

Obtención de material inerte para fluidización.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

2.3.2 Biomasa

a) Cascarilla de café

La cascarilla de café proviene del medio y alto Piura, del sector cafetalero de la región Piura.

b) Cascara de arroz

La cascara de arroz proviene de la zona del bajo Piura, la mayoría de este material se puede conseguir fácilmente en el camino al distrito de la unión donde hay varios molinos de arroz.

c) Bagazo de caña

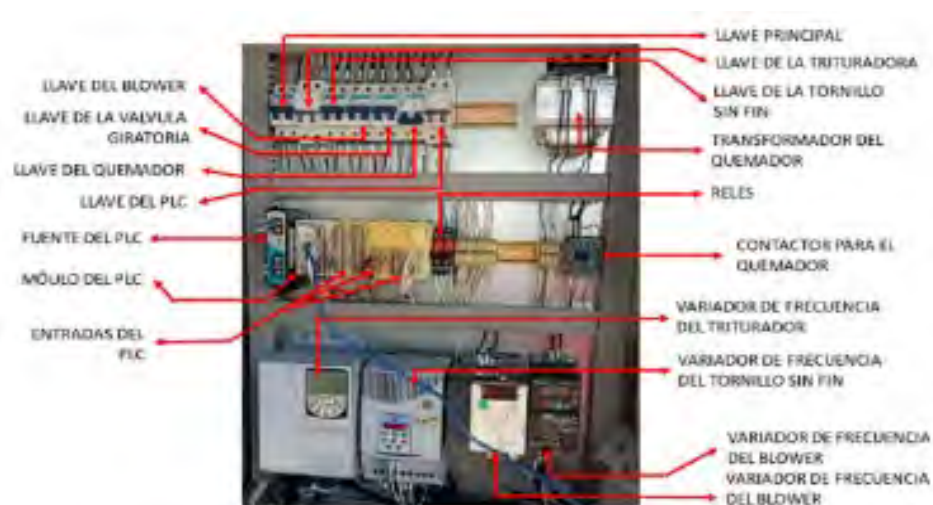
El bagazo de la caña lo obtuvimos de los residuos sólidos generados por la empresa Caña brava, los cuales nos donaron 6 sacos de bagazo.

2.4 Instrumentación

Durante la construcción del gasificador el sistema de medición se realizó mediante un sistema de control los cuales incluye sensores de temperatura, sensor de velocidad, software de control del gasificador. El tablero general tiene una llave termomagnética general, de allí se conectan las llaves termomagnéticas para cada subsistema. El quemador como trabaja con voltaje de norma americana se utiliza un transformador de 220/110 V. El sistema de control del quemador es ON/OFF el cual es accionado por un contactor. El PLC tiene su propia fuente de alimentación que permite su correcto funcionamiento, de la misma manera tiene los módulos de entrada donde se conectan los sensores de temperatura, velocidad y presión. A su vez, el PLC se mantiene la comunicación con los variadores de frecuencia y acciona mediante Relés (Ver Figura 20).

Figura 20

Tablero de general del gasificador.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

El PLC se conecta con la computadora desde los puertos ethernet mediante un cable UTP categoría 6. En el siguiente capítulo se describe el protocolo de toma de datos.



Capítulo 3

Montaje de sistemas mecánicos y equipos de medición

3.1 Montaje de sistemas mecánicos

3.1.1 Montaje del reactor

El 16 de mayo se inició el montaje del reactor; el montaje consiste en izar manualmente el reactor en su base metálica, este paso permite definir la ubicación del gasificador para posterior montaje de la estructura (Ver figura 21).

Figura 21

Secuencia del montaje del reactor.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

3.1.2 Montaje de la estructura

El 18 de mayo se instaló la estructura metálica, se soldaron las vigas a las columnas preexistentes (Figura 22).

Figura 22

Instalación de las vigas del mezanine.

**Figura 23**

Instalación de las planchas de metal.

**Figura 24**

Instalación de la escalera metálica.



Se colocó planchas metálicas de piso corrugadas a la estructura (Figura 23). Posterior, mediante tornillo autoperforante, se fijaron a las vigas y se realizó el desbaste. Se rediseñó la escalera metálica porque en campo se observó un área ignorada que impedía el acceso al mezanine, logrando cambiar el diseño del techo. Igual se realizó la extensión del techo de mayor altura y se instaló la cobertura desmontada el voladizo del mismo. En cuanto al diseño de la escalera, se cambió a la del plano de diseño, dado que dificultaba el acceso al momento de llevar la biomasa al sistema de alimentación y también impedía la manipulación del tablero eléctrico del gasificador (Figura 24).

