

DISEÑO DE UN GASIFICADOR DUAL PARA BIOMASA RESIDUAL  
AGROPECUARIA A NIVEL LABORATORIO

WILLIAM DAVID NAVARRO ABRIL

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2016

DISEÑO DE UN GASIFICADOR DUAL PARA BIOMASA RESIDUAL  
AGROPECUARIA A NIVEL LABORATORIO

WILLIAM DAVID NAVARRO ABRIL

Proyecto de investigación para optar el título de  
INGENIERO MECÁNICO

Director  
ANDREA LACHE MUÑOZ  
Ingeniero Químico

Codirector  
JHON FREDDY OCHOA AVENDAÑO  
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2016

Aceptación (Dirección de Investigaciones)

---

---

---

---

---

---

Firma Docente Investigador

---

Firma Docente Jurado 1

---

Firma Docente Jurado 2

Bogotá D.C., Agosto de 2016

## DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrector Académico y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano general Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director de Investigaciones

Ing. Armando Fernández Cárdenas

Director del Programa de Mecánica

Ing. Carlos Mauricio Veloza Villamil

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

## DEDICATORIA

### A Dios:

Por quitar las bastantes capas de vendaje que existe en el interior de mí ser. Al revelarme un desconocido viaje de instantes agrios y de las enormes inyecciones de felicidad, por acompañar guiar y conducir hasta este gran momento de la carrera.

### A mi madre Ligia Abril:

Por el apoyo en esos momentos donde se necesitó de consejos, de algún valor o una gran motivación. Por lo que no es necesario explicar y me ha permitido levantar en cada tropezón poder limpiar las pestañas de mis ojos y ver una mejor persona.

### A mi padre Jorge Navarro:

Por ser el forjador de mis raíces y el pulidor de mis frutos con los excelentes e incomparables ejemplos de perseverancia, responsabilidad, respeto que lo caracterizan. Por las lecciones vividas que a lo largo del túnel me has transmitido para no perder de curso el horizonte

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres:

Al grandioso esfuerzo incondicional que me ha permitido iniciar y culminar la etapa de educación superior, por su apoyo en todo momento de mi vida porque por ellos he llegado a donde estoy.

A mis Maestros:

Por sus conocimientos incrustados en mi cerebro los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A la Directora Andrea Lache y Codirector Jhon Ochoa:

Por el apoyo y la orientación en este trabajo ya que con sus conocimientos y por su experiencia llegue a lograr mis objetivos en la elaboración del mismo.

## CONTENIDO

	pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>19</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>20</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>22</b>
<b>1. GENERALIDADES TEÓRICAS</b>	<b>23</b>
1.1 ENERGÍA	23
1.1.1 Generación de energía a partir de gasificación de biomasa en el mundo.	24
1.1.2 Energía renovable en Colombia.	25
1.2 BIOMASA	27
1.2.1 Clasificación de biomasa.	28
1.2.2 Procesos de conversión de biomasa.	29
1.2.3 Características de la biomasa.	31
1.3 GASIFICACIÓN	32
1.3.1 Operaciones de gasificación.	34
1.3.2 Parámetros de operación en la gasificación.	35
1.3.2.1 Agente oxidante.	35
1.3.2.2 Temperatura.	35
1.3.2.3 Presión.	36
1.3.2.4 Materia prima.	36
<b>2. SELECCIÓN MATERIA PRIMA</b>	<b>37</b>
<b>3. ALTERNATIVA DE GASIFICACIÓN</b>	<b>47</b>
3.1 EQUIPOS DE GASIFICACIÓN	47
3.1.1 Lecho fijo.	47
3.1.1.1 De flujo contracorriente.	48
3.1.1.2 De flujo paralelo.	49
3.1.1.3 De flujo cruzado.	50
3.1.2 Lecho fluidizado.	51
3.1.3 Lecho arrastrado.	53
<b>4. DISEÑO DEL GASIFICADOR</b>	<b>60</b>
4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL GASIFICADOR	60
4.2 PLACA DISTRIBUIDORA DE LECHO FLUIDIZADO	66
4.3 ESPESOR DEL GASIFICADOR	72
4.4 UNIÓN ATORNILLADA	73
4.5 AISLANTE TÉRMICO	79
4.6 ESTRUCTURA	82
4.7 VÁLVULAS	89

<b>5. ANÁLISIS DE DISEÑO</b>	<b>91</b>
5.1 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL	91
5.1.1 Pre-Proceso.	91
5.1.1.1 Preparación del modelo.	91
5.1.1.2 Enmallado.	92
5.1.1.3 Condiciones de frontera.	92
5.1.2 Pos-proceso..	93
5.2 SIMULACIÓN TÉRMICA	95
5.2.1 Pre-Proceso.	95
5.2.1.1 Preparación del modelo.	95
5.2.1.2 Enmallado.	96
5.2.1.3 Condiciones de frontera.	97
5.2.2 Pos-proceso.	98
<b>6. MEDICIÓN DE TEMPERATURA</b>	<b>99</b>
6.1 TERMOPAR	99
6.2 CIRCUITO IMPRESO	100
6.3 TARJETA DE ADQUISICIÓN	103
6.4 LABVIEW	104
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>109</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>112</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>118</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Calculo del score para cultivos permanentes de Cundinamarca	39
Tabla 2. Calculo del score para cultivos transitorios de Cundinamarca	40
Tabla 3. Calculo del score para los residuos de biomasa	46
Tabla 4. Calculo del score para las alternativas de diseño	58
Tabla 5. Toberas apropiadas para gasógenos de madera	66
Tabla 6. Determinación de la temperatura exterior	81

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>pág.</b>
Grafica 1. Cultivos seleccionados	42
Grafica 2. Altura del plano de las toberas sobre el estrechamiento del hogar, para diversos tamaños de generador	64
Grafica 3. Diámetro del anillo de las toberas y apertura de éstas, en relación con el estrechamiento y el diámetro del hogar, para diversos modelos de generadores	65
Grafica 4. Coeficiente de corrección para los orificios	71
Grafica 5. Esfuerzo critico de pandeo	88
Grafica 6. Deformación total	93
Grafica 7. Esfuerzo equivalente	94
Grafica 8. Distribución de temperatura	98

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Impactos según fuente energética	24
Cuadro 2. Proyectos MDL en energías renovables de Colombia	26
Cuadro 3. Centros de innovación tecnológica en Colombia	26
Cuadro 4. Clasificación de biomasa	28
Cuadro 5. Rating de satisfacción para selección del cultivo	38
Cuadro 6. Rating de satisfacción para selección de biomasa residual	43
Cuadro 7. Aspectos del equipo en contracorriente	48
Cuadro 8. Aspectos del equipo en paralelo	50
Cuadro 9. Aspectos del equipo en cruzado	50
Cuadro 10. Aspectos del equipo de lecho fluidizado	52
Cuadro 11. Aspectos del equipo de lecho arrastrado	53
Cuadro 12. Rating de satisfacción para la selección de la alternativa de gasificación I	56
Cuadro 13. Rating de satisfacción para la selección de la alternativa de gasificación II	56
Cuadro 14. Información sobre los residuos de biomasa	56
Cuadro 15. Propiedades del Acero estructural ASTM A500 grado C	91
Cuadro 16. Características de la malla	92
Cuadro 17. Propiedades del acero inoxidable AISI 310S	95
Cuadro 18. Propiedades de la colcha de vidrio	96
Cuadro 19. Propiedades de la fibra de vidrio	96
Cuadro 20. Propiedades del aluminio	96
Cuadro 21. Propiedades del acero inoxidable AISI 316	96
Cuadro 22. Características de la malla	97

