

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ANÁLISIS DEL PROCESO DE
GASIFICACIÓN PARA EL LABORATORIO DE COMBUSTIÓN**

**LAURA XIMENA SERRANO BAYONA
MARIA CAMILA URIBE MORA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2020

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ANÁLISIS DEL PROCESO DE
GASIFICACIÓN PARA EL LABORATORIO DE COMBUSTIÓN**

**LAURA XIMENA SERRANO BAYONA
MARIA CAMILA URIBE MORA**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERA MECÁNICA**

Director

**YESID JAVIER RUEDA ORDÓÑEZ
Ingeniero Mecánico PhD.**

Codirector

**RAÚL ANDRÉS SERRANO BAYONA
Ingeniero Mecánico.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2020

DEDICATORIA

Dios me ha premiado con este nuevo logro y quiero entregarle todo el crédito de este trabajo, sin él no hubiese sido capaz de llegar hasta donde lo he hecho.

A mi hermosa madre, Luz Mery, porque con su ejemplo me enseñó a ser una mujer fuerte e independiente, me animó a aceptar cada reto con entusiasmo y mucha berraquera, quien me moldeó para ser su mejor versión y me ha impulsado a llegar muy lejos, por saber de lo que estoy hecha y por confiar en mis capacidades, incluso cuando el camino ha sido tan difícil.

A mi hermano Raúl, porque siempre ha sido mi inspiración y mi orgullo. Porque a su manera me ha mostrado que el mundo no espera por nadie y que lucharlo es de valientes y disciplinados.

A Palacios y mi hermana Mayra, porque a pesar de que muchas veces no entienden mis guerras, me brindan su apoyo y sus palabras de aliento incluso cuando siento no poder más.

A mi José, porque no solo ha sido mi pareja sino también mi mejor amigo, llegó en el momento más oportuno de mi vida y con paciencia y amor ha ayudado bastante en mi construcción personal. Tú, mejor que nadie, sabes todo lo que ha significado esta carrera, este proyecto y cuán duro ha sido este trayecto. Te amo.

A mi papá, por haber cumplido sus obligaciones conmigo y por ser un motivo más para ser una mejor persona. Es de admirar su inteligencia y destreza en lo que hace.

A mis amigas, me quedaré con las experiencias más bonitas que viví junto a cada una de ustedes y les agradezco por cada consejo y cada abrazo cuando lo necesité. A cada persona que me regaló una sonrisa, un abrazo e incluso alguna lágrima, han

contribuido a mi desarrollo personal y profesional y les agradezco por haber dado su paso por mi vida, por ayudarme a entender un poco más mi destino.

Laura Ximena Serrano Bayona

DEDICATORIA

En primer lugar, quisiera dedicar este logro a Dios, pues día a día me ha brindado una vida llena de experiencias, lugares y personas que han sido importantes en mi vida.

A mi nona, ya que gracias a ella me he formado como una buena persona, quien me enseñó durante todo mi proceso de formación; la humildad y lo dura que puede ser la vida.

A mis padres, aquellos que siempre han estado para mí, quienes me han apoyado en cada decisión que he tomado, sin dudar ni un minuto de mí, solo tengo por decir: mil gracias.

A mi hermana, pues ha sido un soporte importante en mi vida, aquella persona con quién he compartido mis más bellas y no tan buenas experiencias, quién ante cualquier situación ha estado ahí para abrazarme y decirme que todo estará bien.

A mi familia, pues mi vida no sería nada sin ellos, cada uno me ha enseñado demasiadas cosas; puesto que han contribuido en mi proceso de formación a través de sus personalidades, debido a ellos que soy la mujer que hoy en día soy; siempre los voy a amar.

A ti, Blue, por ser la gran lección de mi vida, quién me ha demostrado como se forma un corazón noble.

Finalmente agradezco a cada persona que ha sido parte de mi vida, que me ha marcado, me ha enseñado, me ha mostrado con otros ojos el mundo, a cada uno de ellos GRACIAS.

María Camila Uribe Mora

AGRADECIMIENTOS

Llenas de un profundo sentimiento de agradecimiento, resaltamos la colaboración del profesor Yesid Javier Rueda Ordóñez, director de este trabajo de grado, por su guía, asesoría y por confiar en nosotras para el desarrollo de un proyecto que representó un gran reto para nosotras y que hoy, con enorme satisfacción, culminamos.

A Raúl Andrés Serrano Bayona, codirector y amigo, quien estuvo al frente de este proceso y, a pesar de sus muchas obligaciones, nunca nos dio la espalda.

A Cristian Alberto Vásquez, quien atendió a todos nuestros requerimientos, nos brindó asesoría cuando lo necesitamos y nos presentó las mejores opciones en el contexto de fabricación y a todos aquellos trabajadores de la empresa CORPLIEGUES, quienes colaboraron con su mano de obra y con su excelente disposición a ayudar.

A Andrés Álvarez, de la empresa IMR, quien aportó su conocimiento, tiempo y a su vez dedicación para que nuestro proyecto finalizara con éxito.

Laura Ximena Serrano Bayona.

María Camila Uribe Mora.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2. OBJETIVOS	23
2.1 OBJETIVO GENERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3. GENERALIDADES	24
3.1 ANTECEDENTES	24
3.1.1 Biomass downdraft gasifier with internal cyclonic combustion chamber: Design, construction, and experimental results	24
3.1.2 Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz	24
3.1.3 Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo	25
3.1.4 Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento de la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial de Santander	26
4. REFERENTES TEÓRICOS	28
4.1 BIOMASA	28
4.1.1 Composición de la biomasa	29
4.1.1.1 Celulosa	29
4.1.1.2 Hemicelulosa	30
4.1.1.3 Lignina.	31
4.2 CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA.	32
4.2.1 Análisis último.	32
4.2.2 Análisis próximo.	32
4.2.2.1 Materia volátil.	32
4.2.2.2 Cenizas.	33
4.2.2.3 Humedad.	33
4.2.2.4 Carbono fijo (FC).	34

4.2.2.5 Char.	34
4.3 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA	35
4.3.1 Secado.	35
4.3.2 Torrefacción.	35
4.3.3 Pirólisis.	36
4.3.4 Combustión.	36
4.3.5 Gasificación.	37
4.4 MODELOS DE GASIFICACIÓN	37
4.5 MODELOS DE SIMULACIÓN	38
4.5.1 Modelo de equilibrio termodinámico	38
4.5.1.1 Modelo de equilibrio estequiométrico	40
4.5.1.2 Modelo de equilibrio no estequiométrico	40
4.6 AGENTES GASIFICANTES	40
4.6.1 Aire.	41
4.6.2 Hidrógeno.	41
4.6.3 Oxígeno o vapor de agua.	41
4.7 BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR AGRÍCOLA	41
4.7.1 Biomasa como materia prima.	42
4.7.1.1 Cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.)	42
4.7.1.2 Morfología de la planta de arroz.	44
5. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	49
5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO COMPLETO	49
5.2 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD	49
5.2.1 Requerimientos del cliente	49
5.2.2 Requerimientos de diseño	50
5.2.3 Matriz de calidad.	51
5.3 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	52
5.3.1 Alternativas de lecho	53
5.3.1.1 Gasificador de lecho fijo	53
5.3.1.2 Gasificador de lecho móvil.	54

5.3.1.3 Gasificador de lecho fluidizado.	55
5.3.1.4 Gasificador de lecho arrastrado.	55
5.3.1.5 Selección de alternativas.	56
5.3.2 Alternativas para el ingreso de aire y biomasa	56
5.3.2.1 Gasificador co-corriente.	56
5.3.2.2 Gasificador contracorriente.	57
5.3.2.3 Gasificador flujo cruzado.	58
5.3.2.4 Selección de alternativas.	58
5.3.3 Alternativas para el estilo de garganta.	59
5.3.3.1 Sin garganta.	59
5.3.3.2 Garganta simple.	59
5.3.3.3 Selección de alternativas.	60
6. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BIOMASA	61
6.1 PREPARACIÓN DE LAS BIOMASAS	61
6.2 ANÁLISIS PRÓXIMO DE LA BIOMASA NORMA ASTM E1757-01	62
6.2.1 Composición del gas	62
6.2.1.1 Humedad.	62
6.2.1.2 Char.	63
6.2.1.3 Volátiles.	63
6.2.1.4 Cenizas.	64
6.2.1.5 Carbón fijo.	66
6.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS BIOMASAS	66
7. MODELO TERMODINÁMICO	70
7.1 SECCIÓN TEÓRICA	70
7.2 REACCIONES Y BALANCES PARA EL ANÁLISIS TERMODINÁMICO	73
7.2.1 Balance termodinámico de combustión	73
8. DISEÑO DEL GASIFICADOR	79
8.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	79
8.2 RÉGIMEN DE OPERACIÓN	79
8.3 DISEÑO EN DETALLE DEL GASIFICADOR	80

8.4 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR	83
8.4.1 Selección del material para el reactor y recubrimiento.	87
9. TRANSFERENCIA DE CALOR DEL GASIFICADOR	90
10. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE GASIFICACIÓN	95
11. PROCEDIMIENDO DE PRUEBAS EN EL BANCO DE GASIFICACIÓN	102
11.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	102
11.2 OPERACIÓN DEL REACTOR	103
12. ANÁLISIS ECONÓMICO	107
12. CONCLUSIONES	108
13. RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXOS	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distintos agentes que producen biomasa.	29
Figura 2. Estructura molecular de la celulosa.	30
Figura 3. Estructura molecular de una hemicelulosa y xylan típicas.	31
Figura 4. Algunas unidades estructurales de la lignina.	31
Figura 5. Cultivo de arroz.	43
Figura 6. Semilla de Arroz.	45
Figura 7. Partes de la hoja de arroz. A) Vaina; B) Hoja; C) Lígula; D) Aurícula; E) Cuello.	47
Figura 8. Tipos de gasificadores.	53
Figura 9. Simplificación para el modelado termodinámico	72
Figura 10. Proceso de gasificación.	73
Figura 11. Etapas de operación del gasificador	80
Figura 12. Simulación del reactor para gasificación.	81
Figura 13. Elemento para sello del reactor	82
Figura 14. Dimensionamiento del reactor	83
Figura 15. Dimensionamiento del gasificador downdraft	84
Figura 16. Plano de corte del reactor con su respectivo aislante y recubrimiento	90
Figura 17. Diagrama de transferencia de calor	91
Figura 18. Dimensiones de los radios	92
Figura 19. Temperatura vs Espesor del aislante térmico.	94
Figura 20. Desarrollos de acero de los conos del reactor.	95
Figura 21. Ensamblaje y soldadura del cuerpo del reactor	96
Figura 22. Termocupla con el dispositivo lector de temperaturas	96
Figura 23. Instalación del aislante y revestimiento con lámina en el reactor.	97
Figura 24. Instalación de las termocuplas al reactor.	97
Figura 25. Gancho de ajuste a presión para la tapa.	98
Figura 26. Instalación completa del revestimiento en lámina.	98
Figura 27. Fotografía isométrica del bastidor.	99

Figura 28. Instalación de los ganchos en el cuerpo del reactor.	99
Figura 29. Reactor terminado.	100
Figura 30. Fotografía frontal del bastidor.	100
Figura 31. Ensamblaje final del reactor con el bastidor.	101
Figura 32. Molino de martillos.	102
Figura 33. Proceso de llenado del reactor.	104
Figura 34. Encendido del reactor.	104
Figura 35. Fotografía del reactor funcionando (tomada a través de la entrada de aire).	105
Figura 36. Evidencia fotográfica de llama a partir de cascarilla de arroz (izquierda) y paja de arroz (derecha).	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencial energético departamental para biomasa residual de arroz	43
Tabla 2. Matriz QFD.	51
Tabla 3. Escala de evaluación matriz QFD.	51
Tabla 4. Selección de los requerimientos ingenieriles más relevantes.	52
Tabla 5. Criterios y alternativas de selección según tipo de lecho.	56
Tabla 6. Selección de la mejor alternativa.	56
Tabla 7. Datos relevantes de un gasificador equicorriente.	57
Tabla 8. Datos relevantes de un gasificador contracorriente.	58
Tabla 9. Datos relevantes de un gasificador contracorriente.	58
Tabla 10. Criterios y alternativas de selección según flujo de ingreso.	59
Tabla 11. Selección de la mejor alternativa.	59
Tabla 12. Criterios y alternativas de selección según estilo de garganta.	60
Tabla 13. Selección de la mejor alternativa.	60
Tabla 14. Resultados pruebas de Char.	62
Tabla 15. Resultados pruebas de Char.	63
Tabla 16. Resultados pruebas de Volátiles	64
Tabla 17. Resultados pruebas de ceniza	65
Tabla 18. Resultados prueba de Carbón fijo	66
Tabla 19. Rangos de composición ecuaciones de Parikh	67
Tabla 20. Resultados pruebas cascarilla de arroz	68
Tabla 21. Resultados del modelado termodinámico	77
Tabla 22. Rangos de temperatura en el gasificador	90
Tabla 23. Análisis económico del banco de gasificación.	107

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos Adjuntos en el Cd y pueden visualizarlos en la Base de Datos la Biblioteca UIS)

Anexo A. Composición de la biomasa proceso de pirolisis.

Anexo B. Ecuación estequiométrica de la biomasa.

Anexo C. Composición molar de biomasa.

Anexo D. Tabla de valores constante K9.

Anexo E. Análisis Termodinámico.

Anexo F. Ficha técnica acero 304.

Anexo G. Ficha técnica acero 310 S.

Anexo H. Calibres láminas de aceros.

Anexo I. Ficha técnica manta cerámica.

Anexo J. EES Transferencia de calor.

Anexo K. Resultados obtenidos software EES para grafica temperatura vs espesor.

Anexo L. Manual de mantenimiento del banco de gasificación.

Anexo M. Manual de uso del banco de laboratorio de gasificación.

Anexo N. Guía de laboratorio: Transferencia de calor y aislamiento térmico.

Anexo O. Guía de laboratorio: Gasificación

Anexo P. Planos de gasificador de biomasa downdraft

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ANÁLISIS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN PARA EL LABORATORIO DE COMBUSTIÓN*.

AUTORES: Laura Ximena Serrano Bayona.
María Camila Uribe Mora.**

PALABRAS CLAVE: Gasificador, diseño, downdraft, biomasa.

DESCRIPCIÓN:

La implementación de un banco de gasificación en el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica se hizo necesario con el fin de estudiar y aprender del proceso de gasificación, beneficiando a estudiantes de pregrado, posgrado e incluso a la rama investigativa a través del grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente (GIEMA) adscrito a la escuela.

En el desarrollo de este trabajo se encuentra el análisis termodinámico, la caracterización de la biomasa de trabajo, la composición del gas de síntesis, así como también el diseño general y en detalle del gasificador donde se mencionan todos los parámetros y condiciones previstas que se tuvieron en cuenta para los respectivos cálculos del equipo. Posterior a ello, se muestra el paso a paso en la fabricación del equipo y se presenta el manual de funcionamiento, mantenimiento y procedimiento de limpieza del gasificador para llevar a cabo correctamente las pruebas en el banco de laboratorio con el fin de que puedan desarrollarse de forma sencilla y que el equipo pueda tener una mayor vida útil.

Finalmente, se establece un método de uso del gasificador para someterlo a pruebas, el equipo es adaptable a la variación de parámetros como: flujo de aire incidente y tipo de biomasa, con esto se procede a mostrar los distintos comportamientos del gas de síntesis, dependiendo de la biomasa que se utilice.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Director YESID JAVIER RUEDA ORDÓÑEZ Ingeniero Mecánico PhD. Codirector RAÚL ANDRÉS SERRANO BAYONA Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ANALYSIS BANK OF THE GASIFICATION PROCESS FOR THE COMBUSTION LABORATORY.*

AUTHORS: Laura Ximena Serrano Bayona.
María Camila Uribe Mora.**

KEY WORDS: Gasifier, design, downdraft, biomass.

DESCRIPTION:

The implementation of a gasification bench in the combustion laboratory of the School of Mechanical Engineering became necessary in order to study and learn about the gasification process, benefiting undergraduate, graduate and even the research branch through the group. of Research in Energy and Environment (GIEMA) attached to the school.

In the development of this work is the thermodynamic analysis, the characterization of the working biomass, the composition of the synthesis gas, as well as the general and detailed design of the gasifier where all the parameters and expected conditions mentioned before were taken into account for the respective team calculations. Subsequently, the "step by step" in the manufacturing of the equipment is shown and the operation, maintenance and cleaning procedure of the gasifier is presented to correctly carry out the tests in the laboratory bench so they can be performed in a simple way and the equipment can have a longer useful life.

Finally, a method of using the gasifier is established to test it, the equipment is adaptable to the variation of parameters such as: incident air flow and type of biomass, with this we proceed to show the different behaviors of the synthesis gas, depending of the biomass used.

* Degree work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. Director YESID JAVIER RUEDA ORDÓÑEZ Mechanical Engineer PhD. Co-director RAÚL ANDRÉS SERRANO BAYONA Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander conmemoró sus 70 años con la entrega del nuevo edificio de la escuela de Ingeniería Mecánica, el cual cuenta con 20 nuevos laboratorios puestos a disposición de estudiantes y profesores; dada la cantidad de recintos que representa este número, se crea la necesidad de equiparlos con bancos para prácticas de laboratorio de acuerdo con el criterio de cada profesor de la escuela, para ello, se selecciona un laboratorio de interés, en este caso el laboratorio de combustión.

Teniendo en cuenta que en Colombia se generan gran cantidad de residuos a partir de la variedad de cultivos producidos en el país y, para potenciar la utilización de dichos residuos, se considera importante el estudio de la conversión de biomasa para producción energética desde el foco universitario con el fin de poder realizar trabajos a nivel industrial.

Con el propósito de suplir dichas necesidades se considera el diseño y la construcción del banco de gasificación donde se consigan percibir fenómenos de estudio de varias asignaturas, tales como termodinámica I y II, transferencia de calor y sistemas térmicos, además de que pueda ser de uso para materias electivas o de investigación.

La construcción de este banco para el laboratorio de combustión representa una gran oportunidad académica para los estudiantes que se encuentran en semestres inferiores, cursando asignaturas como las mencionadas anteriormente, ya que en este proyecto se encuentra aplicada gran parte de la teoría impartida en las materias en cuestión. Cabe resaltar que es más sencillo para un estudiante entender los fenómenos a través de formas didácticas como los ejercicios en laboratorio.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Referente a la poca evidencia de gasificadores en Santander, específicamente en la Universidad Industrial de Santander, se plantea la construcción del banco para el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica.

De esta manera se aporta un recurso para el estudio práctico y funcional de la teoría estudiada en las aulas de clase, así como también en la investigación, donde se busca mejorar el proceso mediante la variación de factores como el flujo de aire incidente y el establecimiento de la biomasa más adecuada para obtener potencial energético, por lo tanto, se requiere realizar el diseño y la implementación del banco de laboratorio para satisfacer las problemáticas mencionadas anteriormente.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir e implementar un gasificador de lecho fijo, por lotes, a escala de laboratorio adaptable para el estudio energético de varios tipos de biomasa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño conceptual y dimensionar el banco de gasificación con los siguientes parámetros:
 - Procesamiento por lotes de máximo 1 kg de biomasa por hora.
 - Tamaño de partícula menor que 2 mm.
 - Reactor de lecho fijo.
- Validar el prototipo del banco de gasificación con el fin de someterlo a pruebas y evaluar su efectividad.
- Determinar la composición del gas de síntesis producido con el fin de evaluar el funcionamiento del producto final (banco de laboratorio), implementar el dispositivo en el laboratorio de combustión y hacer entrega de éste y de los manuales de funcionamiento y mantenimiento del sistema.
- Diseñar experiencias didácticas para el banco de gasificación del laboratorio.

3. GENERALIDADES

3.1 ANTECEDENTES

3.1.1 Biomass downdraft gasifier with internal cyclonic combustión chamber: Design, construction, and experimental results¹. El objetivo de este artículo es el diseño de un gasificador tipo downdraft con una cámara de combustión cíclica para maximizar la concentración de los componentes que favorecen la combustión en los gases obtenidos.