3.1.3 Montaje del sistema de fluidización

El sistema de fluidización está conformado por un blower (soplador), una placa distribuidora y la malla de acero (Figura 25).

Figura 25.
Sistema del blower.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

3.1.4 Montaje del sistema de alimentación

En el sistema de alimentación se instaló en primera instancia el soporte del tornillo sin fin, el cual tiene agujeros elongados (ojo chino) para efectos de dar facilidad al acople de las bridas. Luego se ensambla al codo y el tubo al reactor. Al momento de estar las tres partes están concatenadas se ajustan los pernos para mantener fija la estructura (Ver figura 26).

Figura 26
Instalación del sistema de alimentación.



Nota. Fotografía tomada por el autor

Luego el subsistema del tornillo sin fin lo compone un motor eléctrico de 1.5 HP y una caja reductora. El subsistema de dosificación lo compone la válvula rotativa hermética, un motor eléctrico de 2 HP, una caja reductora y una transmisión por cadena (Figura 27).

Figura 27

Instalación de motores, cajas reductoras, sistema de transmisión.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

Finalmente, se le instaló la tolva para verter la biomasa, como se muestra a continuación:

Figura 28

Instalación de tolva



Nota. Fotografía tomada por el autor.

3.2 Montaje de sistemas de medición del gasificador

El sistema de medición está conformado por un sistema de control, sensores de velocidad, sensores de temperatura, y una laptop para el registro de la información.

3.2.1 Montaje del sistema de medición de temperatura

Para la medición de temperatura se utilizará termocuplas que están colocadas en el reactor. El material de conexión que se utiliza para la comunicación con el sistema de control es mediante un cable de alarma multifilar 4x22 marca HAGROY. Éstos, se unen mediante cintillos e ingresan a la caja de paso que esta próxima al reactor, finalmente estos son pasados mediante un pasacables en un tubo de acero galvanizado modelo 3/4" Emt Conduit en cual

llega hasta el tablero principal, cada cable previamente está rotulado para poder identificarlo al momento de conectarlo al sistema de adquisición de datos (Figura 29).

Figura 29

Montaje de sensores de temperatura



Nota. Fotografía tomada por el autor

3.2.2 Montaje de medición de la velocidad del aire

En el sistema de fluidización se encontraba un medidor de velocidad (Ver figura 30), instrumento que permitirá obtener el flujo volumétrico del aire.

Figura 30

Instalación del medidor de velocidad del aire.



Nota. Fotografía tomada por el autor

3.3 Elaboración de protocolo de adquisición de datos del sistema

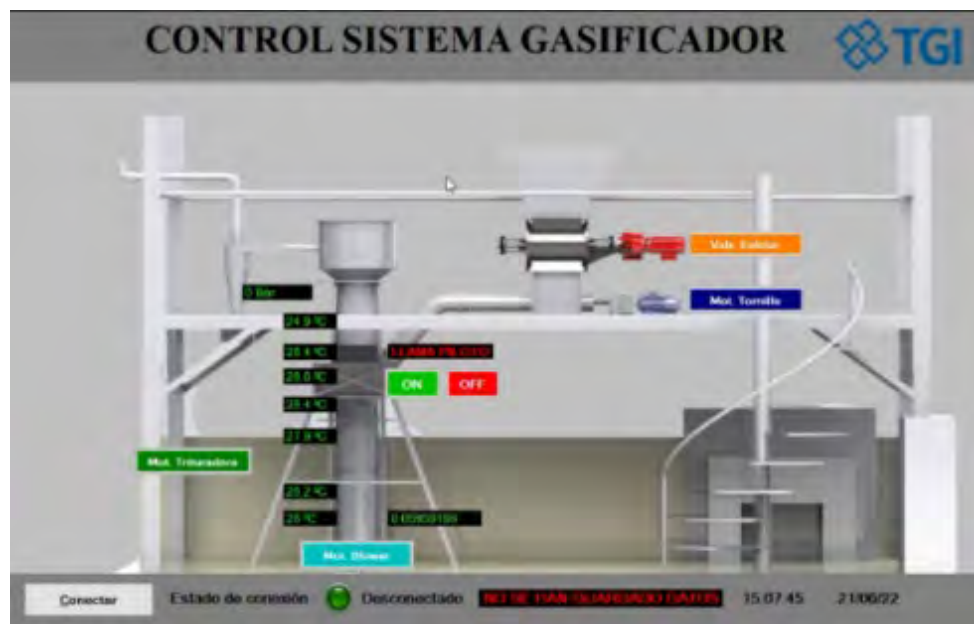
Para la adquisición de los datos del gasificador, primero se describirá el software de adquisición de datos, luego el protocolo de funcionamiento, previo a la gasificación.