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Balance de CO <sub>2</sub> de la biomasa	27
Figura 2. Aprovechamiento de la biomasa	30
Figura 3. Etapas de gasificación	33
Figura 4. Representación de las operaciones de gasificación	34
Figura 5. Clasificación de los equipos de gasificación	47
Figura 6. Reactor de flujo contracorriente	48
Figura 7. Reactor de flujo paralelo	49
Figura 8. Reactor de flujo cruzado	51
Figura 9. Reactores de lecho fluidizado	52
Figura 10. Reactor de lecho arrastrado.	54
Figura 11. Dimensiones del cisco de café (cm)	59
Figura 12. Dimensiones de diámetro de garganta y altura del plano de toberas sobre la garganta	65
Figura 13. Lecho fluido clásico.	67
Figura 14. Diferentes orientaciones en el ingreso del agente oxidante	67
Figura 15. Configuración triangular	70
Figura 16. Tronco de cono para el tornillo	74
Figura 17. Circuito térmico de paredes cilíndricas compuestas para el gasificador	80
Figura 18. Geometría de la estructura	82
Figura 19. Diagrama de cuerpo libre	83
Figura 20. Momento de corte máximo	84
Figura 21. Diagrama de momento máximo	84
Figura 22. Factor de longitud K	87
Figura 23. Válvula de bola guiada o trunnion	89
Figura 24. Válvula de cuchilla	90
Figura 25. Malla de la estructura	92
Figura 26. Condiciones de frontera en la estructura	93
Figura 27. Componentes del reactor	95
Figura 28. Enmallado del reactor	97
Figura 29. Condiciones de frontera	97
Figura 30. Puntos de medición de temperatura.	99
Figura 31. Conexión del circuito integrado AD595, con alarma	100
Figura 32. Divisor de voltaje	101
Figura 33. Diseño del circuito para medición temperatura	102
Figura 34. Diagrama de elementos electrónicos	102
Figura 35. Tarjeta Arduino	103
Figura 36. Ficha de datos de la tarjeta Arduino UNO	104
Figura 37. Panel frontal	105
Figura 38. Selección del puerto al que está conectado la tarjeta Arduino	105
Figura 39. Configuración de las entradas análogas	106

Figura 40. Creación del archivo Excel	106
Figura 41. Camino para guardar los datos	106
Figura 42. Iniciar el registro de datos	107
Figura 43. Culminación del registro de datos	108
Figura 44. Archivo Excel con sus respectivos datos guardados	108

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Formula de Dulong poder calorífico inferior	32
Ecuación 2. Formula de Dulong poder calorífico superior	32
Ecuación 3. Calculo de la ponderación lineal Scoring	37
Ecuación 4. Entrada máxima aire/gas	60
Ecuación 5. Máxima entrada de gas	60
Ecuación 6. Entrada real de gas	61
Ecuación 7. Potencia térmica del gas	61
Ecuación 8. Producción mecánica del motor (máx.)	61
Ecuación 9. Producción eléctrica (máx.)	61
Ecuación 10. Consumo de energía térmica	62
Ecuación 11. Consumo de biomasa del gasificador	62
Ecuación 12. Carga del hogar	63
Ecuación 13. Área de un círculo	63
Ecuación 14. Altura del plano de las toberas sobre la sección transversal de la garganta	64
Ecuación 15. Diámetro del anillo superior de las toberas.	65
Ecuación 16. Perdida de presión en el lecho	67
Ecuación 17. Perdida de presión en el plato distribuidor	68
Ecuación 18. Velocidad del gas en el orificio	68
Ecuación 19. Velocidad del flujo volumétrico del agente debajo de la rejilla	69
Ecuación 20. Número de orificios necesarios	69
Ecuación 21. Paso para una configuración triangular	70
Ecuación 22. Densidad del orificio	70
Ecuación 23. Coeficiente de corrección del orificio	70
Ecuación 24. Comprobación del factor de corrección del orificio	71
Ecuación 25. Espesor para recipientes cilíndricos a presión	72
Ecuación 26. Longitud roscada del perno, para roscas métricas	73
Ecuación 27. Rigidez del perno, Kb	73
Ecuación 28. Rigidez de la junta, Kj	74
Ecuación 29. Constante de rigidez	75
Ecuación 30. Precarga para el perno Fi	76
Ecuación 31. Carga máxima soportada por el tornillo	76
Ecuación 32. Espaciamiento de los pernos en un círculo	77
Ecuación 33. Factor corregido	77
Ecuación 34. Carga máxima de separación	77
Ecuación 35. Límite de fatiga	78
Ecuación 36. Límite de fatiga modificado	78
Ecuación 37. Esfuerzo alternante de un perno	78
Ecuación 38. Esfuerzo medio de un perno	79
Ecuación 39. Factor de seguridad por fatiga	79
Ecuación 40. Resistencia térmica por convección para un cilindro	80

Ecuación 41. Resistencia térmica por conducción para una configuración cilíndrica	81
Ecuación 42. Temperatura superficial exterior	81
Ecuación 43. Módulo de sección requerido	85
Ecuación 44. Relación de esbeltez	86
Ecuación 45. Constante de la columna	86
Ecuación 46. Carga crítica para columna corta	87
Ecuación 47. Resistencia de diseño de una columna	87
Ecuación 48. Factor de seguridad	94
Ecuación 49. Voltaje de salida en un divisor de voltaje.	101

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Estadística de los cultivos en cundinamarca 2012-2013	119
Anexo B. Datos de residuos de biomasa	123
Anexo C. Perfil estructural de tubo cuadrado	129
Anexo D. Selección del material para válvulas, relación presión temperatura para el aisi-316, tipo de discos	130
Anexo E. Linealización del circuito integrado AD595	134
Anexo F. Diagrama del circuito para medir temperatura y diagrama de elementos electrónicos para el circuito impreso	135
Anexo G Diagrama de conexión unitaria y diagrama total de los elementos para medir temperatura	136
Anexo H. Instrucciones para establecer conexión entre la tarjeta arduino y labview	137
Anexo I. Diagrama grafico para la lectura de temperatura	142
Anexo J. Propiedades de materiales	143
Anexo K. Planos del gasificador dual para biomasa residual agropecuaria a nivel laboratorio	149

## GLOSARIO

**AGENTE GASIFICANTE:** elemento que reacciona con los volátiles generados y el sólido carbonoso, dependiendo cual sea el agente cambian las características del gas combustible obtenido.

**ALQUITRÁN:** producto que se obtiene por la destilación destructiva de la biomasa de origen orgánica por lo general son de consistencia grasosa y de color oscuro.

**BIOMASA:** recurso que puede descomponerse naturalmente además aprovecha la energía del sol para su vitalidad ya sea directa o indirectamente, como árboles, helechos, algas marinas, plantas, etc.

**ENERGÍAS RENOVABLES:** recurso que con el pasar del tiempo vuelve a nacer por medio de procesos naturales.

**ENERGÍAS NO RENOVABLES:** fuentes que después de ser utilizados por ningún medio natural pueden volver a su estado inicial.

**GAS DE SÍNTESIS:** gas combustible de bajo poder calorífico, se obtiene mediante el proceso termoquímico de la biomasa (gasificación) sus principales componentes CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, entre otros.

**GASIFICACIÓN:** consiste en conseguir gas combustible llevando un material sólido orgánico carbonoso a grandes temperaturas haciéndolo reaccionar con oxígeno controlado u otros agentes oxidantes.

**LECHO:** volumen de biomasa dentro del reactor

**PIROLISIS:** transformación que sufre la biomasa en presencia de calor (determinadas temperaturas), en carencia de aire, oxígeno, o hidrógeno. Los productos producidos por este proceso termoquímico son el carbón vegetal, compuestos gaseosos, líquidos combustibles, aceites

**PROCESO TERMOQUÍMICO:** transcurso en el cual la biomasa sufre una transformación en presencia de calor, para producir productos como carbón vegetal, líquidos combustibles, gases combustibles

**RESIDUOS DE BIOMASA AGRÍCOLA:** desechos biodegradables descendientes o producidos por el sector agrícola como cascaras, bagazo, semillas, ramificaciones entre otros, por lo general el valor económico de estos productos es despreciable

## RESUMEN

El presente documento describe el proyecto del grupo de investigación en energías alternativas perteneciente a la Fundación Universidad de América, el cual busca promover la implementación de fuentes alternas de energía, en beneficio del medio ambiente en Colombia. En el progreso de este proyecto de grado, se realizará la selección de biomasa residual agropecuaria en Cundinamarca, para su posterior gasificación. Como eje central del proyecto se describen los principales reactores utilizados para conseguir gas de síntesis con el objetivo de diseñar un gasificador que permita dos tipos diferentes de operación, a escala laboratorio.