Para tener en cuenta en nuestro desarrollo del proyecto tomamos como un punto de análisis la materia prima que vamos a utilizar, dado que, dependiendo del ambiente, los componentes van a variar, tomando como punto de referencia la eficiencia que se obtendrá con el gasificador respecto al gas que se desprende de la biomasa trabajada.

3.1.2 Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz². El objetivo planteado en este proyecto es el de generar una propuesta de aprovechamiento de la cascarilla de arroz para la cocción de alimentos, a través de un proceso de gasificación. La cascarilla de arroz es escogida debido a los grandes cultivos de arroz existentes en Perú, se desperdicia mucho el potencial energético al desechar la cascarilla, y se consideró

¹ KRUSHNA, Patil., BHOI, Prakash., HUHNE, Raymond., BELLMER, Danielle. Biomass downdraft gasifier with internal cyclonic combustion chamber: Design, construction, and experimental results. En: Bioresource Technology. [En línea]. Elsevier, Mayo, 2011, Vol. 102, nro. 10, Pp: 6286-6290. [Consultado: 10 de junio de 2019]. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.03.033

² HUARAZ CHOI, Carlos Yi. Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz. [En línea]. Lima. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. 2013. [Consultado: 10 de junio de 2019].

Disponible en:

http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4497/HUARAZ_CARLOS_GASIFICADOR_25KW.pdf?sequence=1&isAllowed=y

su gasificación como herramienta que se puede aplicar para procesos de calefacción, deshidratación o cocción.

El desarrollo de este trabajo nos da un claro ejemplo de todos los puntos que componen el diseño y construcción de un gasificador, las variables a tener en cuenta son distintas dependiendo del ambiente, los materiales a usarse varían de acuerdo a los costos con los cuales cuenta la persona que hará uso de esta máquina. Nos llamó la atención por el análisis de costos y de vida útil que presentan y lo mejor de todo es de gran eficiencia que presentara el proyecto al ser desarrollado, con ello se da una mayor confiabilidad y grandes mejoras al proceso energético el cual está atrasado en nuestro país y necesita un cambio inmediato en la producción de energía.

3.1.3 Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo³. El trabajo consta de dos partes, en la primera se quiere diseñar y construir un gasificador de lecho fijo de corrientes paralelas a escala utilizando el calentamiento indirecto por medio de la combustión de gases, trabajando con la presión atmosférica y a su vez teniendo como agente gasificante el vapor de agua.

Aprovechando el poder calorífico en la mezcla de gases que duplica la gasificación con calentamiento directo. Para la segunda parte se quiere trabajar con la caracterización del equipo, de igual forma realizar un modelo termodinámico para saber la composición del gas generado en el gasificador.

En la historia siempre se ha hablado de la importancia que le dan los seres humanos al tema de los combustibles fósiles, se sabe que ellos no van a perdurar en el

³ GARCÍA FERNÁNDEZ, Luis Eduardo. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. [En línea]. Tesis para optar el título de Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2011. [Consultado: 10 de junio de 2019]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/11054207.pdf>

transcurso de toda la vida, dado a eso algunas personas idóneas se encargaron de buscar nuevas materias primas con las cuales se abastece la demanda de energía, pero con recursos que perduraran en la historia. En estas circunstancias luego de la segunda guerra mundial, se considera la biomasa como materia prima para generar energía, es usada en la gasificación que será implementada en aplicaciones automotrices. Toma gran importancia la biomasa en la década de los setenta, cuando el incremento en el costo de los hidrocarburos es considerable.

Es bueno tener en cuenta que la biomasa puede ser utilizada como combustible sólido, gaseoso o líquido, el aprovechamiento que se le tiene produce emisiones bajas en toxicidad, es considerable el valor agregado que da a los residuos considerados desechos. Se trabaja con tres procesos fisicoquímicos, bioquímicos y termoquímicos. La mezcla obtenida de la gasificación de biomasa puede ser usada directamente para las aplicaciones térmicas, como materia prima para la producción de metanol o como combustible para los motores de combustión interna.

La teoría propuesta en el trabajo nos ayuda a ver un claro ejemplo de otro diseño realizado para un gasificador de lecho fijo, en él vemos que su esencia radica en la calidad de combustible que genera para dejar de lado el uso de energía proveniente de productos fósiles, al igual que otros antecedentes, tiene muy en cuenta las propiedades que distinguen a la materia prima que será utilizada para el proceso. Algo importante en este trabajo es la caracterización realizada al gas obtenido en la gasificación, con ello podemos ver los usos que se pueden dar con ese producto.

3.1.4 Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento de la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial de Santander⁴. Con el fin

⁴ BARAJAS PEÑARANDA, Fabian Yesid. Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial De Santander. [En línea]. Tesis Doctoral. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela De Ingeniería Mecanica. 2013. [Consultado: 10 de junio de 2019].

Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/17247>

de querer aprovechar las características energéticas que contienen los residuos forestales que son desechados en la Universidad Industrial de Santander, se plantea el diseño y construcción de un gasificador cuya fuente de biomasa son las astillas de madera provenientes de la trituración de los desechos forestales.

Es una ventaja tener un trabajo desarrollado en la universidad, en éste se están analizando diversas variables y tal vez diseños del gasificador para hacer un mayor aprovechamiento de la materia prima usada en el proceso, a su vez, se están teniendo en cuenta los detalles que se plantean en diseños teóricos argumentando cada una de las diferentes posiciones en las cuales se podría encontrar ubicado el tubo de escape, con esto podemos ver que nos despierta un poco la curiosidad por saber que más detalles podemos aportar para mejorar nuestro modelo.

4. REFERENTES TEÓRICOS

4.1 BIOMASA

Biomasa es la materia orgánica que se encuentra en la biosfera de la superficie terrestre, la cual representa una fracción muy pequeña de la masa terrestre. Los residuos generados a partir de los procesos de transformación natural o artificial de la materia viva u orgánica, también se constituye en biomasa⁵.

En la composición de la biomasa se encuentran grandes cantidades de carbono, oxígeno e hidrógeno. Las cadenas largas de los anteriores elementos constituyen los compuestos involucrados en las reacciones exotérmicas generadoras de energía. Por consiguiente, la biomasa presenta una cantidad considerable de energía almacenada en su conjunto de componentes orgánicos de origen tanto vegetal como animal.

Cuando la biomasa se somete a un proceso de combustión, el aporte al calentamiento global por sus emisiones de CO₂ es neutro, lo cual significa que su uso como recurso energético no contribuye a aumentar la proporción de CO₂ en la atmósfera, siempre y cuando exista un balance cero entre la biomasa producida por el medio natural y la usada en la producción de energía.

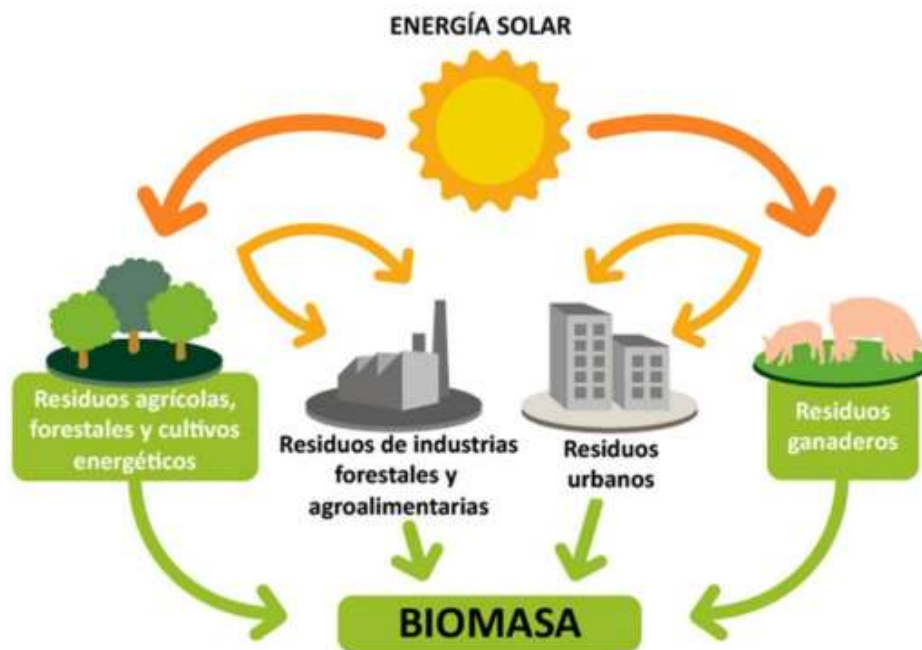
A diferencia de los combustibles fósiles, la biomasa no tarda millones de años en desarrollarse y, además, puede reproducirse, es decir, se reinicia su proceso

⁵ COLOMBIA. Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), Universidad Industrial de Santander (UIS). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. ISBN: 978-958-8504-59-9.

mediante la germinación de nuevas plantas, por lo cual se considera renovable; esto representa su gran atractivo como fuente de energía o productos químicos⁶.

En la figura 1 se observan distintos agentes productores de biomasa tales como los residuos agrícolas, industriales, urbanos y /o ganaderos.

Figura 1. Distintos agentes que producen biomasa.



Fuente: Estructuras bioclimáticas avanzadas

4.1.1 Composición de la biomasa⁷. La composición polimérica de las paredes celulares se clasifica principalmente en celulosa, hemicelulosa y lignina.

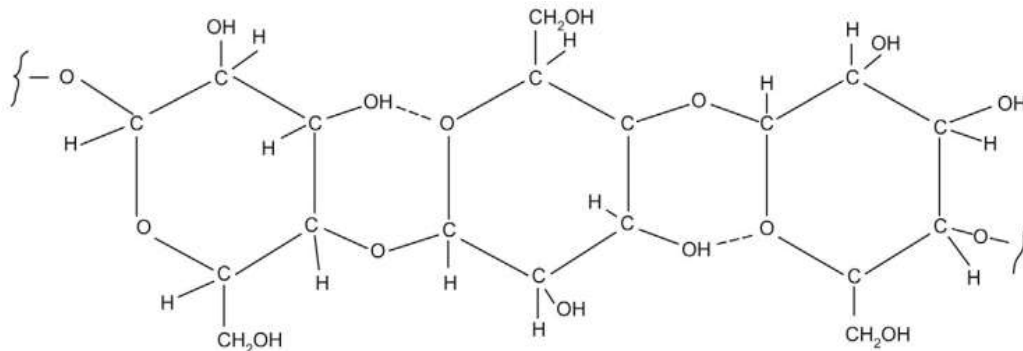
4.1.1.1 Celulosa. Su fórmula genérica es $(C_6H_{10}O_5)_n$ y representa una larga cadena de polímeros con un alto grado de polimerización (<10.000) y un gran peso

⁶ BASU, Prabir. Introducción. En: Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción: Diseño práctico y teoría. [En línea]. 3 ed. Academic Press. 2018. Capítulo 1. p. 2. [Consultado el 26 de noviembre de 2019]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00001-7>

⁷ BASU, Prabir. Características de la biomasa. En: Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción: Diseño práctico y teoría. [En línea]. 3 ed. Academic Press. 2018. Capítulo 3. p 61-63. [Consultado el 28 de noviembre de 2019]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00003-0>.

molecular (<500.000). Es el componente estructural primario de las paredes celulares en la biomasa. Su cantidad varía del 90% (en peso) en el algodón al 33% para la mayor parte de las demás plantas. La estructura cristalina compuesta principalmente de moléculas de glucosa conforma el esqueleto de muchas de las biomásas terrestres (ver figura 2).

Figura 2. Estructura molecular de la celulosa.



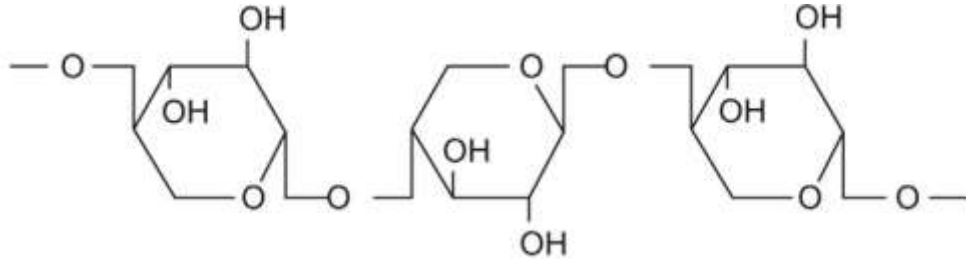
Fuente: BASU, Prabir. Estructura molecular de la celulosa [imagen]. Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción. Academic Press. 2018. P. 62.

La celulosa es altamente insoluble y es el mayor contribuyente a la formación de alquitranes durante la gasificación de biomasa.

4.1.1.2 Hemicelulosa. La hemicelulosa está constituida por una estructura poco resistente, aleatoria y amorfa. Consiste en un grupo de carbohidratos con un bajo grado de polimerización ($DP < 100-200$) y es representado por la fórmula $(C_5H_8O_4)_n$, como se muestra en la figura 3.

Es soluble en soluciones alcalinas débiles, representa cerca del 20% o 30% de peso seco de la mayoría de la madera y tiende a producir más gases y menos alquitrán que la celulosa.

Figura 3. Estructura molecular de una hemicelulosa y xylan típicas.

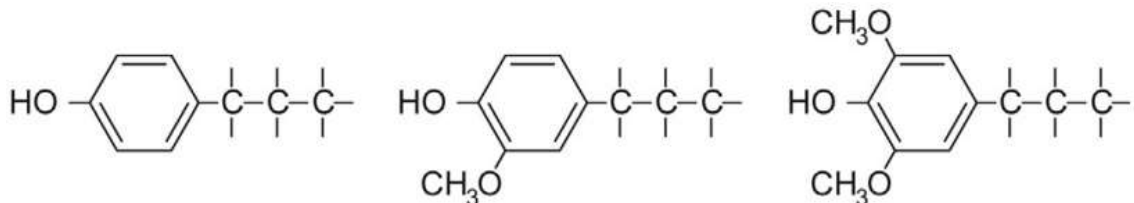


Fuente: BASU, Prabir. Estructura molecular de una hemicelulosa y xylan típicas. [imagen]. Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción. Academic Press. 2018. P. 62.

4.1.1.3 Lignina. Es un componente que cumple la función de pegamento manteniendo unidas las células adyacentes.

La lignina es principalmente un polímero tridimensional de 4-propenil fenol, 4-propenil-2-metoxifenol y 4-propenil-2,5-dimetoxil fenol (ver figura 4).

Figura 4. Algunas unidades estructurales de la lignina.



Fuente: BASU, Prabir. Algunas unidades estructurales de la lignina. [imagen]. Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción. Academic Press. 2018. P. 63.

Es uno de los polímeros orgánicos más abundantes de la tierra, después de la celulosa. En madera dura común, existe entre 18% y 25% lignina en peso seco, mientras que, en madera blanda, este componente varía entre 25% y 35%. La unidad monomérica dominante en los polímeros son los anillos de benceno.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA⁸.

La composición típica de la biomasa comprende cuatro elementos principales: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N). Para el diseño térmico en sistemas de combustión, los dos tipos de caracterización mostrados a continuación son los más utilizados:

4.2.1 Análisis último. Un típico análisis último comprende:

$$C + H + O + N + S + \text{Cenizas} + \text{Humedad} = 100\% \quad (1)$$

Donde C, H, O, N y S corresponden a los porcentajes másicos de los elementos en el combustible. Este análisis elemental excluye la humedad y las cenizas, por lo tanto, brinda un análisis en base seca y libre de cenizas.

Es importante resaltar que no todos los combustibles contienen todos los elementos anteriores. En su mayoría, la biomasa puede estar libre de azufre (S). El agua en el combustible se expresa como humedad, por lo cual, en el análisis final el hidrógeno y oxígeno no son incluidos en lo que corresponde a la humedad sino los que se encuentran presentes en los componentes orgánicos de la biomasa combustible.

4.2.2 Análisis próximo. Este análisis proporciona la composición de biomasa en término de sus componentes brutos, tales como la humedad (M), materia volátil, cenizas y carbono fijo. Es un análisis simple y económico.

4.2.2.1 Materia volátil. La materia volátil de un combustible corresponde al vapor condensable y no condensable que se libera cuando se calienta la biomasa. Esta cantidad depende de la velocidad de calentamiento y la temperatura.

⁸Ibíd., p. 77-80.

4.2.2.2 Cenizas. Es el residuo sólido inorgánico que resulta de todo el proceso de gasificación luego de que la biomasa se queme por completo. Se compone principalmente de sílice, aluminio, hierro, calcio y en menores proporciones pueden estar presentes el magnesio, titanio, sodio y potasio. Algunos de los componentes de la ceniza pueden sufrir oxidación durante la combustión.

El contenido de cenizas en la biomasa por lo general es muy poco, sin embargo, este puede desempeñar un papel muy útil en su utilización si la ceniza contiene metales alcalinos como el potasio (P) o haluros como el cloro (Cl). Estos componentes resultan bastante significativos si tenemos en cuenta que al aglomerarse causa ensuciamiento y corrosión en calderas o gasificadores.

4.2.2.3 Humedad. La raíz de la biomasa absorbe la humedad del suelo y la conduce hasta las hojas. Esta viaja a través de los conductos capilares de la planta. La fotosíntesis que se lleva a cabo en las hojas utiliza parte de esta humedad y el sobrante es liberado a la atmósfera mediante transpiración, es por esto por lo que hay más humedad en las hojas en comparación con el tronco del árbol.

El contenido total de humedad de algunas biomásas puede ser de hasta un 90%. Durante la conversión, la humedad drena gran parte de la energía suministrable de una planta de gasificación debido a que esta energía utilizada en la evaporación no es recuperable. Este parámetro de entrada resulta importante en el diseño dado que representa costo de transporte o penalización energética en el proceso de secado de biomasa.

La humedad en la biomasa puede encontrarse en dos formas:

- Libre o externa.
- Inherente o en equilibrio.

4.2.2.4 Carbono fijo (FC). Es el carbón sólido comprendido en la biomasa que permanece en el Char en el proceso de pirólisis después de la desvolatilización. Es determinado a través de la siguiente ecuación, donde M representa los contenidos de humedad, materia volátil (VM) y cenizas.

$$FC = 1 - M - VM - \text{Cenizas} \quad (2)$$

El carbono fijo en el char incluye carbono elemental en el combustible original además de cualquier residuo carbonoso formado durante el calentamiento.

El carbono de la biomasa proviene de la fijación fotosintética del CO₂ y, por lo tanto, todo es orgánico. En la determinación de materia volátil, una parte del carbono orgánico se transforma en un material carbonoso denominado carbono pirolítico que no se determina directamente. La cantidad de materia volátil liberada de la biomasa depende de la velocidad de calentamiento.

Dado que el carbono fijo depende de la cantidad de materia volátil, realmente no correspondería a una cantidad fija, pero su valor medido en condiciones estándar brinda un parámetro de evaluación del combustible útil.

El carbono fijo es una condición importante ya que, en la mayoría de los análisis de gasificación, este factor determina la velocidad de gasificación y su rendimiento, además, esta reacción de conversión, que toma más tiempo en darse, se usa para determinar el tamaño del gasificador.

4.2.2.5 Char. El carbón, aunque es un residuo de pirólisis o desvolatilización de carbono, no es un carbono puro, tampoco es el carbono fijo de la biomasa.

El char, conocido como carbón pirolítico, contiene algunos volátiles y cenizas además del carbono fijo. Este carbón es muy reactivo, poroso y no se funde.

4.3 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA

La información descrita a continuación hace parte de las diferentes reacciones termoquímicas que se dan en el proceso de conversión de biomasa, están organizadas de la misma manera en cómo ocurren durante la operación.

4.3.1 Secado. Es un fenómeno endotérmico⁹ que sucede al introducir la biomasa en el reactor, este proceso se da debido al calor transmitido por convección desde la zona de combustión. Ocurre desde la temperatura ambiente hasta alrededor de los 150 [°C]. Por lo general, la humedad en la biomasa se encuentra en un rango de 10 a 50%, sin embargo, dado que la energía necesaria para evaporar la humedad puede llegar a ser alta y significaría una pérdida, los procesos de gasificación se realizan con biomasa con humedades entre el 10 y 20%¹⁰.