3.3.1 Sistema de adquisición de datos

Para adquirir los datos primero se describe la interfaz del programa del gasificador comenzando con la pantalla principal, seguido las ventanas secundarias.

Figura 31

Pantalla principal del software del gasificador.



a) Trituradora

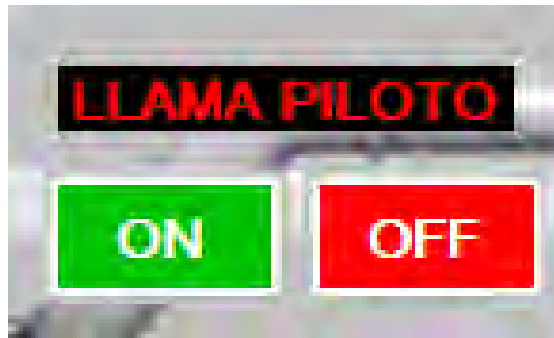
Al hacer clic en el botón de color verde de la *tritadora*, se abre una ventana, como se puede apreciar en la figura 32 donde se colorará los valores de frecuencia para el giro del motor que acciona la trituradora. No es necesario utilizarlo para cascarilla de café y arroz; sin embargo, se puede utilizar para el bagazo de caña. La frecuencia que se ingresa debe ser la apropiada durante el proyecto, correspondiente a 60 Hz.

Figura 32*Ventana estado trituradora.**Nota. Fotografía tomada por el autor.***b) Blower**

Al hacer clic en la opción del blower, se abre una ventana (Figura 33), donde se colocará su frecuencia; cuyo rango es variable dependiendo del volumen de material inerte. Para las pruebas realizadas con 17 kg. de arena, se selecciona la frecuencia de 32-40 Hz. Durante la fase de pruebas se probó con varias frecuencias a efectos de encontrar la óptima para la fluidización burbujeante.

Figura 33*Ventana estado blower.**Nota. Fotografía tomada por el autor.***c) Quemador**

El quemador funciona por medio de un sistema On/Off. Para activar el quemador se da un clic en ON para encenderlo y OFF para apagarlo. En el caso del encendido, puede ocurrir un retraso de 3-7 minutos para que encienda la llama.

Figura 34*Interfaz del quemador.**Nota. Fotografía tomada por el autor.***d) Tornillo sin fin**

Haciendo clic en la pestaña de tornillo, se abre la siguiente ventana *estado tornillo*. Este permite el transporte de la biomasa dosificada por la válvula rotativa o estelar. El rango de frecuencia en la que el tornillo sin trabaja sin atascamiento es entre 50 y 60 Hz.

Figura 35*Ventana estado tornillo.**Nota. Fotografía tomada por el autor.***e) Válvula giratoria o estelar**

Haciendo clic en la válvula estelar, se abre la ventana *estado alimentador*. Para el caso de alimentador de biomasa trabajará con valores bajos de frecuencia entre 30-50 Hz. Adicionalmente, en la ventana está la opción de giro en sentido contrario, lo que permite a la válvula girar de forma opuesta en caso de emergencia.

Figura 36*Ventana estado alimentador**Nota. Fotografía tomada por el autor.***f) Sensores**

Los sensores de temperatura se calibran (Figura 37) tomando como referencia la temperatura ambiente, la presión se considera la atmosférica y el sensor de velocidad o de flujo es cero.

Figura 37*Interfaz de calibración de sensores de temperatura, presión y flujo.**Nota. Fotografía tomada por el autor.***3.3.2 Protocolo de adquisición de datos****a) Conectar nuevo computador al sistema de control**

- En primera instancia, se dirige a configuración
- Clic en Red e Internet / Ethernet / Cambiar configuración de adaptador

- Seleccionar el Ethernet que está activo, clic derecho, propiedades.
- Se escriben los siguientes datos:
- IP: 192.168.0.11
- Máscara sub red: 255.255.255.0
- Luego se abre cmd.
- Se escribe el comando ping 192.168.0.10, presionar enter, esperar que finalice y cerrar cmd.

b) Conectar la computadora al PLC mediante el cable UTP.