El desarrollo del proyecto empieza con los argumentos teóricos a cerca de las generalidades en energías, evaluando el estado de la biomasa residual para realizar una selección de este recurso, como también lo relacionado con el proceso de gasificación y los diferentes tipos de reactores; identificando en cada uno las características de funcionamiento, materiales, etc.

Se logró determinar, plantear, analizar y evaluar las alternativas de diseño del gasificador dual de acuerdo con los criterios establecidos. En el diseño de detalle se especificó las dimensiones del equipo, el espesor del material a usar, válvulas de control, el perfil de la estructura, entre otros. Se analiza el comportamiento estructural y térmico de los materiales por el método de elementos finitos mediante el software de simulación avanzada ANSYS para dar soluciones aproximadas de los modelos matemáticos bajo un entorno real. Se realizó una aplicación para a futuro registrar datos de temperatura con la ayuda del software LabVIEW donde se visualizará la medición de los perfiles mediante sensores dentro del gasificador.

**PALABRAS CLAVE:** ANSYS, Biomasa, Biomasa residual, Conciencia ambiental, Diseño, Energías alternativas, Escala laboratorio, Fuentes de energía, Gasificación, Gasificador dual, Gas de síntesis, LabVIEW, Reactor.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha visto evidenciada la futura escasez de las fuentes de energía fósiles, debido al alto consumo de las mismas y al hecho de que son finitas. A lo anterior, se suma el deterioro que ha venido sufriendo el medio ambiente, en parte como consecuencia de la explotación de dichas fuentes fósiles, razón por la cual, ha surgido la necesidad de desarrollar tecnologías para el aprovechamiento de otras fuentes de energía que además de satisfacer la demanda de la misma, no contribuyan con la contaminación ambiental y en consecuencia con fenómenos como el cambio climático.

En dicho panorama, el grupo de investigación en energías alternativas de la Fundación Universidad de América promueve el desarrollo del diseño de un equipo para gasificar biomasa residual a nivel laboratorio con la característica que se pueda obtener el gas de síntesis por medio de la operación del gasificador de lecho fijo de flujo paralelo y del gasificador de lecho fluidizado burbujeante en un mismo sistema, se aclara que el equipo diseñado en esta investigación no permite el doble funcionamiento durante una operación es decir cuando opere en lecho fluidizado burbujeante no podrá funcionar al mismo tiempo el mecanismo para lecho fijo de flujo paralelo y viceversa.

El diseño del gasificador dual para biomasa residual agropecuaria a nivel laboratorio se realizó por el interés de disponer de un sistema cuyo funcionamiento permita identificar las ventajas y desventajas de cada tipo de operación frente a una determinada biomasa (cisco de café, bagazo y hojas de caña panelera). Por otra parte profundizar en el desarrollo del proyecto de investigación es de interés académico que estudiantes de la Fundación Universidad de América en un futuro conozcan, realicen pruebas y desarrollen proyectos para identificar el potencial energético de residuos de biomasa que en la actualidad no tienen ningún valor y así aportar algo de conocimiento para mitigar las lesiones causadas al medio ambiente.

Para lograr el objetivo principal a cumplir fue necesario un estudio analítico y de selección para el departamento de Cundinamarca en Colombia sobre los residuos generados en los cultivos permanentes y transitorios apropiados para el proceso de gasificación, luego se procede a obtener la información de los tipos de gasificadores de biomasa con todas sus características para poder elegir la combinación que cumpla con los requisitos planteados; una vez terminado este proceso se realiza el diseño detallado teniendo en cuenta la clasificación de operación de los gasificadores, tipos de biomasa a gasificar, parámetros y condiciones de operación. Se busca el perfil de temperaturas en el reactor por medio de la ayuda del software ANSYS para encontrar posibles cargas o esfuerzos debidos a altas temperaturas, se utiliza el mismo software con la finalidad de verificar el comportamiento de deformación en la estructura establecida. Culminando el desarrollo del proyecto se implementa un sistema de lectura y registro de datos de temperatura mediante termopares, un circuito integrado, una tarjeta de interface Arduino y el software

LabVIEW que consta de un sistema de alarmas comunicando errores que puedan ocurrir con los sensores o elevadas temperaturas que puedan causar daños en el gasificador.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Diseñar un gasificador de biomasa residual agropecuaria a escala laboratorio que permita realizar dos tipos diferentes de gasificación.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Seleccionar los tipos de biomasa residual disponibles del sector agropecuario de Cundinamarca, con mayor potencial de aprovechamiento vía gasificación.
- II. Establecer las alternativas de diseño teniendo en cuenta la clasificación de operación de los gasificadores, parámetros de diseño, condiciones de operación y tipos de biomasa seleccionados.
- III. Diseñar la alternativa del modelo gasificador previamente seleccionada.
- IV. Realizar la simulación computacional para determinar cargas térmicas y/o esfuerzos sobre el gasificador
- V. Desarrollar una aplicación en LabVIEW para la medición y visualización de los perfiles de temperatura en el gasificador diseñado.

## 1. GENERALIDADES TEÓRICAS

En el desarrollo del presente capítulo se encontrarán los conceptos básicos para el desarrollo del proyecto, enfocando la investigación en biomasa y el proceso termoquímico de gasificación.

### 1.1 ENERGÍA

Los combustibles fósiles se han utilizado durante el último siglo con mucha eficiencia, haciendo de estos una plataforma económica, social y política completamente estructurada como para ser abandonada. Es inevitable el problema de escases al que se enfrentan las industrias de los productos fósiles, porque la fuente no vuelve a retornar al estado inicial después de ser manipulados y aunque el planeta tenga cantidades enormes del recurso en algún tiempo se agotara, si el consumo sigue al actual se necesitarían entre (40 años a 200 años)<sup>1</sup> para extinguir los recursos fósiles.

Las actividades del hombre han deteriorado la fauna y flora, causando disminución de recursos naturales, llegando casi que al borde extinción. Las emisiones emitidas por los procesos industriales causarían entre el 4 a 10% de deforestación para el año 2050 causando la reducción de fuentes biológicas y muy posiblemente pérdida del potencial evolutivo del planeta<sup>2</sup>. Los gases de efecto invernadero emitidos por la quema de combustibles fósiles causa que la temperatura media de la tierra se eleve, en donde el último siglo aumento entre 0.3 a 0.6 °C. La capa de ozono disminuyo su masa en al menos el 5%, como resultado agujeros en diferentes partes y los rayos ultravioleta que emite el sol entran casi que directamente<sup>3</sup>.

Debido a los diferentes problemas causados por las obras del hombre, actualmente se percibe un gran auge en desarrollar y perfeccionar las técnicas para obtener energías de fuentes alternas a las convencionales, reduciendo los costos de fabricación, aumentando la eficiencia de generación entre otros, para prever y mitigar los daños de manejo de las fuentes fósiles en diferentes procesos industriales.

En el cuadro 1 se observan los impactos ambientales originados por la generación de energía según el empleo de las principales fuentes energéticas.

---

<sup>1</sup> GIL GARCÍA, Gregorio. Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas. España: Mundi-Prensa, 2008. p.25.