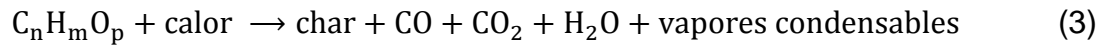
4.3.2 Torrefacción. Es un proceso termoquímico en un ambiente inerte o de oxígeno controlado donde la biomasa es calentada lentamente en un rango de temperatura entre 200 – 300 [°C] y se mantiene allí durante cierto intervalo de tiempo tal que su resultado sea una degradación casi completa de su hemicelulosa, al mismo tiempo que se incrementa el rendimiento de masa y energía del producto sólido¹¹.

⁹ ECHEVERRÍA CRUZ, Manuel Antonio. LÓPEZ MENA, Orlando Antonio. Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica. [En línea]. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Quitó: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2010. p 78. [Consultado el 30 de noviembre de 2019]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2058>.

¹⁰ ABAUNZA GÓMEZ, Álvaro., GARCÍA GAMBOA, Kevin. Modelamiento matemático de un gasificador de cisco de café de lecho fijo downdraft. [En línea]. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2019. p 26. [Consultado el 01 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/16977/1/175106.pdf>.

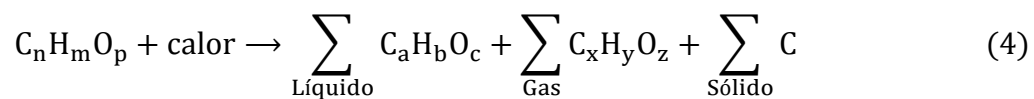
¹¹ BASU, Prabir. Torrefacción. En: Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción: Diseño práctico y teoría. [En línea]. 3 ed. Academic Press. 2018. Capítulo 4. p 93. [Consultado el 01 de diciembre de 2019]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00004-2>.

La torrefacción se centra en la producción de combustibles sólidos ricos en carbono, por lo cual el gas y la producción de combustible líquido se minimiza. La ecuación (3) mostrada (tomada del libro Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción. Prabir Basu, 3ra Ed.) refleja dicho proceso:



4.3.3 Pirólisis. Es una descomposición termoquímica o craqueo de biomasa (o materia prima similar) en total ausencia de agentes oxidantes¹², de tal manera que se produzcan líquidos, vapores condensables, gases y carbonizados. Este proceso se da aproximadamente entre 300 y 650 [°C].

En la pirólisis, las grandes moléculas de hidrocarburos de la biomasa son reducidas a pequeñas moléculas, gases no condensables (CO, CO₂) y carbón sólido (char) como evidencia la ecuación (4):



4.3.4 Combustión. Es un proceso por el que la biomasa es oxidada, este se lleva a cabo en el rango de temperatura de 800 a 1000 [°C], utilizando aire como agente oxidante. En condiciones reales, con el fin de efectuar una oxidación real, se emplea una cantidad de aire mayor a la necesaria (aire en exceso).

La combustión de la biomasa desencadena la liberación de energía en forma de calor, cuyos productos resultantes son el dióxido de carbono (CO₂), agua en forma de vapor (H₂O_(g)), sales minerales contenidas en la biomasa, pequeñas cantidades

¹² BASU, Prabir. Pirólisis. En: Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción: Diseño práctico y teoría. [En línea]. 3 ed. Academic Press. 2018. Capítulo 5. p 155. [Consultado el 01 de diciembre de 2019]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00005-4>.

de óxidos de nitrógeno y de azufre, monóxido de carbono (CO), partículas de carbono © y productos orgánicos (hidrocarburos) resultantes de la combustión incompleta de la biomasa¹³.

4.3.5 Gasificación. Es un proceso termoquímico en el que la biomasa es transformada en gas combustible a través de una serie de reacciones que se dan gracias a la presencia de un agente gasificante (aire) en un ambiente carente de oxígeno¹⁴. Dependiendo del tipo de biomasa y del agente gasificante se establece la cantidad de energía (poder calorífico) resultante en el gas obtenido.

La gasificación es la conversión de un combustible sólido carbonoso, líquido e incluso gaseoso en productos gaseosos deseados con un valor de calentamiento aprovechable, que pueden ser usados como combustible o para producción de químicos de valor agregado¹⁵.

4.4 MODELOS DE GASIFICACIÓN

Para obtener el gas combustible deseado a partir de la conversión de biomasa es necesario tener en cuenta factores como el tamaño, la configuración y la elección de las condiciones operativas del tipo de gasificador¹⁶. Usualmente para establecer dichos parámetros se realizan prototipos o plantas piloto a los cuales se les somete

¹³ CARRASCO, Juan E. Combustión directa de la biomasa. [En línea]. Máster en Energías Renovables y Mercado Energético. España: Escuela de Organización Industrial. 2007-2008. p 15. [Consultado el 03 de diciembre de 2019]. Disponible en: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf.

¹⁴ ESPAÑA. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC) Dept. Conservación de Suelos y Manejo de Residuos Orgánicos. Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación (CTC). Agrupación de Conserveros y Empresas de Alimentación de Murcia, Alicante y Albacete (AGRUPAL). Gasificación. AGROWASTE. 2013. [Consultado el 03 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACION%20C3%93N.pdf>

¹⁵ BASU, Prabir. Teoría de gasificación. En: Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción: Diseño práctico y teoría. [En línea]. 3 ed. Academic Press. 2018. Capítulo 7. p 211. [Consultado el 04 de diciembre de 2019]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00007-8>.

¹⁶ Ibid., p. 246.

a pruebas para identificar las condiciones de operación óptimas, sin embargo, esta técnica a pesar de arrojar buenos resultados se traduce en costos elevados.

El uso de las técnicas “prueba y error” eran justificables en el pasado, donde se hacía difícil predecir el comportamiento de una máquina sin las herramientas adecuadas. En la actualidad, gracias a la investigación de científicos e ingenieros interesados en este campo, se han desarrollado modelos y softwares que permiten hacer dichas predicciones de manera más rápida, eficiente y reduciendo drásticamente la inversión de dinero.

4.5 MODELOS DE SIMULACIÓN

Los modelos de simulación en gasificadores se clasifican en cuatro grupos: equilibrio termodinámico, cinético, dinámica de fluidos computacional (CFD) y red neuronal artificial (ANN). El modelo de equilibrio termodinámico se divide en dos: equilibrio estequiométrico y no estequiométrico. A continuación, se hará énfasis en estos dos modelos ya que este proyecto se basa en el uso del modelo de equilibrio termodinámico.

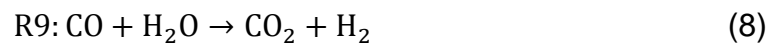
4.5.1 Modelo de equilibrio termodinámico¹⁷. Para estudiar la influencia del combustible y los parámetros implicados en el proceso, es útil el cálculo del equilibrio termodinámico debido a que este no depende del diseño del gasificador.

Este modelo representa una predicción acertada sobre el rendimiento máximo que puede alcanzar el producto que se desea obtener a pesar de que no se alcance el equilibrio químico o termodinámico dentro del gasificador.

¹⁷ Ibíd. p. 247.

A pesar de la ventaja mencionada anteriormente, la limitante de este método es que no es posible predecir la influencia de parámetros geométricos o hidrodinámicos como la altura, las variables de diseño o la velocidad de fluidización en el gasificador.

El equilibrio químico está determinado por cualquiera de los modelos a mencionar (estequiométrico o no estequiométrico). De manera resumida, el modelado de equilibrio de un gasificador se basa en las cuatro reacciones generales de gasificación:



Los modelos de equilibrio termodinámico en teoría son aplicables únicamente para procesos de gasificación llevados por encima de los 1225 [°C]. Para temperaturas de reacción por debajo de los 725 [°C], lo ideal es describir el proceso de gasificación a través de un modelo cinético, sin embargo, dada la cantidad de reacciones inmersas en el proceso y la complejidad del equipo, se han aplicado el modelo de equilibrio constante (estequiométrico) y la energía libre de Gibbs (no estequiométrico) para describir el proceso de gasificación en temperaturas entre los 725 y los 1000 [°C]¹⁸.

¹⁸ BERMUDEZ, J.M., FIDALGO, B., Production of bio-syngas and bio-hydrogen via gasification. En: Handbook of biofuels production [en línea]. 2 ed. Woodhead Publishing, 2016. p 444. ISBN: 9780081004562. [Consultado: 9 de enero de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004555000151>

4.5.1.1 Modelo de equilibrio estequiométrico¹⁹. También llamado modelo de equilibrio constante, este reúne las reacciones químicas y las especies implicadas. Por lo general comienza seleccionando todas las especies que contienen C, H y O, o cualquier otro elemento significativo. En caso de que otros elementos conformen una pequeña parte en la composición del gas producto, serán desconsiderados.

La complejidad de este modelo incrementa con el número de ecuaciones consideradas para la reacción.

4.5.1.2 Modelo de equilibrio no estequiométrico²⁰. Recibe también el nombre de minimización de la energía libre de Gibbs, en este modelo no es necesario ningún conocimiento relacionado con un mecanismo de reacción particular para resolver el problema.

En el sistema de reacción, el equilibrio es alcanzado al momento en que la energía libre de Gibbs del sistema se encuentra en su valor mínimo, es por ello por lo que este método está enfocado en minimizar la energía libre de Gibbs total. La única información necesaria para desarrollar este modelo es la composición elemental de la biomasa como material de alimentación del gasificador, el cual se obtiene de su análisis último.

4.6 AGENTES GASIFICANTES²¹

En un proceso de gasificación, el agente gasificante representa gran influencia en el syngas, ya que este puede hacer variar su composición y poder calorífico. Dichos agentes pueden ser: aire, hidrógeno, oxígeno o vapor de agua.

¹⁹ BASU, Prabir. Op. cit., Capítulo 7. p. 248

²⁰ Ibid., p. 249-250.

²¹ CARRASCO VENEGAS, Luis Américo. Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis. [En línea]. Informe final de investigación. Callao: Universidad Nacional del Callao. Facultad de Ingeniería Química. 2015. p. 27-28.

4.6.1 Aire. Al gasificar con aire, una parte de la biomasa utilizada se quema con el oxígeno y en el resto se da el fenómeno de reducción. Por lo general, el gas obtenido contiene nitrógeno en un 50% y su poder calorífico oscila en los 5,5 [MJ/Nm³]. Este gas de síntesis es recomendable para uso en motores de combustión interna convencionales.

4.6.2 Hidrógeno. Es el mejor combustible cuyo uso se permite en cualquier dispositivo térmico o electroquímico, sin embargo, no es recomendable utilizarlo de forma industrial.

Con el hidrógeno como agente gasificante podemos obtener un syngas que alcanza un poder calorífico de aproximadamente 30 [MJ/Kg].

4.6.3 Oxígeno o vapor de agua. Es considerado el agente gasificante más adecuado para la producción de gas de síntesis dado que el aire no representa costo alguno y el vapor de agua se consigue a partir del calor contenido en la biomasa; el oxígeno sí tiene un costo energético y económico que se debe tener en cuenta.

Este sistema mejora el rendimiento del proceso y aumenta la proporción de hidrógeno en el syngas.

4.7 BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR AGRÍCOLA

En la producción agroindustrial, no es utilizada completamente la materia prima, debido a que ésta también produce unos residuos, sin embargo, los nombrados anteriormente presentan un alto potencial energético, por este motivo son utilizados como fuente de biomasa; en Colombia este tipo de biomasa se presenta en el tratamiento del cultivo de arroz, la producción de café, la producción de plátano, etc.

4.7.1 Biomasa como materia prima. De acuerdo con el enfoque de este proyecto y manteniendo los objetivos planteados inicialmente, se presenta información sobre uno de los cultivos de mayor producción a nivel nacional, cuyos residuos sólidos no son completamente aprovechados y representan una problemática ambiental por su mala disposición final, como lo es el cultivo de arroz (cascarilla de arroz y paja).

4.7.1.1 Cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) El arroz constituye uno de los cultivos más importantes a nivel mundial ya que suponen la base para la seguridad alimentaria de la humanidad. En la figura 5 podemos observar un cultivo típico de arroz, donde se evidencia la necesidad constante de agua, la morfología y apariencia del cereal.

Colombia hace parte de los países que produce más de 1 millón de toneladas de arroz al año, se cultiva en 211 municipios y alrededor de 28.000 productores directos y aproximadamente 2 millones de personas de forma indirecta se ven beneficiados con este cultivo²².

²² FEDEARROZ., AMTEC. Manejo integrado del cultivo del Arroz. [En línea]. Colombia. PRODUMEDIOS. 2013. p: 23-25. [Consultado el 9 de enero de 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/283764171/Manejo-Integrado-Del-Cultivo-Del-Arroz-Libro-Digital-1>

Figura 5. Cultivo de arroz.



Fuente: Agricultor de Tilodirán (vereda de Yopal – Casanare).

Dado que a nivel nacional existe una producción de 2.463.689 [t/año], lo cual refleja una cantidad de residuos de 6.282.407 [t/año] y que el potencial energético es de 27.835,94 [TJ/año] (ver tabla 1), siendo que estos residuos no son tratados y suponen una problemática ambiental, encontramos la forma de aprovecharlos a través de la quema, teniendo en cuenta que no constituye una contaminación adicional al medio ambiente.

Tabla 1. Potencial energético departamental para biomasa residual de arroz

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	21,635	54,875	139,931	620.00
Bolívar	33,374	125,250	319,388	1,415.13

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Caquetá	1,268	1,539	3,924	17.39
Cauca	1,446	5,352	13,648	60.47
Cesar	24,780	144,896	369,485	1,637.10
Córdoba	32,404	104,258	265,858	1,177.96
Cundinamarca	1,666	10,146	25,872	114.63
Chocó	11,946	21,565	54,991	243.65
Huila	30,258	214,038	545,797	2,418.30
La Guajira	2,750	13,480	34,374	152.3
Magdalena	2,563	12,806	32,655	144.69
Meta	65,456	353,516	901,466	3,994.19
Nariño	799	470	1,200	5.31
Norte de Santander	20,642	120,134	306,342	1,357.33
Santander	470	3,108	7,925	35.12
Sucre	41,505	184,618	470,776	2,085.90
Tolima	99,880	763,109	1,945,928	8,621.97
Valle del Cauca	5,970	40,031	102,079	452.29
Arauca	3,646	14,190	36,185	160.33
Casanare	51,189	274,409	699,743	3,100.40
Putumayo	1,010	1,238	3,157	13.99
Amazonas	28	38	97	0.43
Guaviare	676	548	1,397	6.19
Vaupés	60	45	114	0.51
Vichada	22	30	77	0.34
TOTAL	455,444	2,463,689	6,282,407	27,835.94

Fuente: UIS, UPME, IDEAM. Potencial energético departamental para biomasa residual de arroz. [en línea]. Bucaramanga (Colombia): Universidad Industrial de Santander, 2011. P. 156.

4.7.1.2 Morfología de la planta de arroz. La planta de arroz es una gramínea anual de tallos cilíndricos y huecos, con nudos y entrenudos, las hojas, de lámina plana y angosta se unen al tallo mediante vainas²³ (FEDEARROZ, 2015). A continuación,

²³ *Ibíd.*, p. 109.

se describe la forma y estructura de la semilla, el tallo y las hojas, cuyo desecho final se convierte en nuestra biomasa de trabajo.

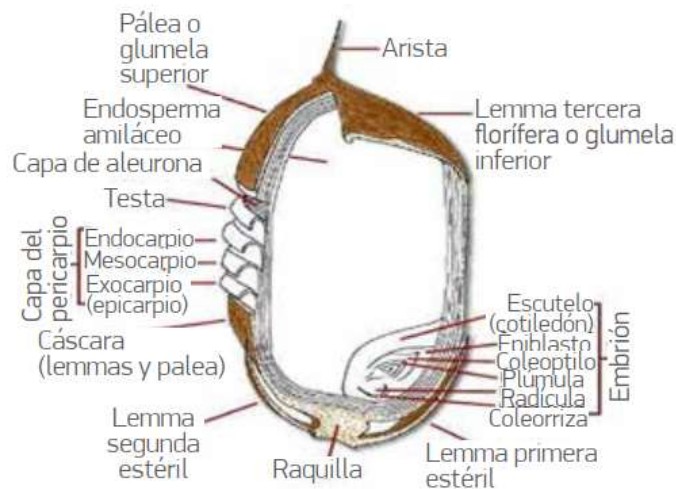
Cascarilla de arroz.

La cascarilla corresponde al desecho de la semilla una vez el grano completa su proceso de maduración. Ésta se compone de la lema, la palea y partes asociadas a las dos estructuras mencionadas (ver figura 6).

Bajo la lema y la palea se encuentran 3 capas celulares que constituyen el pericarpio y bajo esta se encuentran el tegumento y la aleurona²⁴.

La cáscara es la capa dura que protege al grano, posee una buena conductividad térmica y gran capacidad aislante.²⁵

Figura 6. Semilla de Arroz.



Fuente: FEDEARROZ. Semilla de Arroz. [imagen]. Manejo integrado del cultivo del arroz. PRODUMEDIOS. 2013. P. 83

²⁴ *Ibíd.*, p. 83.

²⁵ Estructura de los cereales: Arroz. [sitio web] http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/semillas/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=24 Consultado: 09 de enero de 2020.

Paja de arroz.

La paja de arroz se compone del residuo final del tallo y la hoja (ver figura 7). El tallo consta de una sucesión alterna de nudos y entrenudos. En cada nudo se forman una hoja y una yema.

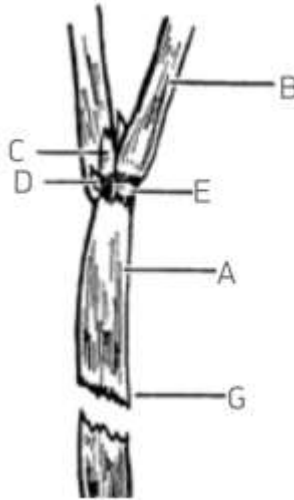
Las hojas se distribuyen a lo largo del tallo. En una hoja se encuentran las siguientes partes²⁶:

- Vaina o base de la hoja: Sale de un nudo, está dividida desde su base por la nervadura central y es surcada por varios haces vasculares.
- Lámina de la hoja: De punta aguda, larga, angosta y de característica lineal. En el tallo principal se pueden llegar a desarrollar de 9 a 23 hojas dependiendo del tipo de semilla. La vida de las hojas es corta y cuando la planta se encuentra en periodo de floración, se visualizan 4 o 5 hojas verdes en cada tallo, de las cuales dos de las hojas superiores se hacen cargo de la fotosíntesis del 75% de los carbohidratos que van al grano.
- Cuello: Es la unión entre la lámina de la hoja y la vaina. En este se encuentran la lígula y aurículas.
- Lígula: Es una estructura que posee forma triangular apergaminada o membranosa ubicada en el interior del cuello junto a la vaina; su forma, tamaño y color dependen del tipo de arroz.
- Aurículas: Son 2 apéndices ubicadas en el cuello, abrazando el tallo, con forma de hoz.

²⁶ FEDEARROZ., AMTEC, Op. cit., p. 110-111.

La lígula, junto con las aurículas, distinguen a la planta de arroz, permitiendo que no sea confundida con malezas comunes.

Figura 7. Partes de la hoja de arroz. A) Vaina; B) Hoja; C) Lígula; D) Aurícula; E) Cuello.



Fuente: FEDEARROZ. Partes de la hoja de arroz. A) Vaina; B) Hoja; C) Lígula; D) Aurícula; E) Cuello. [imagen]. Manejo integrado del cultivo del arroz. PRODUMEDIOS. 2013. P. 111

De acuerdo con un estudio²⁷ realizado en China, la estabilidad térmica de la cascarilla de arroz fue mejor que la de la paja, lo que sugiere que la pirólisis de esta última se produjo con mayor facilidad, además, la pérdida de peso total de la paja (69,96%) fue mucho mayor que la de cascarilla (51,05%), lo cual indica que el rendimiento residual de carbón de la paja de arroz fue menor. El valor del índice característico de liberación volátil de la paja fue mayor en comparación al de la cascarilla de arroz.