- Dar clic en conectar y se encenderá la luz verde.
- Calibrar sensores de flujo, temperatura y presión, si es necesario.
- Se debe encender el quemador, presionando ON en la pantalla principal.
- Cuando enciende el quemador, se observan las medidas de las temperaturas del reactor y se espera a que la temperatura 3 en el reactor llegue a los 300 grados.
- Una vez alcanzada la temperatura de 200 grados encendemos el blower a la frecuencia de 39 Hz., se deja encendido el blower hasta que la temperatura 2 en el reactor llegue a los 100 grados y se apaga el blower.
- Nuevamente se espera que la temperatura 3 alcance los 300 grados y se enciende el blower hasta que la temperatura 2 alcance los 100 grados.
- Y así sucesivamente, se repite el proceso varias veces, aumentando 100 grados en cada iteración, hasta que la temperatura 3 y 2 converjan a 700 °C.

c) Guardar datos en el computador.

- Es muy importante verificar que los datos hayan sido almacenados en el computador al finalizar las pruebas, siempre.

3.4 Identificación de Peligros, evaluación y control de riesgos del sistema

En el apartado 3.3 se realizó un protocolo de adquisición de datos para el sistema, en este se Identificarán los peligros y se evaluarán los riesgos, considerando las medidas de control para el correcto uso de gasificador. A continuación, se ha elaborado un cuadro IPERC sencillo que presenta el gasificador.

Tabla 3*Matriz IPERC del gasificador.*

PELIGRO	RIESGO	CONTROL
Reactor	Quemaduras	Señalización, utilizar Epp's específicos.
Ciclón	Quemaduras	Señalización, utilizar Epp's específicos.
Quemador	Quemaduras y explosión	Señalizar, uso de check list de pre-uso.
Válvula giratoria	Atrapamiento	Uso de ropa adecuada, señalización.
Tornillo sin fin	Atrapamiento y corte	Uso de señalización.
Tablero eléctrico	Electrocución	Señalización, uso de Epp's, check list de preuso.
Escalera	Caídas a desnivel	Señalética, uso de los 3 puntos.
Triturador	Atrapamiento y cortes	Señalización y check list de preuso.

Se puede evidenciar de forma esquemática los riesgos en el gasificador en el Mapa de Riesgos (Ver anexo A).



Capítulo 4

Pruebas y resultados

4.1 Ensayos realizados

4.1.1 Fluidización

Se realizaron las pruebas de fluidización en la que consistía por método de prueba y error, obtener la frecuencia del blower en la que el lecho iniciaba su fluidización burbujeante.

a) Prueba 1

En la primera prueba se utilizó 17 litros de material inerte (ver figura 38), se inició la prueba dando 20 Hz al blower, luego a 30 Hz y finalmente 40 Hz donde se veía fluidización turbulenta.

Figura 38

Vertiendo material inerte en el reactor para las pruebas.

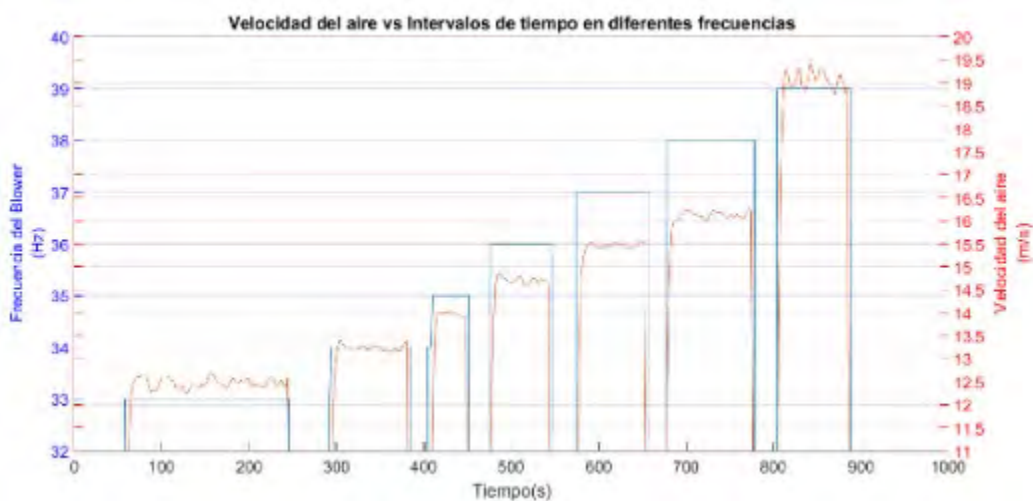


Nota. Fotografía tomada por el autor.