<sup>2</sup> WALKER B., W. STEFFEN. *The terrestrial biosphere and global change; implications for natural and managed ecosystems*, citado por: MATEO RODRIGUEZ, José Manuel. Los caminos para el cambio: la incorporación de la sustentabilidad ambiental para el cambio. La incorporación de la sustentabilidad ambiental al proceso de desarrollo. Cuba: Editorial Universitaria, 2008. p 49, 52

<sup>3</sup> *Ibíd.*

Cuadro 1. Impactos según fuente energética

<b>Fuente</b>	<b>Impactos</b>
Petróleo	Cambio climático global, contaminación del aire debida a los vehículos, lluvia acida, derrames de petróleo, accidentes en la manipulación del petróleo.
Gas natural	Cambio climático global, perdidas de metano en las tuberías, explosiones de metano, accidentes en la manipulación del gas.
Carbón	Cambio climático global, lluvia acida, deterioro medioambiental por explotación a cielo abierto, accidentes mineros por explotación a gran profundidad, contaminación de las aguas, accidentes en las minas y efectos sobre la salud de los mineros.
Energía nuclear	Radioactividad (liberación durante procesos rutinarios, riesgo de accidente, vertido de residuos), mala utilización del material fisionable, y otros materiales, en propósitos terroristas, proliferación de armas nucleares, contaminación del terreno en las minas, efectos en la salud de los mineros debida al uranio.
Biomasa	Efecto sobre el paisaje y la biodiversidad, contaminación de las aguas debida a los fertilizantes, uso escaso del agua, competencia con la producción de alimentos.
Hidroeléctrica	Desplazamiento de las poblaciones, efectos sobre los ríos, y el agua subterránea, presas (intrusión visual y riesgo de accidentes) efectos sísmicos, efectos sobre la agricultura aguas abajo, emisiones de metano por efecto de la biomasa sumergida.
Energía eólica	Intrusión visual en lugares de paisaje destacado, ruidos, pájaros e interferencia con las telecomunicaciones.
Energía mareas	Intrusión visual y destrucción del hábitat de la vida salvaje, reducción de los efluentes (aplicable principalmente a las presas de mareas, no a las turbinas actuales).
Energía geotérmica	Liberación de gases contaminantes (SO <sub>2</sub> y SH <sub>2</sub> , etc.) contaminación del terreno por sustancias químicas, incluidos los metales pesados, y los efectos sísmicos.

Fuente: GIL GARCÍA, Gregorio. Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas.

1.1.1 Generación de energía a partir de gasificación de biomasa en el mundo.<sup>4</sup> La **Planta Ironbridge**, ubicada en el reino unido (Sevem Gorge), cuenta con 740 MW de capacidad instalada, siendo la que más energía eléctrica genera en todo el mundo, anteriormente generaba electricidad a partir de carbón luego en el 2013 se transformó para que funcionara con pallets de madera.

Al sudeste de Polonia en Staszów se encuentra la **Planta Polaniec** perteneciente a GDF SUEZ, opera con residuos agrícolas y de madera, con 205 MW de capacidad instalada suministra energía a 600 mil hogares y evita las emisiones de dióxido de carbono alrededor de 1,2 millones de toneladas anuales. La gasificación de la biomasa la realizan en un equipo de lecho fluidizado circulante.

<sup>4</sup> POWER-TECHNOLOGY. *Power from waste - the world's biggest biomass power plants*. [En línea] 1 de Abril de 2014. [Citado el: 2 de Noviembre de 2015.] Disponible en <<http://www.power-technology.com/features/featurepower-from-waste---the-worlds-biggest-biomass-power-plants-4205990/>>

En el estado de Florida (South Bay), Estados Unidos se encuentra la **Planta de energía de biomasa NHPP**, tiene una capacidad de 140 MW opera con el bagazo de caña de azúcar y con los residuos de madera de la zona, suministra energía a 60 mil hogares y proporciona la energía requerida para el procesamiento de la caña de azúcar.

Finlandia uno de los países precursores por la cantidad de plantas de gasificación de biomasa, a continuación se mencionan las de mayor capacidad instalada:

La **Planta Alhomens Kraft** con 265 MW de capacidad instalada está situada en Alholmen, Jakobstad. Es la planta más grande de Finlandia y la segunda a nivel mundial, opera desde el 2002 con un reactor de lecho fluidizado circulante. Provee 60 MW de energía en forma de calor a los habitantes de la zona y 100 MW de calor a la fábrica de papel UPM-Kymmene.

La **Planta Kymijärvi II** cuenta con una capacidad instalada de 160 MW, entra en funcionamiento en el 2012, opera con un gasificador de lecho fluidizado circulante a presión atmosférica con combustibles sólidos recuperados (papel, plástico, madera, cartón) para generar 300 GWh de energía eléctrica y 600 GWh de energía para calefacción.

1.1.2 Energía renovable en Colombia. En Colombia se han implementado diferentes tecnologías con el propósito de entregar energía a regiones retiradas y a zonas no interconectadas, para que surjan y tengan competitividad en el desarrollo socioeconómico. El país posee variedad de recursos como para acceder a diferentes energías renovables<sup>5</sup>

El cuadro 2 muestra los proyectos registrados como MDL en el sector de energías renovables. Hay que resaltar el centro tecnológico eólico del departamento de la guajira llamado El Parque Eólico de Jepirachí aprovecha las corrientes de viento (promedio de 9,8m/s en el año) con 15 aerogeneradores, instalados en 1,2Km de ancho por 1Km de largo, opera desde el año 2004 con una capacidad efectiva neta de 19,5MW.<sup>6</sup> El parque hace parte de los 45 proyectos registrados ante la junta ejecutiva del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> COLOMBIA, U. NACIONAL, IPSE, MME. Centro de innovación tecnológica con énfasis en gasificación. (1a.ed.). Medellín: s.n., 2011. p. 14.

<sup>6</sup> COLOMBIA, EPM. Energía: Parque eólico Jepirachí. [En línea] [Citado el: 14 de Agosto de 2015.] Disponible en <<http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/ParqueE%C3%B3lico.aspx>>.

<sup>7</sup> SANABRIA AGUIRRE, Sonia Esperanza y HURTADO AGUIRRE, Enrique. Emprendimiento verde en Colombia: El caso del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Colombia: Revista Entramado, 2013. Vols. 9, No. 1. p. 45, 46, 47, 60,61.

Cuadro 2. Proyectos MDL en energías renovables de Colombia

Sector	Categoría	Actividad del proyecto		
Energías renovables	Hidroeléctrica	Generación de hidroeléctrica en pequeñas centrales, con capacidad desde 2,3MW hasta 80MW, siendo el mas pequeño el proyecto "la cascada" y el mas grande, el proyecto "rio amoya"		
		<b>Fecha de registro</b>	<b>Nombre del proyecto</b>	<b>Ubicación</b>
		07-ene-06	Agua Fresca Multipurpose and environmental services project	Antioquia (Jericó)
		11-may-06	Santa Ana Hydroelectric Plant	Bogotá
		15-ene-07	La Vuelta and La Herradura Hydroelectric Project	Antioquia
		27-ene-08	La Cascada 2.3MW Hydroelectric Project	Antioquia
		29-oct-09	Amaime Minor Hydroelectric Power Plant	Valle del Cauca
		17-ene-11	Caruquia 9.76MW Hydroelectric project	Antioquia
		09-mar-11	Bajo Tuluá Minor Hydroelectric Power Plant	Valle del Cauca
		06-may-11	Rio Amoyá Run-of-River Hydro Project	Tolima, chaparral
		17-may-11	Santiago 2.8MW Hydroelectric Project	Antioquia (Santiago)
		31-dic-11	Alto Tuluá Minor Hydroelectric Power Plant	Valle del Cauca
	Autogeneración	Utilización del gas metano generado en el proceso de tratamiento de aguas residuales para la generación de electricidad y utilización en los requerimientos de la misma planta		
<b>Fecha de registro</b>		<b>Nombre del proyecto</b>	<b>Ubicación</b>	
Eólica	Utilización de las corrientes de aire para la generación de electricidad			
	<b>Fecha de registro</b>	<b>Nombre del proyecto</b>	<b>Ubicación</b>	
	01-abr-06	Jepirachi Wind Power Project	Guajira (Uribia)	

Fuente: SANABRIA AGUIRRE, Sonia y HURTADO AGUIRRE, Enrique. Emprendimiento verde en Colombia: El caso del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL); Modificado por el autor.

Como solución a los problemas en las regiones donde hay bajo nivel de demanda energética el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), fomenta el desarrollo de planes para atacar el problema con soluciones energéticamente amigables con los ecosistemas y así motivar al aprendizaje, investigación y confrontar distintas tecnologías<sup>8</sup> como lo muestra el cuadro 3.