²⁷ YAO, Xiwen., XU, Kaili., LIANG, Yu. Comparing the thermo-physical properties of rice husk and rice straw as feedstock for thermochemical conversion and characterization of their waste ashes from combustion. En: BioResources [en línea]. Noviembre, 2016. [Consultado: 20 de enero de 2020]. DOI: 10.15376/biores.11.4.10549-10564

En cuanto a los perfiles de liberación de gas, tanto la paja como la cascarilla de arroz presentaron un patrón similar, sin embargo, debido al mayor contenido de materia volátil, humedad y carbono fijo, estos mostraron valores mayores en la paja de arroz en comparación con la cascarilla. En condiciones iguales en el proceso de pirólisis, los resultados indicaron que la paja de arroz se pirolizó más que la cascarilla.

Teniendo en cuenta el estudio mencionado anteriormente seleccionamos como biomasa crítica la cascarilla de arroz y tomamos los valores obtenidos en pruebas de laboratorio para efectos de diseño estequiométrico y en detalle.

5. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO COMPLETO

El desarrollo de este proyecto está encaminado a suministrarle al estudiante la experiencia operativa en el banco de laboratorio, donde, a partir del diseño y la construcción del banco de gasificación, se podrán modificar ciertos criterios como el flujo de aire, el tipo de biomasa, entre otros, de acuerdo con los requerimientos dados, de manera que el estudiante desarrolle aptitudes que le puedan ser de utilidad en el campo laboral.

5.2 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD

Para la selección del tipo de gasificador, y su aplicación como banco de laboratorio, la elección de éste dará como resultado una composición de gas distinta. En el diseño del sistema se deben tener en cuenta ciertos parámetros establecidos por el cliente y de igual manera los ingenieriles, como se muestra a continuación:

5.2.1 Requerimientos del cliente

- Efectividad.
- Seguridad.
- Fácil mantenimiento.
- Facilidad de operación.
- Económica.

- Dimensionamiento.
- Longevidad.
- Piezas económicas.
- Poco consumo energético.

5.2.2 Requerimientos de diseño

- Capacidad: 1 [Kg].
- Temperatura de trabajo: 1000 [°C]
- Tamaño: Escala de laboratorio.
- Sistema de control: Manual.
- Mantenibilidad: 1 [año].
- Calidad del gas de síntesis.
- Estandarización de piezas.
- Tiempo de trabajo: 1 [hora]
- Costo.
- Requisitos de materia prima.

5.2.3 Matriz de calidad. La información contenida en las tablas 2, 3 y 4 contiene los diferentes parámetros de selección de alternativas, así como también la escala de evaluación y los respectivos puntajes.

Tabla 2. Matriz QFD.

REQUERIMIENTOS INGENIERILES / REQUERIMIENTOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO	Capacidad: 1 [Kg]	Temperatura de trabajo: 800 [°C]	Dimensiones: [Laboratorio]	Sistema de control: Manual	Mantenibilidad: 1 [año]	Calidad del vapor de síntesis	Estandarización de piezas	Tiempo de trabajo: 1 [hora]	Costo	Requisitos de materia prima
Efectividad	3	9	3	9	3	9	1	9	3	9
Seguridad	3	9	1	9	9	1	3	3	9	9
Facilidad en mantenimiento	1	3	9	9	9	1	9	9	9	1
Facilidad de operación	9	3	9	9	3	1	1	1	3	3
Económica	9	1	9	9	9	1	9	3	9	3
Tamaño	9	3	9	3	9	3	9	3	9	9
Longevidad	1	3	1	3	9	1	3	9	3	3
Estética	1	0	3	3	3	0	0	1	3	9
Repuestos económicos	1	1	9	9	9	1	9	3	9	1
Poco consumo energético	9	3	3	9	3	1	1	9	3	9

Tabla 3. Escala de evaluación matriz QFD.

Escala de evaluación	Descripción
0	Malo
1	Regular
3	Bueno
9	Excelente

Tabla 4. Selección de los requerimientos ingenieriles más relevantes.

REQUERIMIENTOS INGENIERILES	REQUERIMIENTOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO		REQUERIMIENTOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO																		
	Valor requerimientos	Capacidad: 1 [Kg]	C1	Temperatura de trabajo: 800 [°C]	C2	Dimensiones: [Laboratorio]	C3	Sistema de control: Manual	C4	Mantenibilidad: 1 [año]	C5	Calidad del vapor de sintesis	C6	Estandarización de piezas	C7	Tiempo de trabajo: 1 [hora]	C8	Costo	C9	Requisitos de materia prima	C10
Electividad	10	3	30	9	90	3	30	9	90	3	30	9	90	1	10	9	90	3	30	9	90
Seguridad	9	3	27	9	81	1	9	9	81	9	81	1	9	3	27	3	27	9	81	9	81
Facilidad en mantenimiento	8	1	8	3	24	9	72	9	72	9	72	1	8	9	72	9	72	9	72	1	8
Facilidad de operación	7	9	63	3	21	9	63	9	63	3	21	1	7	1	7	1	7	3	21	3	21
Económica	6	9	54	1	6	9	54	9	54	9	54	1	6	9	54	3	18	9	54	3	18
Tamaño	5	9	45	3	15	9	45	3	15	9	45	3	15	9	45	3	15	9	45	9	45
Longevidad	4	1	4	3	12	1	4	3	12	9	36	1	4	3	12	9	36	3	12	3	12
Estética	3	1	3	0	0	3	9	3	9	3	9	0	0	0	0	1	3	3	9	9	27
Repuestos económicos	2	1	2	1	2	9	18	9	18	9	18	1	2	9	18	3	6	9	18	1	2
Poco consumo energético	1	9	9	3	3	3	9	9	3	3	1	1	1	1	9	9	3	3	9	9	9
Total			245		254		307		423		369		142		246		283		345		313

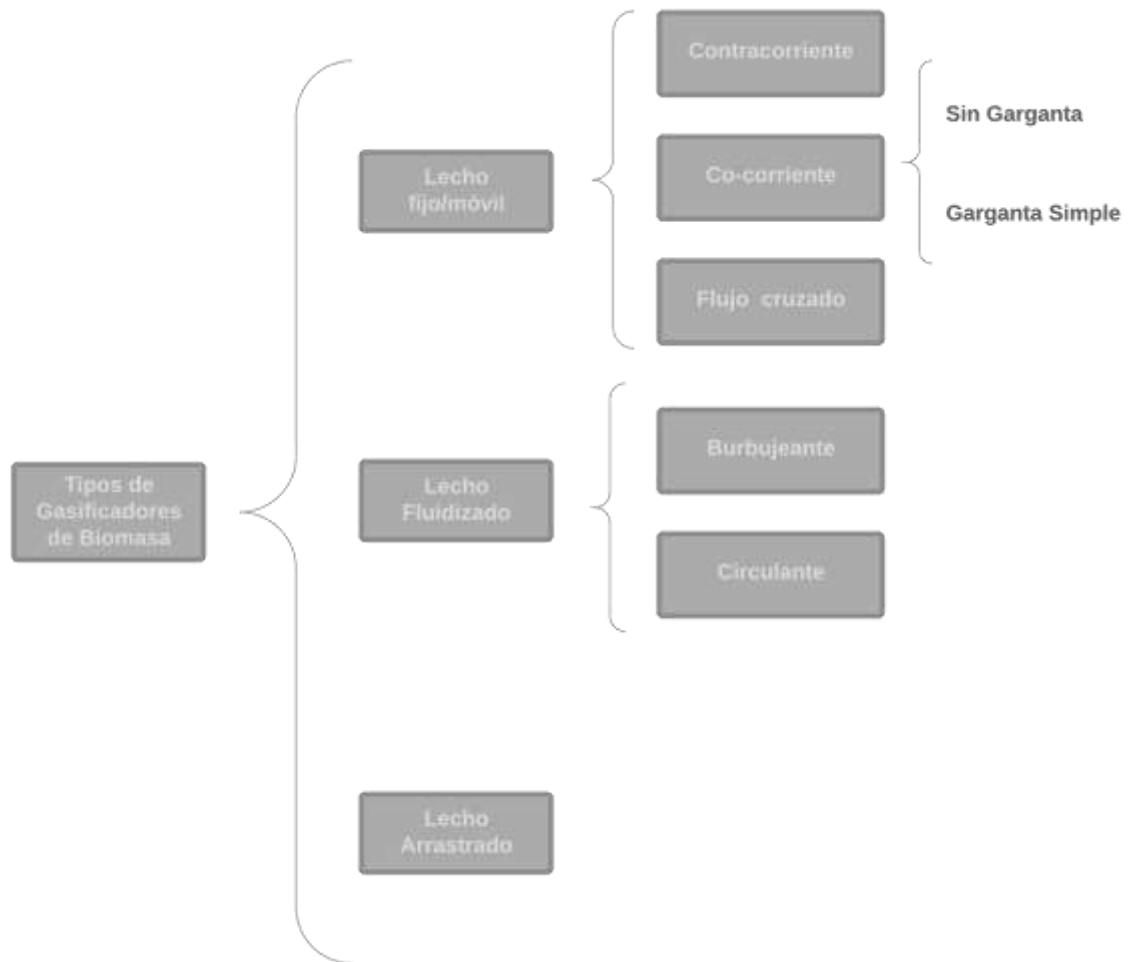
Los parámetros ingenieriles resultado de la matriz QFD, son los siguientes con sus respectivos valores:

- Sistema de control; C4 = 423
- Mantenibilidad; C5 = 369
- Costo; C9 = 345
- Dimensiones; C3 = 307
- Tiempo de trabajo; C8 = 283

5.3 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

Los gasificadores se dividen en varios tipos, y estos, a su vez varían en sus características. La figura 8 es un esquema representativo de los principales modelos de gasificadores, de los cuales hablaremos en el desarrollo de este capítulo.

Figura 8. Tipos de gasificadores.



5.3.1 Alternativas de lecho

5.3.1.1 Gasificador de lecho fijo. Es parte de la familia de reactores convectivos, el transportador de calor es un gas caliente que se filtra o pasa a través de las partículas de biomasa que pueden encontrarse en movimiento o estacionarias. Dicho gas debe ser completamente inerte (ECN-Energy research centre of the Netherlands) o presentar un pequeño porcentaje de oxígeno (2% - 3%) (Ryall, 2012).²⁸

²⁸ BASSU, Prabir. Op. cit., Capítulo 4. p 133.

Este tipo de lecho se denomina “fijo” y usualmente es usado cuando la biomasa es cargada en múltiples contenedores para luego ser extraída lentamente a través de un horno largo caliente no oxidante, mientras se gasifica, alimentándose el gas de forma descendente (co-corriente o Downdraft) o ascendente (contracorriente o Updraft).

Este tipo de reactor se utiliza cuando se dispone de carbones no aglutinantes o cuando el requerimiento de capacidad del proceso es relativamente pequeño.

Como ventajas de este tipo de lecho tenemos la simplicidad de su diseño, el bajo costo de su manufactura, la versatilidad en la implementación de distintos tipos de biomasa, la producción de un gas relativamente limpio de alquitranes²⁹ el intercambio interno de calor que arroja temperaturas bajas en la salida del gas, sin embargo, éste diseño presenta inconvenientes como la necesidad de separación de líquidos condensados que contienen alquitranes³⁰ ya que no es muy apto para trabajar con sólidos de humedad elevada.

5.3.1.2 Gasificador de lecho móvil. Este tipo de gasificador se diferencia porque las partículas se mueven con respecto a la pared del reactor. Dicha pared puede estar de forma horizontal, vertical o inclinada y las partículas se mueven debido a la gravedad, la fuerza de un dispositivo mecánico o movimiento vibratorio. La transferencia de calor ocurre de forma “convección sólido – gas”, que a su vez depende de la velocidad relativa entre la biomasa y el fluido caliente.³¹

²⁹ LÓPEZ, Ismael Sánchez; IZQUIERDO, A. G.; ALCÓN, N. E. Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación. [En línea]. En Conama: Congreso Nacional del Medio Ambiente. España. 2014. p 8. [Consultado el 1 de diciembre de 2019]. Disponible en:

<http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711942.pdf>

³⁰ CABELLO DOMÍNGUEZ, Antonio. Planta piloto de gasificación de biomasa. Proyecto Fin de Carrera defendido en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2008. p 25. [Consultado el 1 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20097/>

³¹ BASSU, Prabir. Op. cit., Capítulo 4. p 134.

Debido a su forma de operación, esta clase de lecho resulta más eficiente térmicamente, pero, al contar con piezas móviles, esta alternativa resulta ser una opción de mayor costo.

5.3.1.3 Gasificador de lecho fluidizado. En este tipo de reactor, el agente gasificante mantiene suspendido el gas inerte y el combustible hasta que éstos se convierten en cenizas volátiles y son arrastradas. Este estilo de lecho es versátil, presenta un buen desempeño en términos de transferencia de masa y energía, además logra una mezcla óptima de la fase sólida, esto se traduce en niveles altos de reacción, menor tiempo de residencia de las partículas y una temperatura constante.³²

En los gasificadores de lecho fluidizado el biogás obtenido es prácticamente limpio de alquitranes y metano, el volumen de producción de este gas es superior en comparación con los otros tipos de lechos, sin embargo, no se recomiendan para uso de biomasa³³ y presenta un elevado costo de construcción.

5.3.1.4 Gasificador de lecho arrastrado. Este tipo de lecho no es recomendado para su aplicación en la gasificación de biomasa debido a que el tiempo de trabajo de la biomasa en el reactor es muy corto y, debido a ello, las partículas deben estar finamente molidas (<75 μm) para que se pueda completar la reacción. Las materias primas de muchos de los tipos de biomasa no pueden ser pulverizados con facilidad; la biomasa, por lo general, tiene grandes cantidades de cenizas con un alto contenido alcalino, estas cenizas tienen un punto de fusión bajo, lo que implica un fenómeno agresivo al material refractario y al metal del gasificador.³⁴

³² ESPAÑA. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC) Dept. Conservación de Suelos y Manejo de Residuos Orgánicos. Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación (CTC). Agrupación de Conserveros y Empresas de Alimentación de Murcia, Alicante y Albacete (AGRUPAL). Op. cit., p 4.

³³ *Ibíd*, p 5.

³⁴ BERMUDEZ, J.M., FIDALGO, B. Op. cit., p 460.

5.3.1.5 Selección de alternativas. A continuación, se muestran los criterios de evaluación para tener en cuenta en la selección del tipo de lecho según los 5 parámetros enunciados en la tabla 5.

Tabla 5. Criterios y alternativas de selección según tipo de lecho.

Criterio de evaluación	Valor QFD	% del QFD	Lecho fijo	Lecho Móvil	Lecho Fluidizado	Lecho Arrastrado
Sistema de control	423	24.49	1	1	1	1
Mantenibilidad	369	21.37	9	9	9	9
Costo	345	19.98	9	3	3	1
Dimensiones	307	17.78	9	1	9	3
Tiempo de trabajo	283	16.39	3	3	3	9
	1727	100	31	17	25	23

Para la evaluación utilizamos la misma escala de valores de la tabla 2.

Tabla 6. Selección de la mejor alternativa.

Criterio de evaluación	Valor QFD	% del QFD	Lecho Fijo	C1	Lecho Móvil	C2	Lecho Fluidizado	C3	Lecho Arrastrado	C4
Sistema de control	423	24.49	1	0.24	1	0.24	1	0.24	1	0.24
Mantenibilidad	369	21.37	9	1.92	9	1.92	9	1.92	9	1.92
Costo	313	18.12	9	1.63	3	0.54	3	0.54	1	0.18
Dimensiones	307	17.78	9	1.60	1	0.18	9	1.60	3	0.53
Tiempo de trabajo	283	16.39	3	0.49	3	0.49	3	0.49	9	1.47
	1695	100	31	5.89	17	3.38	25	4.80	23	4.36

Finalmente, dados los resultados en la tabla 6, elegimos un gasificador de lecho fijo debido a que cumple los requerimientos planteados con anterioridad.

5.3.2 Alternativas para el ingreso de aire y biomasa

5.3.2.1 Gasificador co-corriente. Se caracteriza por el ingreso de la biomasa por la parte superior, de igual forma el agente gasificante entra a una distancia de la parte superior, o su ingreso sería también por las caras laterales del lecho, los

procesos que se dan en este gasificador son, el secado, pirolisis contigua a esto la oxidación, finalmente se da la gasificación y la salida del gas es por la parte inferior.

Una de sus características es que presentan una reducción en el área transversal, en esta zona se da la oxidación, con el fin de hacer que en la fase de pirolisis el gas que se produce pase por esta zona estrecha.

Su desventaja es que el syngas que se produce es pobre, este tipo de reactor que presenta el lecho necesita un bajo contenido de humedad en la biomasa.

Entre sus ventajas se da que produce un syngas libre de alquitranes.

Tabla 7. Datos relevantes de un gasificador equicorriente.

Datos relevantes	Valor
Eficiencia térmica	20-32 [%]
Eficiencia global	12-25 [%]
Temperatura de trabajo	1050-1200 [°C]

5.3.2.2 Gasificador contracorriente. Este tipo de gasificador es alimentado con biomasa por la parte superior, como el que se nombró anteriormente, y el agente gasificante entra por la parte inferior de éste, y el syngas que se produce sale en dirección contraria al ingreso de la biomasa.

El gas que resulta del proceso de gasificación que comprende las mismas zonas que el anterior gasificador sale a una temperatura entre 350-450 [°C], el viaje que hace el gas que se va produciendo a partir de las distintas zonas, produce una alta cantidad de alquitranes, el cual es la desventaja más grande de éste tipo de gasificador, su ventaja es que ofrece un alto intercambio de calor, a su vez que permite trabajar con combustible (biomasa) de alta humedad.³⁵

³⁵ CARRASCO VENEGAS, Luis Américo., Op. Cit. p 40-41.

Tabla 8. Datos relevantes de un gasificador contracorriente.

Datos relevantes	Valor
Eficiencia térmica	20-32 [%]
Eficiencia global	12-25 [%]
Temperatura de trabajo	1000 [°C]

5.3.2.3 Gasificador flujo cruzado. En este tipo de gasificador, la entrada de la biomasa como en los otros casos es por la parte superior, y el aire se ingresa solo por un lateral de éste, se utiliza para biomásas vegetales.

Este es el gasificador que presenta menos transformación de alquitranes, su temperatura de trabajo es bastante elevada, a su vez se suele utilizar en motores de escala pequeña y sus zonas de trabajo se dan alrededor de la oxidación, es decir en comparación con los otros, que se da cada proceso de manera descendente.

Tabla 9. Datos relevantes de un gasificador contracorriente.

Datos relevantes	Valor
Eficiencia térmica	25-35 [%]
Eficiencia global	12-25 [%]
Temperatura de trabajo	1500 [°C]

5.3.2.4 Selección de alternativas.

En la tabla 10 se encuentran los criterios de evaluación de las diferentes alternativas según el flujo.

Tabla 10. Criterios y alternativas de selección según flujo de ingreso.

Criterio de evaluación	Valor QFD	% del QFD	Co-corriente	Contra corriente	Flujo cruzado
Sistema de control	423	24.49	1	1	1
Mantenibilidad	369	21.37	9	9	3
Costo	345	19.98	9	3	3
Dimensiones	307	17.78	9	1	9
Tiempo de trabajo	283	16.39	3	3	3
	1727	100	31	17	19

Tabla 11. Selección de la mejor alternativa.

Criterio de evaluación	Valor QFD	% del QFD	Co-corriente	C1	Contra corriente	C2	Flujo cruzado	C3
Sistema de control	423	24.49	1	0.24	1	0.24	1	0.24
Mantenibilidad	369	21.37	9	1.92	9	1.92	3	0.64
Costo	313	18.12	9	1.63	3	0.54	3	0.54
Dimensiones	307	17.78	9	1.60	1	0.18	9	1.60
Tiempo de trabajo	283	16.39	3	0.49	3	0.49	3	0.49
	1695	100	31	5.89	17	3.38	19	3.52

En la tabla 11 se muestra el desarrollo de la selección del mejor tipo de flujo con sus respectivos puntajes, donde el flujo co-corriente es la mejor elección.