Seguido, se tomó el rango de 30 Hz a 40 Hz para lograr realizar la prueba de fluidización. Para ello, se inició dando a una frecuencia de 33 Hz, luego de 34 Hz y así sucesivamente hasta encontrar la frecuencia a la que el blower logra la fluidización tipo burbujeante del material inerte, según el gráfico siguiente:

Figura 39

Gráfico de la velocidad del aire vs frecuencia del blower ascendente.



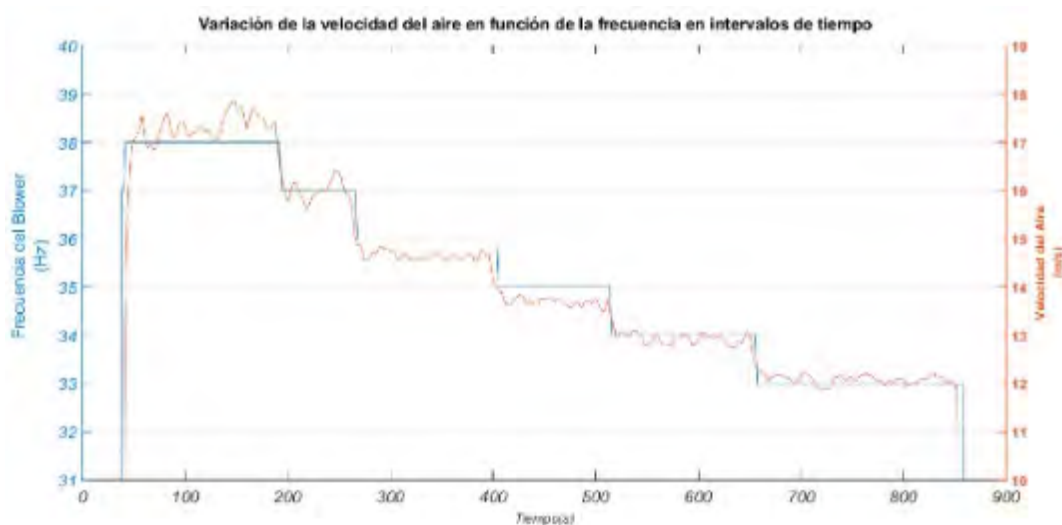
Nota. Gráfico elaborado en MatLab por el autor.

b) Prueba 2

En la segunda prueba se continuó con la misma cantidad de material inerte, pero se inició desde 38 Hz hasta 33 Hz (Ver figura 40), verificando en cada frecuencia el lecho en el reactor, en 38 se presenta fluidización turbulenta la cual se mantiene en 37 Hz, cuya denominación por parte del Dr. Elder Mendoza es *histéresis*, fenómeno en que el comportamiento varía de un sentido a otro.

Figura 40

Gráfico de la velocidad del aire vs frecuencia del blower descendente.



Nota. Gráfico elaborado en MatLab por el autor.

En la siguiente figura 41 se muestra el aumento en la altura del lecho, aunque es pequeño, permite ver la diferencia entre dos estados del lecho, en la figura de la derecha se tiene el blower apagado y el de la izquierda a 35 Hz.

Figura 41

Figura del estado de la mínima fluidización y lecho fijo.



4.2 Resultados

4.2.1 Lecho fluidizado tipo burbujeante

Después de las pruebas, se obtuvo la fluidización tipo burbujeante con frecuencia de 37 Hz (Ver figura 42) de graduación descendente utilizando a favor el fenómeno de Histéresis. Esta es la frecuencia mínima, que permite el menor paso de aire al reactor; del cual se aprecia la formación de burbujas. De manera experimental, se ingresa la mano para sentir el lecho y se percibe que la misma se sumerge en la arena.