Cuadro 3. Centros de innovación tecnológica en Colombia

<b>Centro tecnológico con énfasis</b>	<b>Característica</b>
En energía solar	Ubicado en el departamento del Choco en Titumate, puesto en marcha con el objetivo de surtir energía por medio de un sistema hibrido entre combustible diésel y un sistema de concentración solar.
En energía eólica	Ubicado en el departamento de la Guajira dentro del municipio de Uribia, puesto en marcha para generar energía a poblados que no consumen mucho mediante equipos de una sola pala.

<sup>8</sup> COLOMBIA, U. NACIONAL, IPSE, MME. Op. Cit. p. 25, 27,28.

Cuadro 3. (Continuación).

En energía hidráulica	Ubicado en el departamento del Choco en Cupica, puesto en marcha con el propósito de proveer al corregimiento de Encarnación de energía eléctrica mediante turbinas chicas, además en el departamento de Antioquia una hidroeléctrica pequeña ayuda al proyecto con 55KW.
En combustibles líquidos y gaseosos	Ubicado en el departamento de bolívar en Isla Fuerte se coloca el proyecto con propósitos evaluativos y comparativos entre combustibles que normalmente utilizamos con combustibles gaseosos como Gas Licuado de Petróleo (GLP).
En agroenergía	Ubicado en el departamento de Antioquia en el municipio de Frontino y el Uraba Chocoano y Antioqueño, para producir combustibles mediante especies agrícolas (cultivos energéticos).
En biomasa	Ubicado en el departamento de Antioquia dentro del municipio de Necocli aprovecha los residuos forestales de la región para la tecnología de gasificación con el objetivo de proveer energía a las familias ubicadas en la zona, actualmente 50 son las beneficiadas.

Fuente: COLOMBIA, U. NACIONAL, IPSE, MME. Centro de innovación tecnológica con énfasis en gasificación; Modificado por el autor.

## 1.2 BIOMASA

Todo organismo que utilice la energía del sol para su vitalidad y se descomponga naturalmente por los diferentes procesos biológicos es llamado biomasa<sup>9</sup>. Puede servir como recurso energético renovable por que hay un balance de emisiones por lo tanto no aumenta la cantidad de gases de efecto invernadero, ver Figura 1, las emisiones de gases generadas en la combustión para producir energía son absorbidas por los organismos vegetales en crecimiento que posteriormente serán utilizados para volverlos a quemar<sup>10</sup>.

Figura 1. Balance de CO2 de la biomasa



Fuente: ERENOVABLE. Energía de biomasa. Disponible en <<http://erenovable.com/energia-de-biomasa/>>.

<sup>9</sup> GIL GARCÍA, Energías del siglo XXI. Op. cit., p.353 – 356.

<sup>10</sup> COORDINACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES, DIRECCIÓN NACIONAL DE PROMOCIÓN y SUBSECRETARIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA. Energías renovables: Energía Biomasa. Argentina: Secretaría de Energía, 2008. p. 5,6.

1.2.1 Clasificación de biomasa. La clasificación de biomasa depende de las formas en que se pueden hallar en el mundo, como se observa en el cuadro 4. Resalta en color la biomasa de interés tanto para el grupo de investigación como para la realización del presente proyecto, la biomasa residual agrícola se encuentra en gran parte del territorio nacional, ya que Colombia un país productor.

- Biomasa primordial o natural. A este grupo pertenece todo ser que reciba y aproveche la energía radiante del sol directa o indirectamente para la subsistencia en el planeta. La podemos subdividir en:
  - *Biomasa Primaria*, grupo en el que pertenece básicamente la vegetación, llamados seres productores o autótrofos.
  - *Biomasa Secundaria*, está ligada a las especies consumidoras de primer orden que utilizan los seres de la categoría primaria para la supervivencia, por lo tanto requieren de materia orgánica ya formada.
  - *Biomasa Terciaria*, animal en estado de putrefacción y animal que se alimentan de ello u otros animales<sup>11</sup>
- Biomasa residual. Todos los desechos biodegradables que son producidos por los seres de la clasificación de biomasa primordial o natural. Gran proporción de los residuos no tienen un valor económico significativo en la sociedad. Los desechos pueden ser de origen agrícola, forestal, urbano entre otros.<sup>12</sup>
- Biomasa energética. Son siembras cuyo único objetivo es ser administradas para la generación de combustibles, no tienen como fin la alimentación para los seres humanos. Conocidos como cultivos energéticos.<sup>13</sup>

Cuadro 4. Clasificación de biomasa

Biomasa primordial	Primaria	Reino vegetal en tierra y marino, Arboles, helechos, algas, micro algas, algunas bacterias
	Secundaria	Los animales herbívoros, algunos hongos y bacterias, peces, aves, ratones, venados, abejas, hormigas, mariposas, etc.
	Terciaria	Animales carnívoros, carroñeros, organismos desintegradores, lobos marinos, el puma, araña, libélula, gallinazo, el cóndor, hongos y bacterias, entre otros.

<sup>11</sup> SALINAS CALLEJAS, Edmar y GASCA QUEZADA, Victor. Los biocombustibles. México: El cotidiano/Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal Redalyc, 2009. Vols. 24, No. 157. p.76.

<sup>12</sup> SEOÁNEZ CALVO, Mariano. Tratado de la biomasa: con especial incidencia sobre la biomasa como fuente energética. España: McGraw-Hill España, 2013. p. 11, 12, 13, 24,25.

<sup>13</sup> SALINAS CALLEJAS, Edmar y GASCA QUEZADA, Victor, Op. cit.

Cuadro 4. (Continuación).

Biomasa residual	Acuícolas	Residuos de las explotaciones piscícolas, residuos de las industrias de transformación
	Agrícolas	Residuos de cultivos de cereal, residuos de cultivos leñosos, residuos de industrias agrícolas, cascara, bagazo, semillas
	Forestales	Restos de corta, restos de preparación de pies maderables, restos de labores selvícolas, restos de la industria forestales
	Ganadero	Purines, excretas, estiércol, residuos de las industrias ganaderas
	Urbanos	Lodos de depuradora, fracción orgánica de los residuos urbanos, residuos de comida, papel, cartón, heces, orina
Biomasa energética	Plantas para la fermentación en etanol, cultivos forestales, cultivos de maíz, cultivos de caña de azúcar, cultivos de semillas que son muy ricas en aceite	

Fuente: Apuntes tomados del pie de página <sup>(12 y 13)</sup>; modificado por el autor

1.2.2 Procesos de conversión de biomasa. Existen distintos procesos de conversión, con el propósito de sustraer la mayor cantidad de energía contenida en la biomasa. En la figura 2 se ordenan los procesos de conversión con sus productos a obtener dependiendo del porcentaje de humedad comprendido en la biomasa energética.