5.3.3 Alternativas para el estilo de garganta.

5.3.3.1 Sin garganta. Consiste en un recipiente cilíndrico no restringido en el cual su alimentación es ingresada desde arriba, fluyendo hacia abajo pasando a través de las cuatro zonas. Consta de un desempeño óptimo para biomásas con bajas densidades aparentes como por ejemplo la cascarilla de arroz³⁶.

5.3.3.2 Garganta simple. Es el diseño más utilizado en los gasificadores downdraft existentes, este consiste en un cambio de sección transversal denominado “garganta” donde se encuentra la zona de oxidación por donde pasan los vapores de la pirólisis y el agente gasificante es introducido por la parte superior de la

³⁶ BERMUDEZ, J.M., FIDALGO, B. Op. cit., p 456.

garganta. Parte de su diseño incorpora el intercambio de calor interno mediante una doble pared: el gas de síntesis sale del reactor a través del espacio entre las paredes, su calor es transferido a la zona de biomasa en el proceso de secado. Esta característica se mejora en gasificadores con reactores de pequeños diámetros³⁷.

5.3.3.3 Selección de alternativas. En la tabla 12 evaluamos ambas alternativas con el fin de establecer cuál de las dos es más viable para implementarla en nuestro diseño y posterior fabricación.

Tabla 12. Criterios y alternativas de selección según estilo de garganta.

Criterio de evaluación	Valor QFD	% del QFD	Sin garganta	Garganta simple
Sistema de control	423	24.49	1	3
Mantenibilidad	369	21.37	3	9
Costo	345	19.98	9	3
Dimensiones	307	17.78	3	3
Tiempo de trabajo	283	16.39	1	3
	1727	100	17	21

Tabla 13. Selección de la mejor alternativa.

Criterio de evaluación	Valor QFD	% del QFD	Sin garganta	C1	Garganta simple	C2
Sistema de control	423	24.49	1	0.24	3	0.73
Mantenibilidad	369	21.37	3	0.64	9	1.92
Costo	313	18.12	9	1.63	3	0.54
Dimensiones	307	17.78	3	0.53	3	0.53
Tiempo de trabajo	283	16.39	1	0.16	3	0.49
	1695	100	17	3.21	21	4.23

En la tabla 13 se visualizan los resultados y se implementa entonces la garganta simple en el reactor.

³⁷ *Ibíd.* p. 457.

6. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BIOMASA

6.1 PREPARACIÓN DE LAS BIOMASAS

Se hizo una selección de las biomásas utilizadas en el laboratorio de combustión de la escuela, donde se eligió la cascarilla y paja de arroz debido a su alto poder calorífico respectivamente de 15,64³⁸ y 16,023 [MJ/kg], este último valor obtenido por Raúl Andrés Serrano, estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica, dato obtenido en pruebas realizadas dentro del marco de su proyecto de investigación. La cascarilla fue proporcionada por Molinos el Yopal Ltda. (5°19'38.1"N 72°24'26.1"W) y la paja fue facilitada por un agricultor en Tilodirán, vereda de la capital casanareña, ambos ubicados en la ciudad de Yopal, departamento del Casanare.

Se realizó un análisis próximo y último de la biomasa con la finalidad de saber la composición de ésta, en el momento de realizar el balance termodinámico y estequiométrico se utilizó los porcentajes en masa resultantes de las pruebas realizadas.

Para la realización de la prueba, se tomaron los dos tipos de biomasa: cascarilla y paja de arroz, previamente trituradas en un molino de cuchillas (Thomas, Wiley, USA), y tamizadas para obtener un tamaño de partícula de 0,250 mm (malla No. 60), con el fin de evitar efectos de transferencia de calor y masa dentro de la partícula. Para efectos de verificación se hicieron dos pruebas, una a 600 °C y la otra a 700 °C, para cada una de las biomásas seleccionadas; cada prueba consta de 6 crisoles, la mitad de ellos de cascarilla de arroz y los 3 sobrantes de paja de arroz.

³⁸ RAMÓN RAMÓN, Sergio Andrés; CARDENAS GUTIERREZ, Javier Alfonso y ROJAS SUAREZ, Jhan Piero. Poder calorífico de la cascarilla de arroz usada como combustible en hornos de secado. Mundo Fesc, vol. 15, no. 1, p. 72-76, 2018.

6.2 ANÁLISIS PRÓXIMO DE LA BIOMASA NORMA ASTM E1757-01

Para el análisis de las biomásas se empleó la Norma ASTM E1757-01³⁹. Esto con el fin de hallar el porcentaje en masa de humedad, char, volátil, carbono fijo, que finalmente se denomina el análisis próximo de la biomasa.

6.2.1 Composición del gas

6.2.1.1 Humedad. Para las pruebas de humedad se utilizó la norma ASTM E1756-08⁴⁰, en donde el procedimiento abarca llevar a una temperatura de 105 [°C] la biomasa en la mufla y someterlo a una hora, esto con el fin de desprender en vapor de agua el contenido de humedad que tiene la biomasa. Se busca un porcentaje de biomasa para una buena operación entre el 10 y 20 en [%wt].

Tabla 14. Resultados pruebas de Char.

	Humedad [%wt]
CASCARILLA	8.8802

El dato de humedad mostrado en la tabla 14 corresponde al resultado obtenido de forma experimental por el estudiante de maestría Raúl Andrés Serrano, que se encuentra en codirección de este proyecto.

³⁹ ASTM E1757-01. Práctica estándar para la preparación de biomasa para análisis compositivo. [en línea]. (aprobada 2015). [consultado: 15 de diciembre de 2019]. Disponible en internet: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1757

⁴⁰ ASTM E1756 – 08. Método de prueba estándar para la determinación de sólidos totales en biomasa. [en línea]. (aprobada 2015). [consultada: 15 de diciembre de 2019] disponible en internet: [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08(2015))

6.2.1.2 Char. Para las pruebas de char se utilizó la norma ASTM E872-82⁴¹, con el fin de obtener residuos de tipo carbonoso que resultan en los crisoles después de las pruebas a la temperatura especificada según la prueba.

- **Análisis de resultados prueba de char.**

Tabla 15. Resultados pruebas de Char.

CHAR		
	Crisol	Masa [g]
CASCARILLA	1	1.6106
	2	1.6260
	3	1.6269

El promedio final de la producción de Char en las pruebas es de 1,6211 [g]. Este subproducto de la pirólisis tiene un poder calorífico más alto que distintos tipos de Carbón.

6.2.1.3 Volátiles. El material volátil se da por la combustión del carbón, en la quema proporciona una pérdida de masa que se debe corregir por el contenido de humedad cuando se da un calentamiento de carbón sin contacto con el aire a condiciones estandarizadas⁴².

Para hallar el porcentaje en masa del material volátil, se utiliza la ecuación 9 que se brinda por la Norma ASTM E872-82⁴³, en donde $\% m volátil$,

⁴¹ ASTM E872-82. Método de prueba estándar para materia volátil en el análisis de combustible de madera particulada. [en línea]. (aprobada en 2013). [consultada: 15 de diciembre de 2019]. Disponible en internet: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82

⁴² Albert LA, López Moreno, S, Flores J. Diccionario de la contaminación. México DF: Centro de Ecología y Desarrollo; 1994. (Materia volátil. En: Diccionario de la contaminación). Disponible en: <https://www.osman.es/diccionario/definicion.php?id=13184>

⁴³ ASTM E872-82. Método de prueba estándar para materia volátil en el análisis de combustible de madera particulada. [en línea]. (aprobada en 2013). [consultada: 15 de diciembre de 2019]. Disponible en internet: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82

Mv_{crisol} , $Mv_{inicial}$, Mv_{final} , corresponden al material volátil en porcentaje, la masa del crisol con tapa, la masa inicial de la muestra, la masa final de la muestra.

$$\%m\ volatil = \left[\frac{Mv_{inicial} - Mv_{final}}{Mv_{inicial} - Mv_{crisol}} \right] \quad (9)$$

- **Análisis de resultados prueba de volátiles.**

Tabla 16. Resultados pruebas de Volátiles

VOLÁTILES			
	Crisol	Masa [g]	Porcentaje [%]
CASCARILLA	1	0.1296	54.0410
	2	0.1176	53.4644
	3	0.1218	53.4681

El promedio de producción de volátiles en las pruebas tiene un valor de 0,1230 [g], esta masa corresponde a la cantidad de gas volátil liberado durante la prueba y este es hallado con la diferencia del peso cuando se introduce en la mufla y cuando sale de ella. El contenido de este depende de la temperatura y el periodo que dura dentro del horno, por este motivo a mayor temperatura y tiempo, el contenido de volátil será más bajo. Cuando hay bastante contenido de material volátil, este enciende fácilmente, pero se ahoga debido a que la quema produce alta cantidad de humo, el poco contenido de volátil hace un encendido complicado pero una combustión bastante limpia, el porcentaje en masa promedio del material volátil tiene un valor de 53,6578%.

6.2.1.4 Cenizas. Las cenizas son materia inorgánica que resulta de la quema que se da en la materia orgánica. Son un residuo que se da por la combustión. Para esta

prueba se utilizó la Norma ASTM E1755-01⁴⁴. Esta prueba se realiza a una condición de temperatura de ignición a 575 ± 25 [°C].

La ecuación 10 aplicada para el cálculo del porcentaje en masa de ceniza, $M_{C_{total}}$, $M_{C_{crisol}}$, $M_{C_{inicial}}$, donde se representa la masa total del crisol con biomasa de la medida final, la masa del crisol, y la masa inicial de la biomasa con crisol.

$$\%m \text{ ceniza} = \left[\frac{M_{C_{total}} - M_{C_{crisol}}}{M_{C_{inicial}} - M_{C_{crisol}}} \right] \quad (10)$$

- **Análisis de resultados prueba de cenizas.**

Tabla 17. Resultados pruebas de ceniza

CENIZAS			
	Crisol	Masa [g]	Porcentaje
CASCARILLA	1	0.7843	19.6372
	2	0.9305	23.2276
	3	0.7854	19.6476

La ceniza tiene un promedio de 0.8334 [g]. La ceniza es un residuo después de una quema a la que se le suministra aire, un carbón vegetal con un buen contenido de ceniza tiene un valor aproximado del 3%, según datos obtenidos por el estudiante de maestría Raúl Andrés Serrano, en el marco de su proyecto de investigación, donde el valor es de 22,32% para la cascarilla de arroz, la sugerencia para disminuir el contenido de ceniza es realizar un tamizado a la biomasa. El valor [%wt] promedio dio de 20.837.

⁴⁴ ASTM E1757-01. Practica estándar para la preparación de biomasa para análisis compositivo. [en línea]. (aprobada 2015). [consultado: 15 de diciembre de 2019]. Disponible en internet: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1757

6.2.1.5 Carbón fijo. El producto resultante que no es volátil se distingue como carbono fijo es un producto que se quema en estado sólido, este se halla como una diferencia de los productos de cenizas y material volátil⁴⁵.

$$\% \text{ masa } Cf = 100 - (\%m \text{ ceniza} + \%m \text{ humedad} + \%m \text{ volátil}) \quad (11)$$

- **Análisis de resultados carbono fijo.**

Tabla 18. Resultados prueba de Carbón fijo

CARBÓN FIJO			
	Crisol	Masa [g]	Porcentaje [%]
CASCARILLA	1	0.6967	17.4415
	2	0.5779	14.4278
	3	0.7197	18.0047

El valor de carbono fijo obtenido tiene valores muy distintos para los tres crisoles, debido a que este resultado depende de la suma y diferencia del 100% de los otros contenidos, como lo son, cenizas, volátiles y char, con este se estima en el análisis ultimo la cantidad de coque que hay, el porcentaje en masa de carbono fijo tiene un valor de 16,6246%.

6.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS BIOMASAS

El análisis ultimo o elemental se encarga de brindar la composición que tiene la biomasa de carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno. El análisis que se utilizó fue por medio de las normas ASTM para las pruebas realizadas en la mufla con el fin de obtener la composición en porcentaje másico de carbono fijo, material volátil,

⁴⁵ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). PRÁCTICA DE ESTEQUIOMETRIA Y COMBUSTIBLES No. 13 – COMBUSTION: Determinación del porcentaje de carbono fijo en una muestra de carbón. [En línea]. 2016. p 1. [Consultado el 9 de enero de 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/326700882/CARBONO-FIJO#>

ceniza y humedad, la idea se basa en encontrar una correlación de los resultados hallados para poder obtener la composición de la biomasa, se utilizaron las relaciones suministradas por PARIKH Jigisha⁴⁶, donde se establecen unos rangos para poder utilizar las ecuaciones, los rangos establecidos se muestran a continuación:

Tabla 19. Rangos de composición ecuaciones de Parikh⁴⁷

Compuesto	Rango de composición
Material Volátil (VM)	$57,2\% \leq VM \leq 90,6\%$
Carbono fijo (FC)	$4,7\% \leq FC \leq 38,4\%$
Carbono (C)	$36,2\% \leq C \leq 53,1\%$
Hidrogeno (H)	$4,36\% \leq H \leq 8,3\%$
Oxigeno (O)	$31,37\% \leq O \leq 49,5\%$

Las correlaciones de PARIKH, se basan en utilizar las composiciones que se hallan en el análisis elemental y a partir de éste, regula unas relaciones para obtener la composición necesaria y poder hallar la ecuación química de las biomazas a trabajar, además de esto el poder calorífico por medio de otra correlación.

$$C = 0,637 * FC + 0,455 * VM \text{ [%wt]} \quad (12)$$

$$H = 0,052 * FC + 0,062 * VM \text{ [%wt]} \quad (13)$$

$$O = 0,304 * FC + 0,476 * VM \text{ [%wt]} \quad (14)$$

Finalmente, se obtiene la composición de la biomasa donde su contenido de azufre y nitrógeno se desprecia, porque los valores son bajos (>1%), se presenta por medio

⁴⁶ PARIKH, Jigisha; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. Fuel, 2007, vol. 86, no 12-13, p. 1710-1719. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.029

⁴⁷ Ibid., p. 1713.

de una tabla el contenido y la composición de las biomásas, en porcentaje peso [%wt], se realizó una comparación de los resultados obtenidos por las pruebas y la ejecución de las ecuaciones de PARIKH (Ver anexo A), con valores experimentales⁴⁸ obtenidos en la literatura, a su vez con los datos Braz & Crnkovic⁴⁹.

Tabla 20. Resultados pruebas cascarilla de arroz

CASCARILLA DE ARROZ	MÉTODO	COMPOSICIÓN [%wt]
C	PARIKH	35
	Braz & crnkovic	31,47
	YAO, Xiwen	45,93
H	PARIKH	4,191
	Braz & crnkovic	6,67
	YAO, Xiwen	5,61
O	PARIKH	30,59
	Braz & crnkovic	23,03
	YAO, Xiwen	31,29

- **Análisis de resultados.**

Por medio del análisis último obtenido según PARIKH, donde se procede a caracterizar la biomasa, por esto se realiza una observación a los resultados hallados con respecto a los presentes en la literatura.

⁴⁸ YAO, Xiwen., XU, Kaili., LIANG, Yu. Op. cit., p 10551.

⁴⁹ BRAZ, Carlos Eduardo; CRNKOVIC, Paula M: Physical – Chemical Characterization of Biomass Samples for Application in Pyrolysis Process. [En línea]. En: CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. 2014, Vol. 37, p. 523-528. ISBN 978-88-95608-28-0. [Consultado: 20 de enero de 2020]. Disponible en internet: <https://uao.libguides.com/c.php?g=529806&p=4412778>

BRAZ & CRNKOVIC se encargaron de hacer una caracterización fisicoquímica de distintas biomásas lignocelulósicas que se encuentran en Brasil, para hallar el análisis elemental se realizó por calorimetría y termogravimetría⁵⁰.

YAO, XU & LIANG, realizan una caracterización de la cascarilla y paja de arroz en base seca, donde hallan el material volátil, la composición de carbono fijo y ceniza, utilizan un analizador infrarrojo, y para hallar la humedad se hace con un analizador de humedad, ambos estudios realizados en la ciudad de China, la biomasa antes de ingresar a estos analizadores debe ser secada y a su vez molida, con el fin de obtener resultados más coherentes⁵¹.

La composición realizada en este trabajo da resultados que están dentro del rango de los estudios hallados en la literatura, distintas variables que pueden afectar estos resultados, como un distinto procedimiento de secado, un tamaño de partícula diferente, condiciones del ambiente, maquinaria con rangos de calidad superiores a la efectividad de los mecanismos con los que se cuentan.

⁵⁰ ABAUNZA GÓMEZ, Álvaro., GARCÍA GAMBOA, Kevin. Op. cit., p 47.

⁵¹ YAO, Xiwen., XU, Kaili., LIANG, Yu. Op. cit., p 10551.

7. MODELO TERMODINÁMICO

En el análisis del comportamiento de la quema de biomasa, se realiza un estudio y modelado termodinámico, con el fin de comparar los resultados obtenidos teóricamente y las muestras recogidas de las pruebas del banco montado:

7.1 SECCIÓN TEÓRICA

El modelo termodinámico se encarga de mostrar el comportamiento de descomposición y combustión de la biomasa, el objetivo es realizar el estudio termodinámico a través de las etapas que se dan en la gasificación, como lo son secado, pirólisis, combustión y reducción; el modelado que se dispone a realizar, no muestra parámetros del diseño, se escoge la selección de este tipo de modelo, debido a que el gasificador a diseñar es de lecho fijo y por lotes, donde se establece que el equipo toma autonomía y su tiempo de residencia es más largo que el tiempo de reacción⁵².

El siguiente análisis se hace a través de un modelo estequiométrico con el fin de trabajar las constantes de equilibrio utilizadas en la gasificación⁵³, el objetivo de hacer las suposiciones es para simplificar ciertos parámetros, para realizar un rango de estudio menor, con parámetros verdaderamente influyentes.

⁵² SÁNCHEZ PLAZAS, Oscar Daniel. Modelamiento termodinámico de la gasificación de bambú y cuesco de coco en un gasificador de lecho fijo a escala piloto. Tesis de Magister en Ingeniería Mecánica. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2018, p. 21.

⁵³ BASU, Prabir. Op. cit., Capítulo 7. p. 213.

Las suposiciones⁵⁴ que se tomaron para realizar el modelo termodinámico fueron recopiladas de diversos estudios realizados⁵⁵ para este tipo de análisis. A continuación, se presentan las consideraciones:

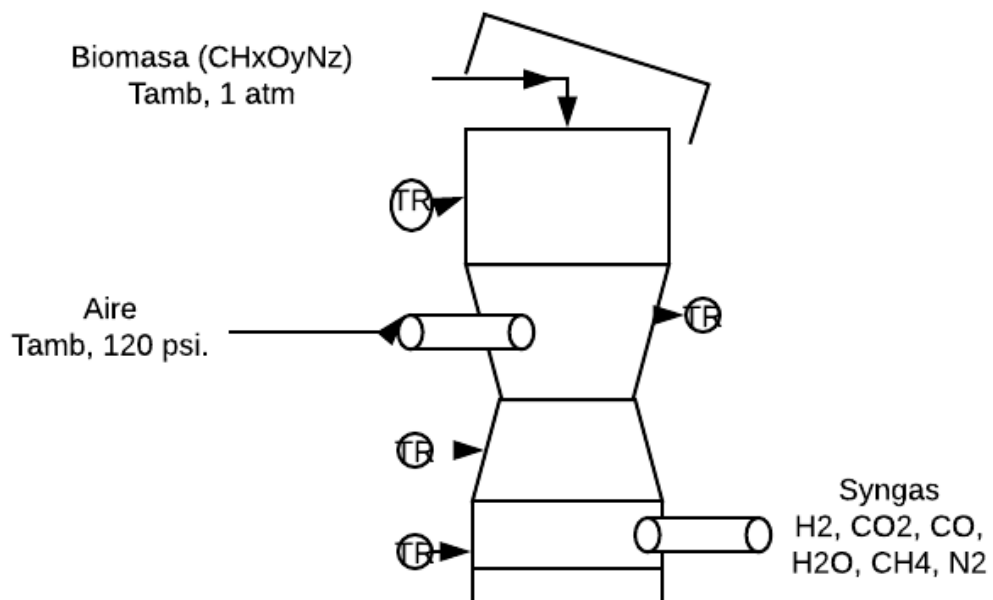
- El reactor se considera cero dimensional.
- El gasificador se considera perfectamente aislado, en el diseño este parámetro se tiene presente por medio de un aislante térmico.
- La mezcla de la biomasa es uniforme y homogénea.
- Las velocidades de reacción son lo suficientemente rápidas y las fases en el gasificador ocurren una tras otra repentinamente.
- El tiempo en el que reside la biomasa en el gasificador es el suficiente para alcanzar el estado de equilibrio, donde se consideran temperaturas y presión uniformes.
- No hay información de la secuencia de las reacciones químicas y de todas las reacciones intermedias que ocurren.
- El modelamiento de la biomasa se hace por medio de las moléculas que están presentes en mayor concentración.
- El comportamiento de todos los gases se asume como gases ideales, debido a la alta temperatura y la baja presión del sistema.