Figura 42

Fluidización del tipo burbujeante del lecho del gasificador.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

4.2.2 *Dosificación de biomasa*

Los resultados iniciales de la biomasa en el gasificador fueron insatisfactorios en el sentido que las propiedades físicas de la biomasa, específicamente el bagazo de caña, se adherían entre sí, aglomerándose en cavidades del tornillo sin fin y entre el ducto al reactor (Ver figura 43). Se realizó desensamble a la tubería que lleva al reactor para limpiar el ducto de alimentación de biomasa.

Figura 43

Atascamiento de la biomasa en el ducto de alimentación.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

Por otro lado, si se suministra a la válvula dosificadora en pequeñas cantidades de biomasa de bagazo se evita que se aglomere en el tornillo sin fin y haya un flujo de biomasa en el sistema de alimentación, como se puede evidenciar en la figura 44.

Figura 44

Flujo de biomasa en el tornillo sin fin.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

Sin embargo, se tuvo excelentes resultados con la cascarilla de café, se presenta un flujo de biomasa sin atascamientos ni aglomeraciones desde la tolva hasta el reactor dando por validado correctamente el sistema de alimentación del gasificador (Figura 45).

Figura 45

Flujo de biomasa en el sistema de alimentación.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

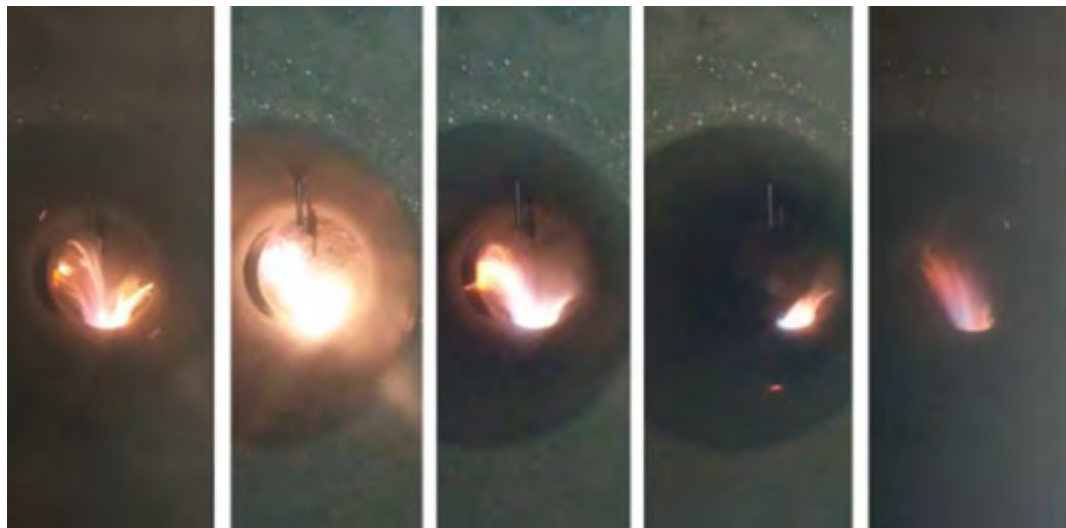
4.3 Perfil de temperaturas del reactor

Para el calentamiento del material inerte, se ejecutaron una serie de procedimientos. Inicialmente, se encendía solo quemador, luego se apagaba, se encendía el blower para mezclar el material inerte y homogeneizar la temperatura en el lecho y así sucesivamente. No obstante, este procedimiento demoraba y al momento de encender el blower se enfriaba el

material inerte. En el segundo procedimiento ya explicado en el apartado 3.3.2 viñeta b) permite calentar el material inerte mientras se mezcla. En la siguiente figura se evidencia cuando hay fluidización burbujeante turbulenta y el quemador está encendido.

Figura 46

Calentamiento del lecho en fluidización burbujeante turbulenta.



Nota. Fotografía tomada por el autor.