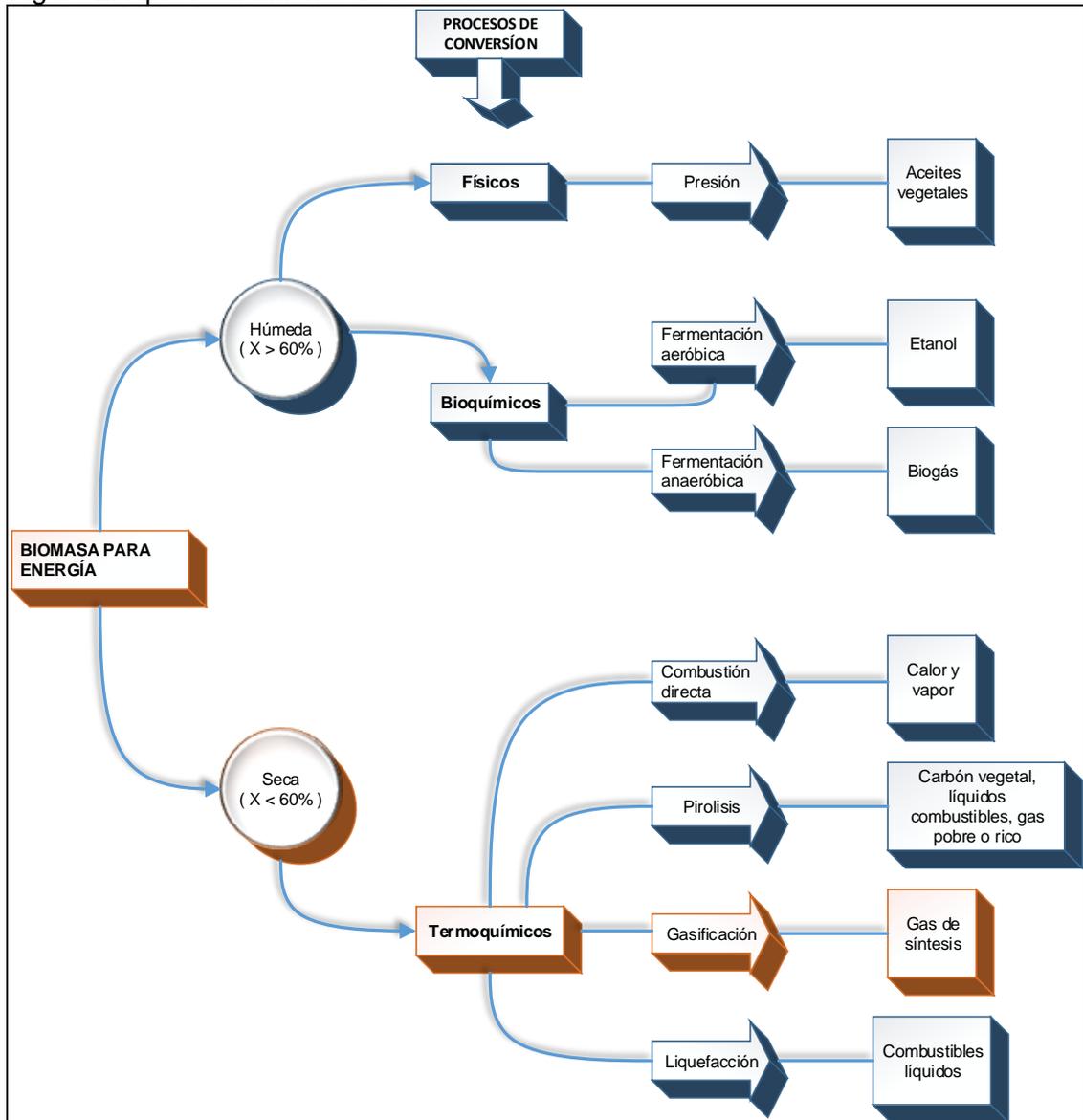
- Físicos. Se utilizan biomasa con un contenido de humedad mayor al 60%, obteniendo productos como aceite vegetal para que después pueda servir como base en la producción de combustibles o simplemente de uso directo. Este proceso se realiza mediante procesos mecánicos de prensado.<sup>14</sup>
- Bioquímicos. La fermentación es clave del proceso y se realiza por medio de microorganismos, la materia prima son los residuos con un alto contenido de humedad como los lignocelulósicos y desechos de animales. El proceso se clasifica en anaeróbica y aeróbica.
  - *Fermentación Anaeróbica*, el principal producto a obtener es biogás (metano y dióxido de carbono). Se lleva a cabo en un equipo llamado digestor donde las bacterias transforman la biomasa en ausencia de oxígeno.<sup>15</sup>
  - *Fermentación Aeróbica*, el proceso se realiza en presencia de oxígeno, contiene varios pasos, trituración de la biomasa luego pasa a fermentación culminando en la etapa de destilación donde se extrae el principal producto que es el etanol<sup>16</sup>.

<sup>14</sup> COORDINACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES, DIRECCIÓN NACIONAL DE PROMOCIÓN Y SUBSECRETARIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA. Op. cit. p. 9,10.

<sup>15</sup> DOMÍNGUEZ GÓMEZ. Energías alternativas, Op. cit., p. 36,37.

<sup>16</sup> *Ibíd.*

Figura 2. Aprovechamiento de la biomasa



Fuente: ARGENTINA, COORDINACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES, DIRECCIÓN NACIONAL DE PROMOCIÓN, SUBSECRETARÍA DE ENERGÍA ELÉCTRICA. Energías renovables: Energía Biomasa; Modificado por el autor.

- Termoquímicos. Se caracterizan por las reacciones químicas en presencia de energía calórica, a continuación se mencionan los procesos existentes.
- *Combustión directa*, es aprovechado en la cocción de alimentos o para calefacción del hogar. La quema de la biomasa se realiza sin obstrucción alguna de oxígeno y los equipos utilizados van desde un fogón abierto hasta calderas<sup>17</sup>

<sup>17</sup> *Ibíd.* p. 34.

- *Pirolisis*, los productos obtenidos son el carbón, compuestos gaseosos, líquidos combustibles. La materia prima sufre un proceso de desintegración debido al cambio de temperatura en ausencia de oxígeno, la temperatura va desde los 650K hasta los 800K<sup>18</sup>.
- *Gasificación*, En la sección correspondiente se amplía la información acerca del proceso de gasificación...véase el numeral 1.3...
- *Licuefacción*, proceso en estado de investigación y desarrollo. Utiliza compresión y expansión, mezclado con bajos niveles de calor para que los gases se transformen en líquidos combustibles. Producción difícil de generar porque utiliza diferentes variables.<sup>19</sup>

1.2.3 Características de la biomasa. Es necesario caracterizar los diversos tipos de biomasa, para establecer el potencial de las mismas y realizar una clasificación para determinar el proceso de aprovechamiento, los análisis empleados son:

- **Análisis próximo.** El análisis identifica que cantidad de carbono permanece sin reaccionar durante el calentamiento, y cuanto se trasforma en producto volátil. Además da información del poder calorífico, humedad y cenizas<sup>20</sup>.
- *Humedad*, es la cantidad de agua que tiene el residuo de biomasa. Hallada por la norma ASTM D3173, donde el material orgánico se eleva a una temperatura de 110°C y se mide la pérdida de peso en relación con el tiempo<sup>21</sup>
- *Poder calorífico*, es la energía generada por el residuo en la combustión. El poder calorífico puede ser:

Inferior (PCI) la energía desarrollada en la combustión gasta parte de ello para cambiar el agua producida, en vapor.

Superior (PCS) es la máxima energía desarrollada en el proceso de combustión y el agua producida sale del equipo en estado líquido<sup>22</sup>.

La ecuación 1 y 2 permiten realizar un cálculo teórico del poder calorífico según los resultados del análisis último

---

<sup>18</sup> *Ibíd.* p. 35.

<sup>19</sup> COORDINACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES, DIRECCIÓN NACIONAL DE PROMOCIÓN y SUBSECRETARIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA. *Op. cit.* p.7, 8.

<sup>20</sup> ARENAS CASTIBLANCO, Erika. LONDONO, Carlos. CHEJNE, Farid. *Biomasa y Carbón: Una alternativa energética para Colombia.* Colombia: Gerencia Creativa, 2006. p. 7.

<sup>21</sup> *Ibíd.*

<sup>22</sup> *Ibíd.* p. 9, 10.

Ecuación 1. Formula de Dulong poder calorífico inferior

$$PCI = PCS - 5.85 \left( 9 \times \frac{\%H}{100} + \frac{\%Humedad}{100} \right) \left\{ \frac{Kcal}{Kg} \right\}$$

Ecuación 2. Formula de Dulong poder calorífico superior

$$PCS = 80.8[\%C] + 344 \left[ \%H - \frac{\%O}{8} \right] + 22.2[\%S] \left\{ \frac{Kcal}{Kg} \right\}$$

- *Material volátil*, son los gases obtenidos en la alteración del material a determinadas temperaturas, la obtención del porcentaje se realiza bajo la norma ASTM D3175-89<sup>23</sup>.
- *Cenizas*, el residuo tiene minerales e impurezas que no inflama, es decir, que no produce combustión con ningún elemento reaccionante, se determinan mediante la norma ASTM D3174-93<sup>24</sup>.
- *Carbono fijo*, producto hallado en el carbonizado que no reacciona en la combustión, se puede hallar de manera teórica restando las cenizas al material volátil, una vez determinada<sup>25</sup>.
- Análisis último. Este tipo de diagnóstico permite obtener información de elementos como el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, carbono, azufre contenidos en la biomasa residual, en porcentaje en peso. Estos datos ayudan a visualizar los requerimientos para realizar una combustión óptima en el proceso de gasificación<sup>26</sup>.