⁵⁴ SÁNCHEZ PLAZAS, Oscar Daniel. Op. cit., p. 22.

⁵⁵ PUIG-ARNAVAT, Maria; BRUNO, Joan Carles; CORONAS, Alberto. Review and analysis of biomass gasification models. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, vol. 14, no 9, p. 2841-2851.

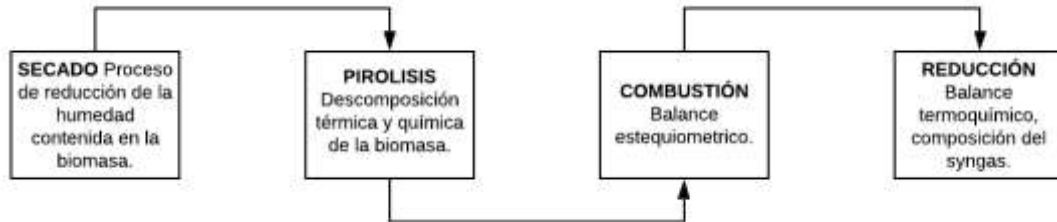
- En el balance no se tiene en cuenta la participación y producción de alquitrán como a su vez de char y ceniza.
- Debido al alcance de las pruebas realizadas se desprecia los porcentajes de masa de nitrógeno y azufre.

Figura 9. Simplificación para el modelado termodinámico



7.2 REACCIONES Y BALANCES PARA EL ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Figura 10. Proceso de gasificación.

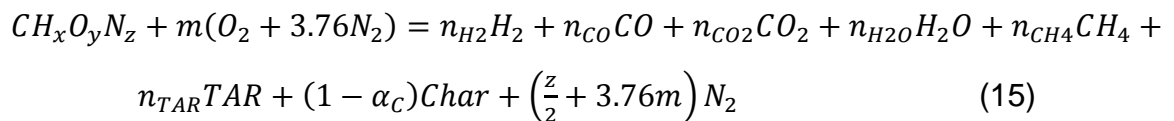


Para el análisis termodinámico, se montó una ecuación general para saber cuáles son las incógnitas presentes, cuando en el proceso de la gasificación ingresa la biomasa pasa por su primera etapa: secado, tal como se muestra en la figura 10 – primer recuadro, en esta se define que la biomasa pierde humedad, pero sus propiedades químicas siguen intactas, por ello las pruebas realizadas anteriormente para obtener la composición de la biomasa se hicieron en el momento que pasa por la segunda etapa conocida como pirólisis (figura 10 – segundo recuadro), donde se simplifican compuestos químicos participes, y con ésta composición se realizó todos los balances anteriormente nombrados.

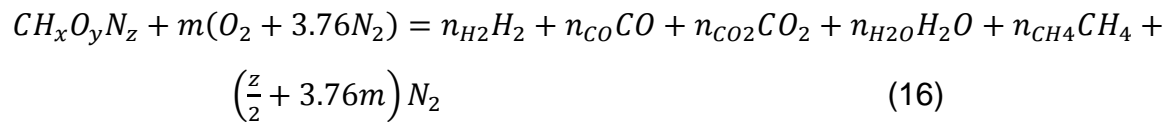
Composición de la cascarilla de Arroz: $CH_{1.427}O_{0.656}$ (Ver anexo B)

Cantidad de moles de la cascarilla de arroz: 41.76 (Ver anexo C)

7.2.1 Balance termodinámico de combustión



Según el balance estequiométrico anterior⁵⁶, se establece que la composición de la biomasa es conocida por las pruebas realizadas, y las incógnitas son las composiciones resultantes, como a su vez la relación aire/biomasa para llevar a cabo esto. Se hace énfasis en la ecuación anterior para el balance estequiométrico no se tiene en cuenta la producción de alquitrán y char, la ecuación estequiométrica se muestra a continuación:



Para determinar las cantidades de producción de compuestos gaseosos, se procede a montar un sistema de ecuaciones, correlaciones y relaciones con el fin de poder solucionar el modelado, las incógnitas que se tienen son: n_{H_2} , n_{CO} , n_{CO_2} , n_{H_2O} , n_{CH_4} , m ; el nitrógeno no se evalúa como incógnita debido a que depende de la relación aire/biomasa y del contenido de este que hay en la biomasa, implícitamente ya está contenido en el sistema.

Balance de carbono:

$$n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4} - 1 = 0 \quad (17)$$

Balance de hidrógeno:

$$2 * n_{H_2} + 2 * n_{H_2O} + 4 * n_{CH_4} - X = 0 \quad (18)$$

Balance de oxígeno:

⁵⁶ YAN, Wei-Cheng, et al. Model-based downdraft biomass gasifier operation and design for synthetic gas production. [En línea]. Journal of cleaner production, 2018, vol. 178, p. 476-493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.009>

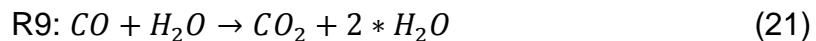
$$n_{CO} + 2 * n_{CO_2} + n_{H_2O} - 2m - y = 0 \quad (19)$$

Para la gasificación (figura 10 – cuarto recuadro) se encuentran las reacciones típicas que permiten obtener las constantes de equilibrio que se adquieren con la energía libre de Gibbs, en el caso de obtener estas constantes a partir de la teoría. Sin embargo, sus valores son muy distintos a los prácticos y el fin de esto es aproximar este modelado por medio de pruebas y correlaciones.

Las reacciones seleccionadas de manera independiente que se dan para el proceso de gasificación en la zona de reducción, debido a que sus reactivos y productos están contenidos en la ecuación general de la combustión (16):

Según BASU⁵⁷, existen 14 tipos de reacciones independientes que se dan de manera espontánea y rápida, dependiendo del agente gasificante y el tipo de biomasa, para producir ciertos compuestos indispensables en el contenido final del syngas.

Para el sistema montado se trabaja con la reacción de cambio R9(*) y la reacción de hidrogasificación R3(**), a su vez se hallan las constantes de equilibrio de cada una de estas:



Para R9 su respectiva constante de equilibrio es⁵⁸:

⁵⁷ BASU, Prabir. Op. cit., Capítulo 7. p. 213.

(*) Referencia numérica de la reacción tomada de BASU.

(**) Referencia numérica de la reacción tomada de BASU.

⁵⁸ YAN, Wei-Cheng, et al. Op. cit., p 478.

$$k9 = e^{\frac{4276}{T} - 3.691} \quad (22)$$

$$k9 = \frac{n_{CO_2} * n_{H_2}}{n_{CO} * n_{H_2O}} \quad (23)$$

Para R3 su respectiva constante de equilibrio es⁵⁹:

$$K3 = \frac{n_{CH_4}}{(n_{H_2})^2} \quad (24)$$

$$\ln(K3) = \frac{7082,842}{T} - 6,567 * \ln(T) + \frac{7,467 * 10^{-3} * (T)}{2} - \frac{2,167 * 10^{-6}}{6} * T^2 + \frac{0,702 * 10^5}{2 * T^2} + 32,541 \quad (25)$$

Para las correlaciones implementadas y la solución de las constantes de equilibrio, la temperatura con la que la máquina cumple la combustión es de 1073 [°C] (Ver anexo D). Finalmente, para completar el balance de los productos de la gasificación, el balance energético, se encarga de completar el sistema de ecuaciones realizado.

$$\begin{aligned} H_{f,biomasa} + m * H_{f_{O_2}} + 3.76 * m * H_{f_{N_2}} = n_{CO_2} * (H_{f_{CO_2}} + Cp_{CO_2}) + n_{CO} * \\ (H_{f_{CO}} + Cp_{CO}) + n_{H_2O} * (H_{f_{H_2O}} + Cp_{H_2O}) + n_{CH_4} * (H_{f_{CH_4}} + Cp_{CH_4}) + n_{H_2} * \\ (H_{f_{H_2}} + Cp_{H_2}) + (3.76 * m + \frac{z}{2}) * (H_{f_{N_2}} + Cp_{N_2}) \end{aligned} \quad (26)$$

La temperatura de referencia para las entalpias de formación es la temperatura de 25,25 [°C], las entalpias de formación para los gases producto se hallan a la temperatura con la que el syngas sale del gasificador que es aproximadamente de 300 [°C] todas las entalpias de formación se hallan por medio de NIST-JANAF⁶⁰.

⁵⁹ ZAINAL, Z. A., et al. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. Energy conversion and management, 2001, vol. 42, no 12, p. 1499-1515.

⁶⁰ NIST-JANAF; Thermochemical Tables. [En línea]. Disponible en: <https://janaf.nist.gov/>

Como la entalpía de formación de la biomasa en el balance energético, no permite ser hallada de la misma forma que se establece para los otros compuestos, se procede a buscar correlaciones que sirvan para poder encontrar la entalpía de formación⁶¹:

$$\Delta H_c = 4,092 * n_C + 1,322 * n_H - 1,916 * n_{(N+O)} \text{ [kJ/mol]} \quad (27)$$

$$\Delta H_{f,biomasa} = \Delta H_c - n_C[\Delta H_c(C)] - n_H \left[\frac{\Delta H_c(H_2)}{2} \right] \text{ [kJ/mol]} \quad (28)$$

En donde los n_x de las ecuaciones (27) y (28), son los valores molares de la composición de la biomasa, estas correlaciones son para resultados obtenidos libres de cenizas, para la ecuación (28), las variables $\Delta H_c(C)$ y $\Delta H_c(H_2)$ son los calores de combustión del carbón e hidrógeno⁶², respectivamente.

En la tabla 21 se muestra el balance de la ecuación con los resultados obtenidos a través del software EES, donde el sistema muestra la composición de cada gas producto de la gasificación. (Ver anexo E).

Tabla 21. Resultados del modelado termodinámico

RESULTADOS OBTENIDOS MODELADO TERMODINÁMICO	
Composición de la biomasa	41.76 * CH _{1.427} O _{0.656} (Ver anexo D)
m	14.83 [moles]
n_{CO₂}	14.10 [moles]
n_{CO}	21.84 [moles]
n_{H₂}	11.14 [moles]
n_{H₂O}	7.02 [moles]
n_{CH₄}	5.818 [moles]

⁶¹ B. REED, Thomas. A formula for the empirical estimation of the heats of combustion of carbonaceous materials. Solar Energy Research institute. Appendix A. p 323.

⁶² Lower heating value for some organic compounds (at 25 °C [77 °F]). En: Heat of combustion. [En línea]. [Consultado el 19 de enero de 2020]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_combustion

A continuación, se muestra la composición molar de cada compuesto del syngas, con el fin de someterlo a análisis con los resultados obtenidos por Raúl Andrés Serrano, estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica, datos obtenidos en pruebas realizadas dentro del marco de su proyecto de investigación.

RESULTADOS OBTENIDOS MODELADO TERMODINÁMICO		
Productos	Análisis	Resultado
n_{CO_2}	Termodinámica de la tesis	23.53%
	Resultados Proyecto de maestría	15,04%
n_{CO}	Termodinámica de la tesis	36.45%
	Resultados Proyecto de maestría	10.33%
n_{H_2}	Termodinámica de la tesis	18.59%
	Resultados Proyecto de maestría	9.49%
n_{CH_4}	Termodinámica de la tesis	9.71%
	Resultados Proyecto de maestría	1.60%

El estudio realizado por el estudiante de maestría es experimental, se realizó por medio de un cromatógrafo de gases, el equipo fue previamente calibrado con curvas de patrón, en unas condiciones controladoras, en atmosfera de dióxido de carbono por estos motivos, los porcentajes en algunas composiciones dan similares y en otras dan rangos muy distintos, la diferencia radica en que uno de ellos es un modelado cero dimensional, y el otro tiene parámetros reales para su estudio. Se obtiene con el análisis último el poder calorífico superior de la biomasa, se obtiene a partir de las correlaciones⁶³ donde nos da un valor de 13.55 [kJ/g].

⁶³ B. REED, Thomas. Op. cit., Appendix A. p 323.

8. DISEÑO DEL GASIFICADOR

Se optó por el diseño de un gasificador de lecho fijo, con tamaño de partícula de 2 mm (sometida a proceso de trituración), tipo Down draft, con procesamiento de 1 [kg/hora], por medio de un análisis teórico y experimental, para el uso como banco de laboratorio.

8.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El equipo se encarga de llevar a cabo el proceso de gasificación, existen varios tipos de biomasa, en donde se realiza una quema internamente de la materia prima produciendo un gas combustible (syngas), para que cumpla su funcionamiento básico, su diseño es sencillo, con hermeticidad hacia el exterior, con una sola salida para la producción de gas e igualmente para el ingreso de aire por medio de un compresor HANSHIN, Corea, GH-1 para obtener una buena combustión, finalmente cuenta con un sistema de medición de termocuplas y un termómetro con la lectura de las temperaturas de cada zona del gasificador.

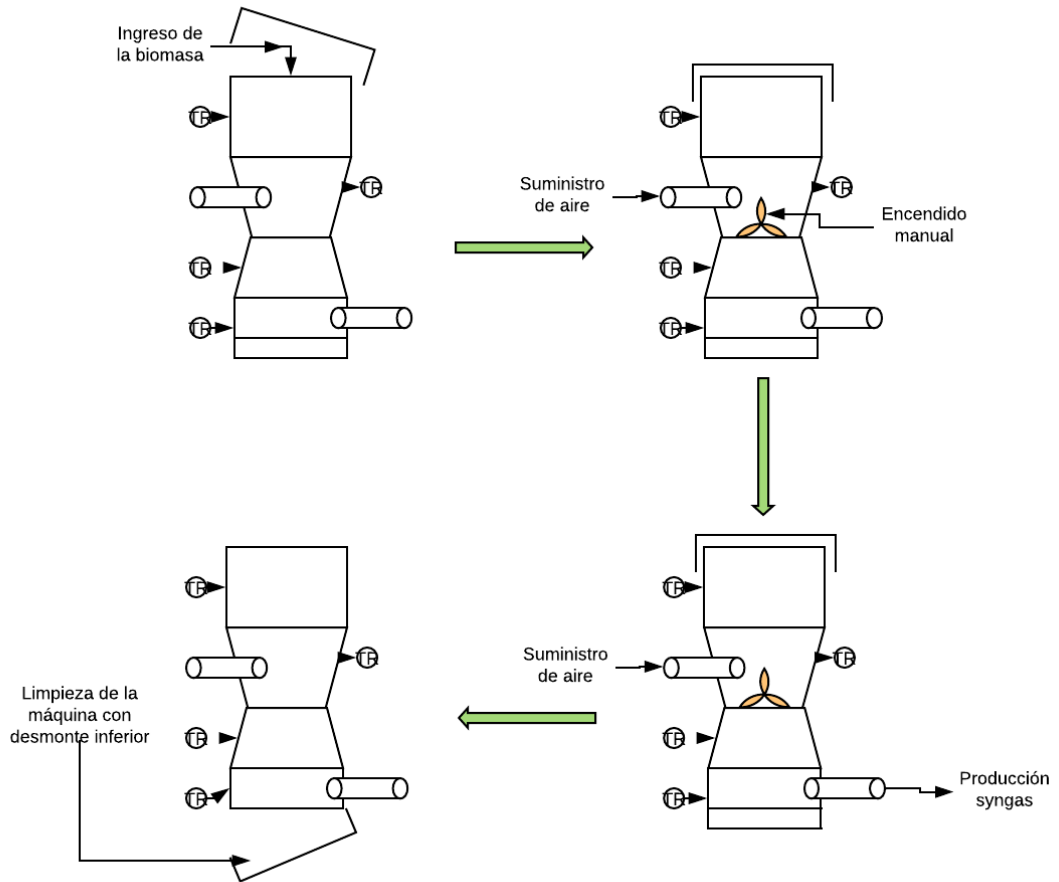
8.2 RÉGIMEN DE OPERACIÓN

El gasificador funciona de manera autónoma y continúa en cada prueba. Se muestran las etapas (Figura 13) y las consideraciones son las siguientes:

- El gasificador después de determinado tiempo trabaja de manera autónoma.
- Solo hasta el enfriamiento completo del gasificador se procede a eliminar los residuos (cenizas).

- Se estima un tiempo de trabajo de este de 60 [min] por cada prueba, teniendo en cuenta el ingreso de la biomasa, y se adiciona un tiempo aproximado de 90 [min] para enfriamiento.

Figura 11. Etapas de operación del gasificador



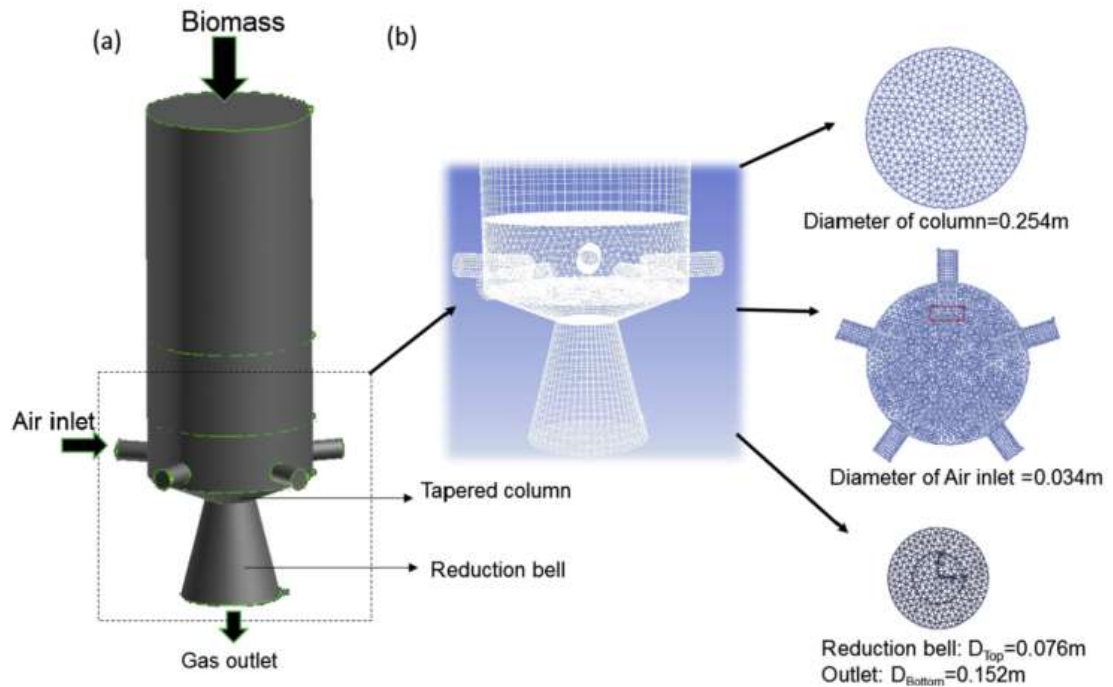
8.3 DISEÑO EN DETALLE DEL GASIFICADOR

Para el diseño del gasificador se utilizó el ejecutado en WEI CHANG⁶⁴, debido a que este equipo mostró funcionamiento en dos condiciones, el equipo esta creado

⁶⁴ YAN, Wei-Cheng, et al. Op. cit., p 147.

físicamente un gasificador de 10 [MJ] que se encuentra en la industria y también fue sometido a simulación CFD.