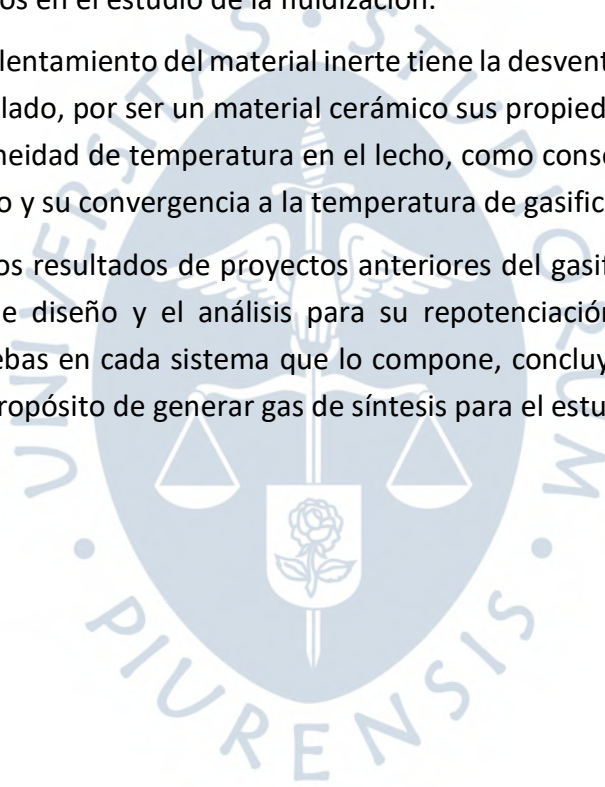
Conclusiones

En la presente investigación “Validación experimental del prototipo de gasificador de biomasa de lecho fluidizado tipo burbujeante instalado en la Universidad de Piura”, por el conforme funcionamiento de los subsistemas, se concluye que la repotenciación planteada y llevada a la realidad es la indicada para realizar las pruebas de fluidización y gasificación. Gasificar biomasa local como: cascarilla de café, cascarilla de cacao y cáscara de arroz es apropiado para el correcto funcionamiento del sistema de alimentación.

El material inerte para la fluidización se tiene que preparar por separado mediante el doble tamizado, por otro lado, las pruebas de fluidización se realizaron de manera correcta, identificando el fenómeno de histéresis que permite la continuación de investigación experimental enfocados en el estudio de la fluidización.

El protocolo calentamiento del material inerte tiene la desventaja de enfriar el material al mezclarlo, por otro lado, por ser un material cerámico sus propiedades termo conductoras no permiten homogeneidad de temperatura en el lecho, como consecuencia el protocolo de calentamiento es lento y su convergencia a la temperatura de gasificación igual.

Comparando los resultados de proyectos anteriores del gasificador, con el actual, se valida la ingeniería de diseño y el análisis para su repotenciación, dando los resultados esperados en las pruebas en cada sistema que lo compone, concluyendo que el Gasificador Udep cumple con el propósito de generar gas de síntesis para el estudio de su composición.



Recomendaciones

El proyecto del gasificador deja las puertas abiertas a investigaciones en diferentes áreas de ingeniería. En el sistema de alimentación, puede realizarse una investigación para la correcta dosificación de bagazo de caña, ya que por sus propiedades físicas requiere de un sistema alternativo de conducción hasta el reactor.

En el sistema de fluidización se puede realizar una investigación para su optimización, así como estudios de variación de la fluidización con diferentes rangos de granulometría del material inerte.

Se recomienda transformar la biomasa en pellets para realizar mezclas entre los diferentes tipos de biomasa facilitando así el proceso de alimentación al reactor

Es importante tener en cuenta el uso de un mecanismo de calentamiento alternativo en el cual se pueda homogeneizar la temperatura del material inerte en el lecho, evitando enfriarlo.



Referencias

- Dirección General de Eficiencia Energética. (2019). *MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS*.
Obtenido de https://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=633
- García Valladolid, R. I. (Marzo de 2017). *Pirhua*. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2909>
- Merino Ortega, I. (Junio de 2022). *Pirhua*. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/5559>
- Ministerio de Energía y Minas. (01 de junio de 2016). *Plan Energético Nacional 2014-2025*.
Obtenido de <https://www.ariae.org/servicio-documental/plan-energetico-nacional-2014-2025-peru>
- Natalia Afanasjeva, Luis C. Castillo, Juan C. Sinisterra. (Noviembre de 2018). *Mind Tech*.
Obtenido de <https://www.jsta.cl/resource?doi=jsta.18.5.31>
- SUAREZ GIL, FAVIO RENZO;. (Diciembre de 2018). *Pirhua*. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3823>
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. (s.f.). *NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY*.
Obtenido de <https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/syngas-composition#:~:text=This%20can%20vary%20significantly%20depending,amounts%20of%20the%20sulfur%20compounds>

Apéndices



Apendice A Mapa de riesgo del gasificador