### 1.3 GASIFICACIÓN

La gasificación consiste en conseguir gas combustible llevando un material sólido orgánico carbonoso a grandes temperaturas (700°C – 1000°C)<sup>27</sup> haciéndolo reaccionar con oxígeno controlado u otros agentes oxidantes, el combustible obtenido es fácil de transportar a cortas distancias y se puede utilizar en equipos como calderas, motores de combustión, hornos, turbinas<sup>28</sup>. Para obtener gas de síntesis el material sólido tiene que pasar por unos subprocesos como lo muestra la figura 3.

---

<sup>23</sup> *Ibíd.* p. 8.

<sup>24</sup> *Ibíd.*

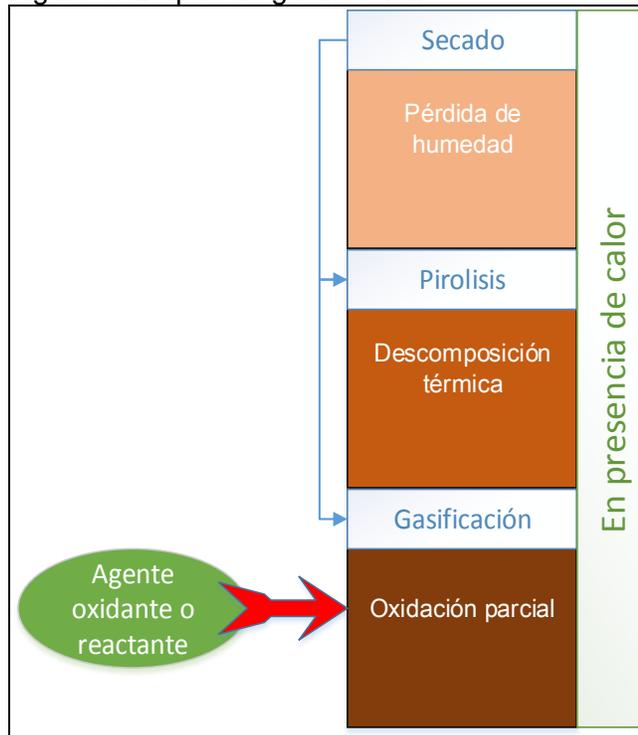
<sup>25</sup> *Ibíd.* p. 9.

<sup>26</sup> *Ibíd.* p. 10.

<sup>27</sup> SOLAR TECHNICAL INFORMATION PROGRAM. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. 1988. p. 25.

<sup>28</sup> U. NACIONAL, U. PONTIFICIA BOLIVARIANA, COLCIENCIAS, SENA. , Op. cit., p. 15.

Figura 3. Etapas de gasificación



Fuente: CASTELLS, Elías. VELO, Enric. La gasificación; Modificado por el autor.

- *Secado*, es la primera etapa con la que se enfrenta el sólido orgánico, se eleva la temperatura aproximadamente hasta los 300°C, cuyo propósito es bajar en gran medida el contenido de humedad por medio de la evaporación<sup>29</sup>.
- *Pirolisis*, en esta etapa el sólido orgánico se va desintegrando a temperaturas entre 300°C a 500°C sin que el agente oxidante entre al gasificador, el objetivo principal es que aparezcan los componentes volátiles además se produce el carbón y altas concentraciones de alquitrán, entre los 500°C y los 700°C se sigue produciendo gas pero en bajas cantidades, aquí el sólido ha perdido aproximadamente el 70% del peso<sup>30</sup>
- *Gasificación*, en este punto los productos generados por la pirolisis son estimulados por agentes oxidantes.

Los elementos volátiles y el sólido carbonoso son estimulados parcialmente con el oxígeno hasta que se agota, este tipo de reacciones son de tipo exotérmicas, allí

<sup>29</sup> CASTELLS, Elías. VELO, Enric. La gasificación. España: Ediciones Díaz de Santos, 2012. p. 420.

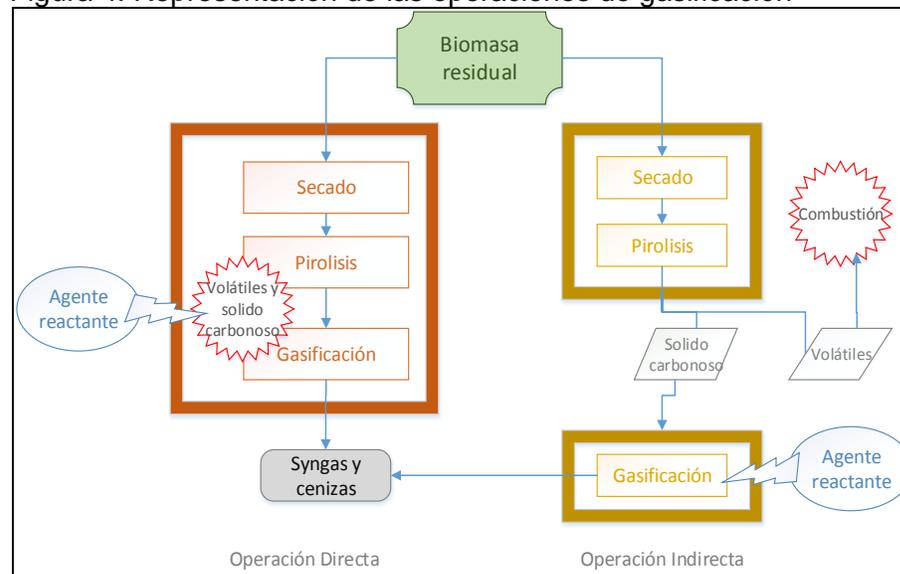
<sup>30</sup> RAJVANSHI, Anil. Biomass gasification. [ed.] Yogi Goswami. Alternative energy in agriculture. Maharashtra, 1986. Vol. II, Cap 4. p. 5, 6.

generan una temperatura elevada para proceder a las reacciones de gasificación, se puede decir que hay un proceso de combustión<sup>31</sup>

Luego de que gran parte del oxígeno se ha consumido, los gases obtenidos en la combustión reaccionan entre sí y con el residuo sólido carbonoso, este tipo de reacciones son de tipo endotérmicas, lo que da como resultado una reducción en la temperatura. Este subproceso de gasificación genera el gas de síntesis teniendo como componente importante el dióxido de carbono<sup>32</sup>.

1.3.1 Operaciones de gasificación. El proceso de gasificación termoquímica se puede realizar de dos formas dependiendo de los subprocesos que ocurren en la transformación del sólido orgánico a gas de síntesis, observe la figura 4.

Figura 4. Representación de las operaciones de gasificación



Fuente: RINCÓN, Sonia. *Et all.* Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados; Modificado por el autor.

- *Operación indirecta*, en este modo de obtener gas de síntesis, los subprocesos de la gasificación ocurren en dos reactores, en donde el primer reactor se encarga de realizar el secado y la pirolisis de la biomasa residual, los elementos volátiles obtenidos de este primer paso se pueden utilizar como combustible y la biomasa ya carbonizada se conduce al segundo reactor para que reaccione con el agente oxidante hasta conseguir el gas de síntesis<sup>33</sup>.

<sup>31</sup> TREVIÑO, Manuel. Tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC. España: Club español de la energía, ELCOGAS S.A., 2006. p. 12, 13.