Figura 12. Simulación del reactor para gasificación.⁶⁵



Los sistemas presentes en la máquina son:

- Bastidor.
- Reactor.
- Sistema de medición.
- Sistema de escape.

⁶⁵ Ibid, p. 148.

- Sistema de control: El sistema de control se sugiere para los subsistemas tales como:
 - Sistema de alimentación continua: Si el equipo cuenta con este sistema se debe montar un sistema de control para la alimentación de la máquina.
 - Sistema de control de aire: El equipo debe operar en mejores condiciones si se le añade un sistema de control para el ingreso de aire.

La alimentación del equipo debido a que es un banco de laboratorio no requiere de un sistema de alimentación continua, por esto se hace una inserción por lotes en cada prueba, se procede a llenar el gasificador con la biomasa y hacer el cierre de manera que genere hermeticidad en ésta con elementos de prensado con gancho.

Figura 13. Elemento para sello del reactor



El equipo se encarga de trabajar con la presión del compresor, es alrededor de los 120 [psi], en un ambiente como el de la ciudad de Bucaramanga, y la máquina al tener un ducto abierto al ambiente trabaja con una presión inferior a la del compresor HANSHIN, Corea, GH-1, similar a la presión atmosférica de este lugar, debido a que este parámetro al no ser un valor elevado no representa riesgos, se desprecia el diseño de los empaques, sin embargo es necesario implementarlos porque se desea evitar fugas y obtener hermeticidad en la máquina.

8.4 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR

En las medidas del gasificador se tomaron por medio del HANDBOOK⁶⁶, donde se da el uso del gasificador Down draft tipo Imbert, éste tipo de gasificador tuvo uso en la segunda guerra mundial, y con el paso del tiempo se ha querido mejorar su diseño y eficiencia por medio de modificaciones, el diseño mostrado anteriormente se complementa con el Imbert, debido a que ambos manejan un “hogar”, el hogar es una zona en forma de “V”, las propiedades de este tipo de hogar son variadas y la mayoría de estas es ayudar al funcionamiento del gasificador, reduciendo el flujo de la biomasa y generando compactación en ella para que mejore la combustión.

Figura 14. Dimensionamiento del reactor

d_i/d_h	d_h mm	d_f mm	d_r mm	h mm	H mm	R mm	A No.	d_m mm	$A_m \times 100$ A_h	d_r d_h	h d_h	Range of Gas Output		Maximum Wood Consumption kg/h	Air Blast Velocity Vm m/s
												max. Nm ³ /h	min. Nm ³ /h		
268/60	60	268	150	80	256	100	5	7.5	7.8	4.5	1.33	30	4	14	22.4
268/80	80	268	176	95	256	100	5	9.0	6.4	3.3	1.19	44	5	21	23.0
268/100	100	268	202	100	256	100	5	10.5	5.5	2.7	1.00	63	8	30	24.2
268/120	120	268	216	110	256	100	5	12.0	5.0	2.2	0.92	80	12	42	26.0
300/100	100	300	208	100	275	115	5	10.5	5.5	3.0	1.00	77	10	36	29.4
300/115	115	300	228	105	275	115	5	11.5	5.0	2.6	0.92	95	12	45	30.3
300/130	130	300	248	110	275	115	5	12.5	4.6	2.3	0.85	115	15	55	31.5
300/150	150	300	258	120	275	115	5	14.0	4.4	2.0	0.80	140	18	67	30.0
400/130	130	400	258	110	370	155	7	10.5	4.6	3.1	0.85	120	17	57	32.6
400/150	135	400	258	120	370	155	7	12.0	4.5	2.7	0.80	150	21	71	32.6
400/175	175	400	308	130	370	155	7	13.5	4.2	2.3	0.74	190	26	90	31.4
400/200	200	400	318	145	370	153	7	16.0	3.9	2.0	0.73	230	33	110	31.2

Variables not given in figure are defined as follows:

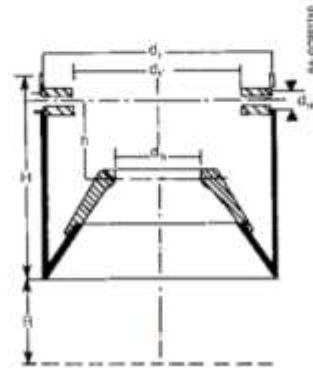
d_m = inner diameter of the tuyere.

A_m = sum of cross sectional areas of the air jet openings in the tuyeres.

A_h = cross sectional area of the throat.

A = number of tuyeres.

Source: Kaupp 1984a, Table 5; Fig. 75.



Fuente: Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems, march 1988, department of energy solar, technical information program, USA.

⁶⁶ Ibid, p. 148.

Las dimensiones seleccionadas, se aproximaron a valores encontrados para suministros industriales estandarizados.

Figura 15. Dimensionamiento del gasificador downdraft

d_r/d_h	d_h [mm]	d_r [mm]	h [mm]	H [mm]	R [mm]	$A N^\circ$	d_m [mm]	$A_m \cdot 100/A_h$	d_r/d_h	h/d_h
268/60	60	268	80	256	100	5	7.5	7.8	4.5	1.33
268/80	80	268	95	256	100	5	9	6.4	3.3	1.19
268/76.2	76.2	268	92.15	256	100	5	8.715	6.666	3.528	1.2166
Medidas estandarizadas	3"	10"	3.5"	12"	4"	5	0.5"			

En donde;

d_h Diámetro de la garganta.

d_r Diámetro del cilindro superior.

h Altura de ingreso del aire, respecto a la garganta.

H Altura total del gasificador.

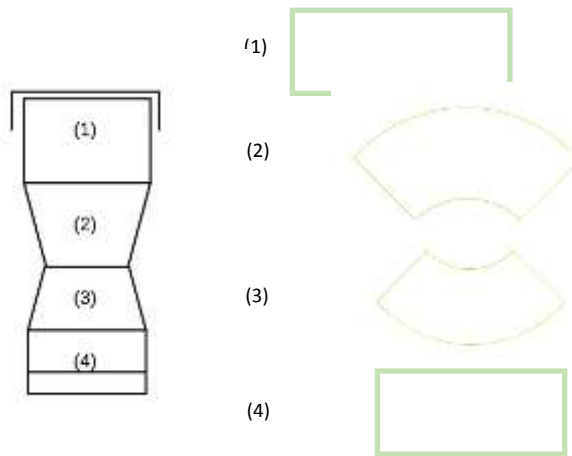
$A N^\circ$ Número de agujeros para el ingreso de aire.

d_m Diámetro de la tubería para el ingreso de aire.

(Ver anexo P)

El dimensionamiento del reactor se hizo con el fin de tener una capacidad de 1 kg de biomasa, se procede a verificar que estas medidas selectas si tengan la capacidad requerida, contiguo a esto se seleccionan los componentes de la máquina.

Para verificar la capacidad se halla el volumen de cada sección del reactor, después se obtiene todo el volumen de éste y así se halla la masa que se puede insertar en la máquina para operar. Los desarrollos que se muestran a continuación están con sus respectivas medidas.



$$V(1) = \pi * r^2 * h$$

$$V(1) = \pi * (5)^2 * 5.50$$

$$V(1) = 431.969 [in]$$

$$V(2) = \frac{\pi * h}{3} * (R^2 + R * r + r^2)$$

$$V(2) = \frac{\pi * 4}{3} * (5^2 + 5 * 1.5 + 1.5^2)$$

$$V(2) = 145.560 [in]$$

$$V(3) = \frac{\pi * 2.5}{3} * (4^2 + 4 * 1.5 + 1.5^2)$$

$$V(3) = 63.486 [in]$$

$$V(4) = \pi * (4)^2 * 4$$

$$V(4) = 201,062 [in]$$

$$V_{TOTAL} = V(1) + V(2) + V(3) + V(4)$$

$$V_{TOTAL} = 842,077 [in^3]; 13799,169 [cm^3]$$

El fin de obtener el volumen del equipo, se hace para saber la cantidad másica que se va a ingresar en la máquina, las medidas del reactor se aumentaron respectivamente, con el fin de que fuesen valores comercialmente conocido.

La densidad a granel de la biomasa que se estudió (cascarilla de arroz), según los estudios realizados⁶⁷ tiene el valor de $\rho = 0,102 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$, la capacidad de la máquina es de $m = 1407 [g]; 1,407[kg]$.

Según los objetivos propuestos la máquina cumple con las especificaciones teniendo una capacidad superior, como un factor para poder trabajar con otras biomásas.

⁶⁷ ECHEVERRIA CRUZ, Manuel Antonio; LOPEZ MENA, Orlando Antonio; Proyecto para obtener título de ingeniero mecánico, Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica. Quito, mayo 2010.

8.4.1 Selección del material para el reactor y recubrimiento. El reactor cumple con ciertos parámetros importantes para realizar su diseño a continuación se presentan:

- El reactor debe estar diseñado para aguantar una temperatura superior a 1200 °C.
- El material del reactor debe prestarse para poder conformar, moldear, soldar y mecanizar, debido al tipo de diseño que se quiere realizar.
- La presión de trabajo del reactor no es superior a 120 [psi].

Con las siguientes especificaciones se procede a seleccionar un material que cumpla con estos parámetros anteriormente establecidos, en cuestiones del diseño, el gasificador muestra diferentes zonas de trabajo a distintas temperaturas, para disminuir costos, se decide utilizar un tipo de material para los cilindros dado que la temperatura máxima de trabajo de estos es de 800 [°C] y para los conos se escoge un material donde su punto de fusión sea superior a 1200 [°C], los materiales seleccionados debido a que cumplen con los parámetros son aceros inoxidables 310 S y 304, respectivamente.

El acero 310 S tiene una resistencia a la tensión a 1400 [°C] de 37,7 [ksi], el acero 304 tiene un valor a 1200 [°C] de 48 [ksi], entre otras propiedades físico-mecánicas. (Ver anexo F y G)

Para hallar el espesor se utilizó la norma ASME UG 27, que se utiliza para tanques que funcionan a presión interna, donde se tiene presente la temperatura de trabajo con la que este trabaja.

La ecuación 29 se utiliza para hallar el espesor de la lámina, por la norma ASME para recipientes cilíndricos con presión interior de espesor delgado que trabajan a cierta temperatura.

$$t_{cil} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} \quad (29)$$

En donde;

P = Presión de diseño.

R = Radio interno del cilindro.

S = Esfuerzo último a tensión del material a la temperatura de operación.

E = Eficiencia de las soldaduras

La presión de diseño en este caso es la presión con la que trabaja el gasificador, el esfuerzo último del acero inoxidable AISI 310 a una temperatura de trabajo superior a los 1000 [°C], es de 48 [Mpa] o 7,0 [ksi]⁶⁸.

La eficiencia de la soldadura se halló por medio de datos obtenidos en la literatura, por medio de experimentos calorimétricos rusos, se informan valores de la eficiencia de la soldadura entre un rango 50%- 70%⁶⁹, para obtener el espesor de cada lamina se opta por tomar el valor intermedio es decir del 60%.

⁶⁸ Sandmeyer Steel. Aleación 310/310S En: Placa de Acero Inoxidable. [Consultado el 5 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.sandmeyersteel.com/spanish/310-310S.html#PropiedadesF%C3%ADsicas>

⁶⁹ STENBACKA, Nils. On arc efficiency in gas tungsten arc welding. Soldagem & Inspeção, 2013, vol. 18, no 4, p. 380-390. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242013000400010>

Se procede hallar el espesor del cono y de los cilindros, también se utilizó en los conos un diámetro promedio con el cono crítico que en este caso es el que tiene que soportar temperatura a un alto nivel.

$$t_{cono} = \frac{120[psi] * 3,25[in]}{37700[psi] * 0,6 - 0,6 * 120[psi]} = 0,01729 [in] = 0.4393 [mm]$$

$$t_{cilindro} = \frac{120[psi] * 4,0[in]}{48000[psi] * 0,6 - 0,6 * 120[psi]} = 0,0167 [in] = 0.4244[mm]$$

Después de obtener el espesor mínimo que debe tener el cono y el cilindro, se obtiene un margen por corrosión, con el fin de saber el valor final de este, el valor de este margen es de 3,175 [mm]⁷⁰:

$$t_{cono} = (0,4393 + 3,175) = 3,6143 [mm]$$

$$t_{cilindro} = (0.4244 + 3,175) = 3,5994 [mm]$$

Con los espesores hallados, se toma la decisión de estandarizar estos valores para encontrar láminas que cumplan con los resultados obtenidos. Se selecciona un calibre 8 en cada uno de los materiales seleccionados, con un espesor de 4,37 [mm]. (Ver anexo H)

⁷⁰ MEGYESY, Eugene. Manual de recipientes a presión, diseño y calculo. México: Grupo noriega editores, 1992. p. 19.

9. TRANSFERENCIA DE CALOR DEL GASIFICADOR

Para el cálculo de la transferencia de calor del reactor se realizó un análisis de las zonas presentes en el gasificador:

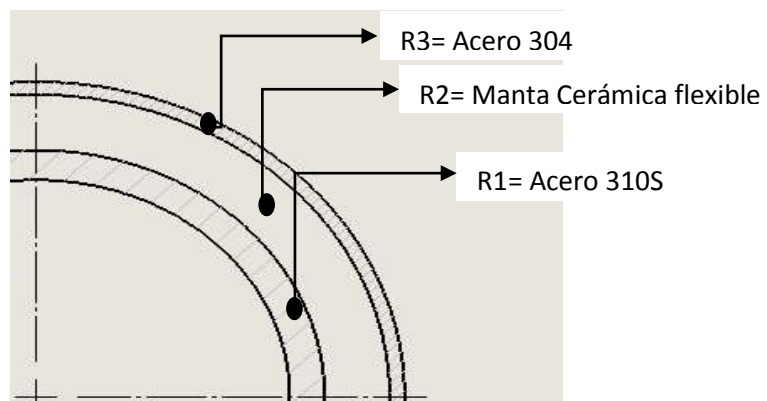
Tabla 22. Rangos de temperatura en el gasificador

Zona	Temperatura [°C]
Zona de Secado	190-210
Zona de Pirólisis	600
Zona de combustión	1000-1200
Zona de reducción	700-850

Fuente: CASTELLO BELMAR, Angelo Michele; Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa, optar título de ingeniero civil químico, universidad de chile, departamento de ingeniería química y biotecnología, facultad de ciencias físicas y matemáticas, Santiago de chile, 2014

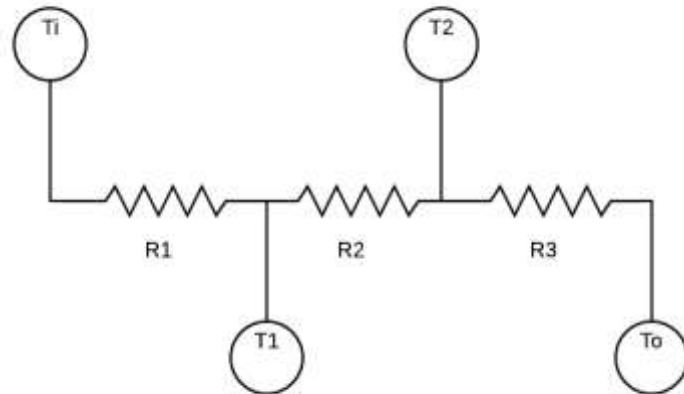
Como se observa la zona crítica para la transferencia de calor del gasificador es la presente en la zona de combustión debido a su alta temperatura, se harán los respectivos cálculos con el fin de hallar el espesor del aislante térmico, a nivel industrial se seleccionó una manta cerámica flexible pues cumple con los parámetros más importantes, como la capacidad de soportar alta temperatura y fácil instalación.

Figura 16. Plano de corte del reactor con su respectivo aislante y recubrimiento



Se procede hacer un análisis por transferencia de calor, en el cual se desprecia el espesor de las láminas de acero 310S y 304, debido a que sus valores de espesor son menores a 5 mm.

Figura 17. Diagrama de transferencia de calor



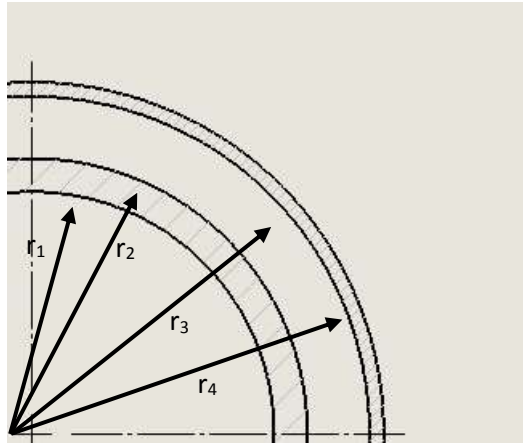
Para la solución del diagrama de resistencias es necesario conocer datos técnicos de los materiales también se establecen las temperaturas T_i y T_o ; con la TABLA 18, el valor de T_i corresponde a 1000-1200 [°C], y para la manipulación del reactor sin que pierda demasiado calor con el ambiente por recomendación se decide utilizar con T_o correspondiente de 40 [°C] establecido por el ministerio de trabajo junto al ministerio de minas y energía⁷¹, la temperatura ambiente T_∞ en la ciudad de Bucaramanga es de 27 [°C].

La transferencia de calor se procede a trabajar con la conductividad térmica de la manta cerámica flexible, su valor de conductividad es 0,44969 [w/m-K]. (Ver anexo I).

⁷¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRABAJO, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. Resolución (2018). Por la cual se expide el reglamento técnico de calderas [en línea]. Santa Fe de Bogotá D.C.: El Ministerio. 2018. p. 74 [Consultado: 01 de marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59676/PROYECTO+DE+RESOLUCION+POR+LA+CUAL+SE+EXPIDE+EL+REGLAMENTO+TECNICO+DE+CALDERAS.pdf/1a7449ce-9575-7c61-2173-499a99f3ad4a>

Las láminas de acero inoxidable 310S y la 304, manejan conductividad térmica a 500 [°C] es de 18,7 [W/m*K], y 21,4 [W/m*K], respectivamente.

Figura 18. Dimensiones de los radios



En donde se muestran los radios comprendidos entre los aceros y la manta cerámica, los valores correspondientes en cada uno son: $r_1=3,81$ [cm]; $r_2=4,26$ [cm]. Entre r_3 y r_4 la lámina de acero 304 es de calibre 18, es decir de 1,27 [mm].

Debido a que el equipo opera en condiciones ambiente se respalda de los cálculos de convección natural a continuación se muestran las ecuaciones suministradas para la solución del sistema:

$$Gr = g * \beta * (T_o - T_{amb}) * \frac{Lc^3}{g^2}$$

En donde:

g = gravedad [m/s²].

β = Coeficiente de expansión volumétrica [1/K].

T_o = Temperatura de película [°C].

Tamb= Temperatura ambiente [°C].

Lc= Longitud característica de la configuración geométrica [m].

ϑ = Viscosidad cinemática del fluido [m²/s].

Para la superficie exterior de un cilindro vertical, se puede tomar un criterio que si cumple, se pueden tratar los cálculos como si fueran de una placa vertical⁷².

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}}$$

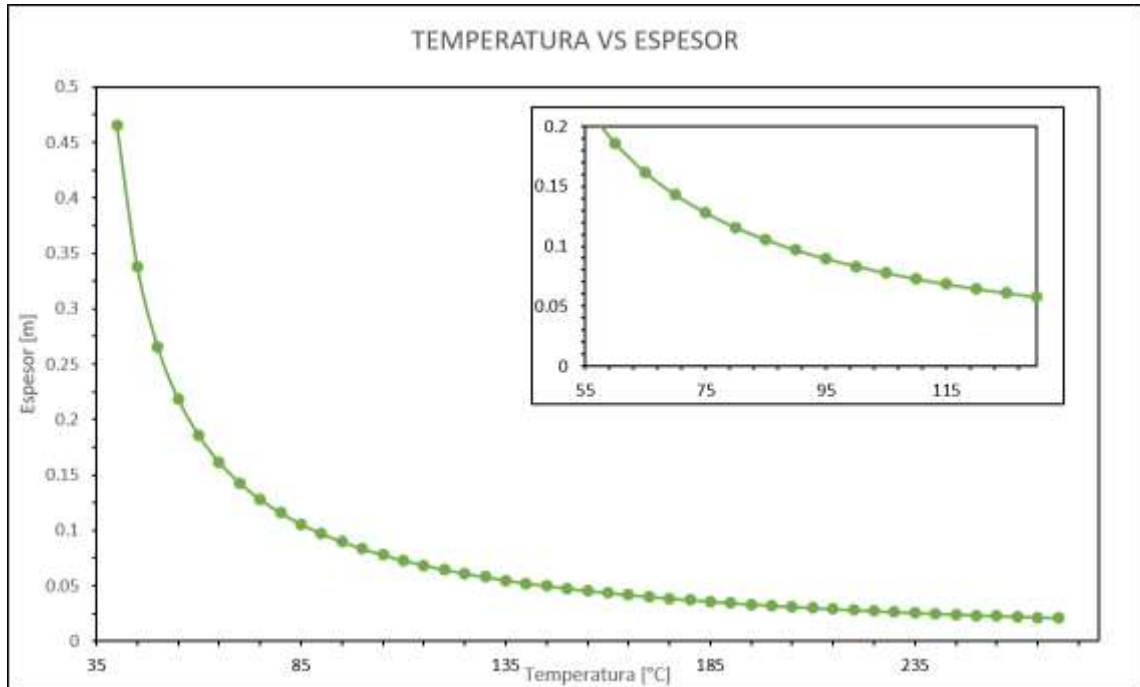
Se necesita el coeficiente de convección del ambiente para ello se utiliza la correlación de Nusselt;

$$Nusselt = h_{ext} * \frac{Lc}{k_{aire}}$$

Se muestra el sistema de ecuaciones de la transferencia de calor por resistencias donde da como resultado un espesor de aislante con un valor elevado (Ver anexo J), por ello se decide parametrizar la temperatura de película con el fin de escoger un espesor que sea posible encontrar en el mercado. (Ver anexo K).

⁷² CENGEL, Yunus. GHAJAR, Afshin. Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. 4ta Ed., Mc. Graw Hill. 2011. p. 945. ISBN: 9781456202545.

Figura 19. Temperatura vs Espesor del aislante térmico.



Si se ve el comportamiento de la figura 19, se observa que después de un valor superior a 45, el espesor varía desde 20 [cm] a 5 [cm], en la industria este tipo de manta cerámica se encuentra con un espesor de 5,08 [cm], para un valor de temperatura en este rango de espesor de 0,05016 [m] se obtiene que la temperatura de película es de 120 [°C]. (Ver anexo K)

10. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE GASIFICACIÓN

En el desarrollo de este capítulo se muestra la documentación fotográfica del proceso de construcción y ensamblaje del banco de gasificación. Este proceso se llevó a cabo en talleres ubicados en inmediaciones del sector industrial de Bucaramanga. La fabricación y ensamblaje se realizó en la empresa CORPLIEGUES (Cra. 11 # 22 – 42) y las pruebas de la máquina fueron realizadas en IMR (Cra. 15 # 24 – 24).

A continuación, se presenta la evidencia fotográfica de forma secuencial del paso a paso en la construcción de esta máquina.

Figura 20. Desarrollos de acero de los conos del reactor.



Figura 21. Ensamblaje y soldadura del cuerpo del reactor



Figura 22. Termocupla con el dispositivo lector de temperaturas



Figura 23. Instalación del aislante y revestimiento con lámina en el reactor.



Figura 24. Instalación de las termocuplas al reactor.



Figura 25. Gancho de ajuste a presión para la tapa.



Figura 26. Instalación completa del revestimiento en lámina.



Figura 27. Fotografía isométrica del bastidor.



Figura 28. Instalación de los ganchos en el cuerpo del reactor.



Figura 29. Reactor terminado.



Figura 30. Fotografía frontal del bastidor.



Figura 31. Ensamblaje final del reactor con el bastidor.



11. PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS EN EL BANCO DE GASIFICACIÓN

Como cualquier otra máquina, el gasificador sigue un proceso para el buen desarrollo de pruebas, el cual será presentado a continuación.

11.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Dentro del marco de los objetivos de este proyecto se estableció que el tamaño de partícula de la biomasa a ingresar al reactor es de 2 [mm]. Debido a que cada tipo de biomasa presenta características físicas totalmente diferentes, la materia prima recibe un tratamiento de trituración mediante el molino de martillos, el cual presenta variedad de mallas que se ajustan a la necesidad de cada individuo. Este equipo se encuentra instalado en el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica.

Figura 32. Molino de martillos.



En la figura 31 se muestra el molino empleado en esta fase; cabe resaltar la importancia del uso adecuado de los implementos de seguridad al manipular el equipo, en especial el tapabocas, dado que durante el proceso se desprende material particulado perjudicial para las vías respiratorias, las gafas de seguridad para prevenir el ingreso de dichas partículas a los ojos y tapa oídos ya que el nivel sonoro de la máquina es considerable.

Para finalizar la preparación de la biomasa, nos dirigimos a la balanza para separar muestras de 1 [Kg].

11.2 OPERACIÓN DEL REACTOR

Para comenzar la operación del gasificador, inicialmente retiramos la tapa de este y verificamos que se encuentre limpio internamente para que ninguna suciedad altere el procedimiento, luego, procedemos a ingresar al reactor 1 [Kg] de biomasa como se muestra en la figura 32, asegurándonos de que baje y llene el reactor totalmente.

Figura 33. Proceso de llenado del reactor.



Posteriormente, introducimos material reciclable (hojas usadas, cartón, etc.) sobre la biomasa con el fin de iniciar el fuego con un soplete y, al observar que la biomasa comienza a incinerarse procedemos a colocar el empaque y la tapa cuidadosamente, asegurándola con los ganchos laterales.

Figura 34. Encendido del reactor.



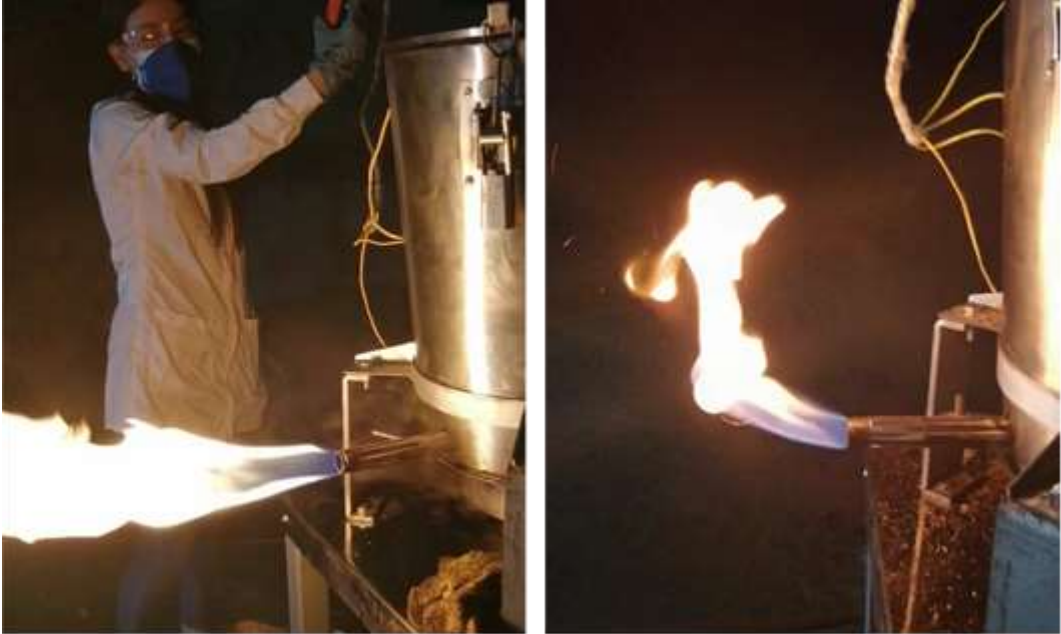
Seguidamente permitimos el paso de flujo de aire constante con ayuda del compresor y con ayuda del termómetro, medimos las temperaturas de las 4 termocuplas, verificando que estas vayan incrementando su valor para asegurar que el proceso si se está llevando a cabo.

Figura 35. Fotografía del reactor funcionando (tomada a través de la entrada de aire).



Al llegar a temperaturas entre los 500 y 600 [°C] en la termocupla 3 (dependiendo del tipo de biomasa con la cual estemos trabajando), podemos comprobar si por el tubo de escape está saliendo gas de síntesis, acercando con precaución el soplete con llama al tubo; si el gas se enciende y la llama perdura podemos concluir que la práctica ha sido exitosa.

Figura 36. Evidencia fotográfica de llama a partir de cascarilla de arroz (izquierda) y paja de arroz (derecha).



12. ANÁLISIS ECONÓMICO

Tabla 23. Análisis económico del banco de gasificación.

PRESUPUESTO			
Cant.	Descripción	Valor unitario	Costo
1	Reactor	\$ 1,435,900.00	\$ 1,435,900.00
1	Tubería (Entrada de aire-Salida de gas)	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00
1	Adicionales (Malla y lámina de revestimiento)	\$ 125,000.00	\$ 125,000.00
2	Empaque	\$ 35,000.00	\$ 70,000.00
1	Recubrimiento (Manta cerámica)	\$ 125,000.00	\$ 125,000.00
4	Termocupla tipo K con respectivo conector	\$ 60,000.00	\$ 240,000.00
1	Termómetro de entrada única TM100 EXTECH	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00
1	Bastidor	\$ 200,000.00	\$ 200,000.00
1	Biomasa	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00
1	Herramientas e implementos	\$ 70,000.00	\$ 70,000.00
1	Transporte	\$ 60,000.00	\$ 60,000.00
2	Producción intelectual	\$ 600,000.00	\$ 1,200,000.00
TOTAL			\$ 3,907,900.00

12. CONCLUSIONES

Se logró diseñar y fabricar el banco de laboratorio cumpliendo con los requerimientos establecidos inicialmente, además el diseño permite la facilidad de operación del equipo, haciendo que cualquier individuo, con los implementos adecuados, sea capaz de manipularla y consiga reproducir el proceso completo de gasificación.

Al someter el gasificador a pruebas obtuvimos buena funcionalidad del equipo teniendo en cuenta que, al aplicarle chispa al gas, producto de la gasificación, este se enciende y su llama perdura, además se obtuvo una composición del gas de síntesis en porcentaje molar de $n_{CO_2} = 23,53\%$, $n_{CO} = 36,45\%$, $n_{H_2} = 18,59\%$, $n_{CH_4} = 9,51\%$, y al evaluar su efectividad arrojó un valor aproximado a 40%.

La implementación del gasificador como banco de laboratorio en la escuela de ingeniería mecánica culminó con éxito, este cuenta con sus respectivos manuales de funcionamiento y mantenimiento, además de la rutina de limpieza del equipo.

Se hizo entrega del banco de gasificación junto con sus guías de laboratorio donde se muestra el procedimiento para el correcto uso de la máquina.

Se realizó el análisis económico donde se evidencia que el equipo, además de ser funcional, presentó bajo costo de manufactura, lo cual indica una buena relación calidad-precio si comparamos este valor con lo cotizado en el mercado.

13. RECOMENDACIONES

Para quien tenga interés en este equipo, se propone que se mejore dentro de los siguientes aspectos:

Realizar un correcto análisis de gases para evaluar la efectividad del equipo.

Adaptar el equipo para alimentación continua con el fin de realizar una comparación entre ambos sistemas e identificar si corresponde a una mejoría o no.

Implementar sistemas de control sobre el sistema de alimentación de biomasa y de entrada de aire para variar más parámetros del equipo y de esta forma realizar prácticas con el fin de comprobar de forma experimental cual configuración presenta mejores resultados.

Mejorar el sistema de lectura de temperaturas a través de una interfaz con Arduino y displays para cada termocupla, así como también una toma de datos continua (por computador) durante toda la práctica para entender mejor el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

ABAUNZA GÓMEZ, Álvaro., GARCÍA GAMBOA, Kevin. Modelamiento matemático de un gasificador de cisco de café de lecho fijo downdraft. [En línea]. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2019. p 26. Disponible en: <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/16977/1/175106.pdf>.

Albert LA, López Moreno, S, Flores J. Diccionario de la contaminación. México DF: Centro de Ecología y Desarrollo; 1994. (Materia volátil. En: Diccionario de la contaminación). Disponible en: <https://www.osman.es/diccionario/definicion.php?id=13184>

ASTM E1757-01. Practica estándar para la preparación de biomasa para análisis compositivo. [en línea]. (aprobada 2015). Disponible en internet: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1757

ASTM E872-82. Método de prueba estándar para materia volátil en el análisis de combustible de madera particulada. [en línea]. (aprobada en 2013). Disponible en internet: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82

ASTM E1756 – 08. Método de prueba estándar para la determinación de sólidos totales en biomasa. [en línea]. (aprobada 2015). Disponible en internet: [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08(2015))

B. REED, Thomas. A formula for the empirical estimation of the heats of combustion of carbonaceous materials. Solar Energy Research institute. Appendix A. p 323.

BARAJAS PEÑARANDA, Fabian Yesid. Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial De Santander. [En línea]. Tesis Doctoral. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela De Ingeniería Mecánica. 2013. Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/17247>

BASU, Prabir. Gasificación de biomasa, pirólisis y torrefacción: Diseño práctico y teoría. [En línea]. 3 ed. Academic Press. 2018. p. 582. ISBN: 9780128130407. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/biomass-gasification-pyrolysis-and-torrefaction/basu/978-0-12-812992-0>

BERMUDEZ, J.M., FIDALGO, B., Production of bio-syngas and bio-hydrogen via gasification. En: Handbook of biofuels production [en línea]. 2 ed. Woodhead Publishing, 2016. p 444. ISBN: 9780081004562. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004555000151>

BRAZ, Carlos Eduardo; CRNKOVIC, Paula M: Physical – Chemical Characterization of Biomass Samples for Application in Pyrolysis Process. [En línea]. En: CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. 2014, Vol. 37, p. 523-528. ISBN 978-88-95608-28-0. Disponible en internet: <https://uao.libguides.com/c.php?g=529806&p=4412778>

CABELLO DOMÍNGUEZ, Antonio. Planta piloto de gasificación de biomasa. Proyecto Fin de Carrera defendido en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2008. p 25. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20097/>

CARRASCO VENEGAS, Luis Américo. Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis. [En línea]. Informe final de

investigación. Callao: Universidad Nacional del Callao. Facultad de Ingeniería Química. 2015. p. 27-28.

CARRASCO, Juan E. Combustión directa de la biomasa. [En línea]. Máster en Energías Renovables y Mercado Energético. España: Escuela de Organización Industrial. 2007-2008. p 15. Disponible en: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf.

CENGEL, Yunus. GHAJAR, Afshin. Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. 4ta Ed., Mc. Graw Hill. 2011. p. 945. ISBN: 9781456202545.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRABAJO, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. Resolución (2018). Por la cual se expide el reglamento técnico de calderas [en línea]. Santa Fe de Bogotá D.C.: El Ministerio. 2018. p. 74. Disponible en: <http://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59676/PROYECTO+DE+RESOLUCION+POR+LA+CUAL+SE+EXPIDE+EL+REGLAMENTO+TECNICO+DE+CALDERAS.pdf/1a7449ce-9575-7c61-2173-499a99f3ad4a>

COLOMBIA. Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), Universidad Industrial de Santander (UIS). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. ISBN: 978-958-8504-59-9.

ECHEVERRÍA CRUZ, Manuel Antonio. LÓPEZ MENA, Orlando Antonio. Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica. [En línea]. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2010. p 78. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2058>.

ESPAÑA. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC) Dept. Conservación de Suelos y Manejo de Residuos Orgánicos. Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación (CTC). Agrupación de Conserveros y Empresas de Alimentación de Murcia, Alicante y Albacete (AGRUPAL). Gasificación. AGROWASTE. 2013. Disponible en: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACION.pdf>

Estructura de los cereales: Arroz. [sitio web] http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/semillas/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=24 Consultado: 09 de enero de 2020.

FEDEARROZ., AMTEC. Manejo integrado del cultivo del Arroz. [En línea]. Colombia. PRODUMEDIOS. 2013. p: 23-25. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/283764171/Manejo-Integrado-Del-Cultivo-Del-Arroz-Libro-Digital-1>

GARCÍA FERNÁNDEZ, Luis Eduardo. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. [En línea]. Tesis para optar el título de Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2011. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/11054207.pdf>

HUARAZ CHOI, Carlos Yi. Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz. [En línea]. Lima. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. 2013. Disponible en: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4497/HUARAZ_CARLOS_GASIFICADOR_25KW.pdf?sequence=1&isAllowed=y

KRUSHNA, Patil., BHOI, Prakash., HUHNKE, Raymond., BELLMER, Danielle. Biomass downdraft gasifier with internal cyclonic combustion chamber: Design, construction, and experimental results. En: Bioresource Technology. [En línea]. Elsevier, Mayo, 2011, Vol. 102, nro. 10, Pp: 6286-6290. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.03.033

LÓPEZ, Ismael Sánchez; IZQUIERDO, A. G.; ALCÓN, N. E. Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación. [En línea]. En Conama: Congreso Nacional del Medio Ambiente. España. 2014. p 8. Disponible en:

<http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711942.pdf>

Lower heating value for some organic compounds (at 25 °C [77 °F]). En: Heat of combustion. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_combustion

MEGYESY, Eugene. Manual de recipientes a presión, diseño y calculo. México: Grupo noriega editores, 1992. p. 19.

NIST-JANAF; Thermochemical Tables. [En línea]. Disponible en: <https://janaf.nist.gov/>

PARIKH, Jigisha; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. Fuel, 2007, vol. 86, no 12-13, p. 1710-1719. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.029

PUIG-ARNAVAT, Maria; BRUNO, Joan Carles; CORONAS, Alberto. Review and analysis of biomass gasification models. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, vol. 14, no 9, p. 2841-2851.

RAMÓN RAMÓN, Sergio Andrés; CARDENAS GUTIERREZ, Javier Alfonso y ROJAS SUAREZ, Jhan Piero. Poder calorífico de la cascarilla de arroz usada como combustible en hornos de secado. Mundo Fesc, vol. 15, no. 1, p. 72-76, 2018.

SÁNCHEZ PLAZAS, Oscar Daniel. Modelamiento termodinámico de la gasificación de bambú y cuesco de coco en un gasificador de lecho fijo a escala piloto. Tesis de Magister en Ingeniería Mecánica. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2018, p. 21.

Sandmeyer Steel. Aleación 310/310S En: Placa de Acero Inoxidable. Disponible en: <https://www.sandmeyersteel.com/spanish/310-310S.html#PropiedadesF%C3%ADsicas>

STENBACKA, Nils. On arc efficiency in gas tungsten arc welding. Soldagem & Inspeção, 2013, vol. 18, no 4, p. 380-390. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242013000400010>

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). PRÁCTICA DE ESTEQUIOMETRIA Y COMBUSTIBLES No. 13 – COMBUSTION: Determinación del porcentaje de carbono fijo en una muestra de carbón. [En línea]. 2016. p 1. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/326700882/CARBONO-FIJO#>

YAN, Wei-Cheng, et al. Model-based downdraft biomass gasifier operation and design for synthetic gas production. [En línea]. Journal of cleaner production, 2018, vol. 178, p. 476-493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.009>

YAO, Xiwen., XU, Kaili., LIANG, Yu. Comparing the thermo-physical properties of rice husk and rice straw as feedstock for thermochemical conversion and characterization of their waste ashes from combustion. En: BioResources [en línea]. Noviembre, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.4.10549-10564

ZAINAL, Z. A., et al. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. Energy conversion and management, 2001, vol. 42, no 12, p. 1499-1515.

ANEXOS

“Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”