<sup>32</sup> *Ibíd.*

<sup>33</sup> RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados. Kassel: Kassel University Press, 2011. P 12

- *Operación directa*, este estilo es sencillo por que los subprocesos de gasificación (secado, pirolisis, gasificación) se realizan en un solo equipo, el sólido residual es calentado hasta que se desprenden los volátiles y se carboniza entonces reaccionan con el agente oxidante para generar el gas de síntesis<sup>34</sup>.

1.3.2 Parámetros de operación en la gasificación. Para el desarrollo del proceso de gasificación hay que mencionar las principales variables que perturban la operación.

1.3.2.1 Agente oxidante. Es el elemento que reacciona con los volátiles generados y el sólido carbonoso, dependiendo cual sea el agente cambian las características del gas combustible obtenido, a continuación se mencionan los principales oxidantes del proceso.

- El *aire* como agente oxidante resulta económico hoy día es muy utilizado en el proceso termoquímico por costos ya que es un recurso que es de fácil acceso, sin embargo da un gas de síntesis de baja calidad con un poder calorífico entre (3 a 6 MJ/Nm<sup>3</sup>) y la mitad del mismo es nitrógeno<sup>35</sup>.
- Utilizando *oxígeno* se obtiene un gas combustible con un poder calorífico entre (10 a 15 MJ/Nm<sup>3</sup>), hay que tener en cuenta que con este recurso ocurre una reacción de combustión total razón por la cual hay que monitorear, medir y controlar la velocidad de las reacciones para que el sólido carbonoso no se agote antes de entrar a la reacción<sup>36</sup>.
- El *hidrógeno* es el mejor agente oxidante llegando a obtener hasta los (40 MJ/Nm<sup>3</sup>) de poder calorífico en el gas de síntesis, logrando una posible sustitución al gas natural, el proceso de gasificación con hidrógeno es posible a grandes presiones y en ocasiones que se necesiten extrema pureza. El hidrógeno es el mejor combustible que existe y utilizarlo como agente gasificante para obtener gas de síntesis que luego se use para la producción de energía es bajar el rendimiento del hidrógeno, lo cual no es viable realizarlo<sup>37</sup>.

1.3.2.2 Temperatura. La temperatura es importante para que el proceso se lleve a cabo, la temperatura al final del subproceso gasificación es invariable esto hace que se mantenga un rango de temperatura, es decir, no hay caídas de magnitud considerables, se mantiene así hasta que el sólido carbonoso se convierta en cenizas, además con la temperatura se puede identificar que subproceso se está llevando a cabo (secado, pirolisis, gasificación)<sup>38</sup>.

---

<sup>34</sup> *Ibíd.*

<sup>35</sup> *Ibíd.* p. 18, 20.

<sup>36</sup> *Ibíd.*

<sup>37</sup> *Ibíd.*

<sup>38</sup> RAMÍREZ, Santiago. SIERRA, Fabio. GUERRERO, Carlos. Ingeniería e investigación: Gasificación de materiales orgánicos residuales. Bogotá: U. Nacional, 2011. Vol. 31, No. 3. p 19.

Si se realiza el proceso a bajas temperaturas se corre el riesgo de adquirir metano, alquitranes en cantidades a tener en cuenta, o simplemente las reacciones secundarias no se realizaran por lo que el sólido carbonoso perderá poco peso. En cambio si la temperatura es elevada se encuentra en el gas de síntesis un aumento de hidrogeno y monóxido de carbono, esto quiere decir que hubo más energía para que los contenidos de dióxido de carbono y vapor de agua disminuyeran drásticamente, la desventaja es que se produce gas de síntesis en bajas cantidades y se corre el riesgo de producir demasiada ceniza para que se acumule y tapone vías de funcionamiento en el equipo<sup>39</sup>.

1.3.2.3 Presión. La presión es un parámetro a considerar, medir y evaluar en el proceso termoquímico, sirve para el equilibrio de temperaturas, en el momento en que las reacciones ocurren, también ayuda a que las partículas tengan un mejor contacto entre sí. Se hallan grandes cantidades de alquitrán e hidrocarburos al aumentar la presión en la atmosfera de gasificación, hay una desproporción en los elementos ya que los niveles de monóxido de carbono e hidrogeno disminuyen y el vapor de agua aumenta considerablemente en relación con el dióxido de carbono<sup>40</sup>.

1.3.2.4 Materia prima. Para el proceso de gasificación es adecuado conocer lagunas características de composición del residuo de biomasa y las dimensiones del material por lo que influyen directamente en las reacciones químicas y se podría presagiar el contenido del gas.

Es importante que el residuo de biomasa se encuentre en dimensiones pequeñas y homogéneas; ayuda a que el gas de síntesis obtenga calidad. Hay una distribución de temperatura en la partícula que ayuda a carbonizarse completamente prolongando el tiempo de permanencia favoreciendo el rompimiento de los elementos pesados en las reacciones. Cabe aclarar que si la materia prima sufre una transformación exageradamente pequeña se corre el riesgo a que tuberías de funcionamiento sufran taponamientos o que fluyan en conjunto con las cenizas fuera del equipo con un desfase de tiempo, es decir, antes de tiempo. Sin embargo se manejan diferentes dimensiones de partícula dependiendo del tipo de reactor <sup>41</sup>.

---

<sup>39</sup> RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. Op. cit., p. 20.

<sup>40</sup> *Ibíd.* p. 22.

<sup>41</sup> IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Op. cit., p. 9, 10.

## 2. SELECCIÓN MATERIA PRIMA

El departamento de Cundinamarca dispone de 116 municipios distribuidos en 15 provincias donde se cosecha variedades de cultivos por los diferentes ambientes que se presentan debido al rango de altitud que va entre los 231 a 2931 metros sobre el nivel del mar (municipio Beltrán y Tausa respectivamente)<sup>42</sup>.

De acuerdo con lo anterior y con el propósito de determinar la biomasa residual agrícola más adecuada para un procesos de gasificación, se realizará una selección empleando el método de decisión multicriterio conocido como ponderación lineal (Scoring), el cual consiste en generar un valor a cada criterio en una escala de (1 a 5) siendo la ultima la de mayor importancia, luego las alternativas se califica en una escala de satisfacción de (1 a 9) siendo el mayor número la mejor calificación, después se procede al cálculo de la ponderación ejecutando la ecuación 3, el que obtenga la mejor puntuación será la alternativa recomendada.

Ecuación 3. Calculo de la ponderación lineal Scoring

$$S_j = \sum_i w_i r_{ij}$$

$S_j$ : Score para la alternativa

$w_i$ : Ponderación o peso para cada criterio

$r_{ij}$ : Rating de la alternativa  $j$  en función del criterio  $i$

En la selección del residuo de biomasa primero es necesario conocer y seleccionar los cultivos permanentes y transitorios del departamento de Cundinamarca. Para la selección de los cultivos, se empezó en determinar los criterios con su respectivo peso de ponderación.

- *Área cosechada*, se asigna una ponderación de 5 o muy importante, puesto que es el área de donde se puede recolectar el residuo de cosecha; un área de mayores dimensiones permitirá obtener mayores cantidades de residuo.
- *Producción*, con un peso de 4 o algo importante, porque es la cantidad de producto que se recolecta en el cultivo. Es la materia prima para muchas industrias en el proceso de transformación generan desechos que podrán servir como biomasa.
- *Rendimiento*, con un valor de 2 o poco importante, variable que se obtiene de dividir la producción entre el área cosechada, se realiza para la relación costo-beneficio ayudando al agricultor en la toma de decisión de seguir con el cultivo o cambiarlo.

---

<sup>42</sup> GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA [En línea] Municipios. [Citado del 31 de Agosto de 2015.] Disponible en internet. <[http://www.cundinamarca.gov.co/wps/portal/Home/Cundinamarca.gc/ascundi\\_municipioscontenidos/ccundi\\_municipios+>](http://www.cundinamarca.gov.co/wps/portal/Home/Cundinamarca.gc/ascundi_municipioscontenidos/ccundi_municipios+>)

Se establece la satisfacción de cada criterio para las alternativas como lo muestra el cuadro 5.

Cuadro 5. Rating de satisfacción para selección del cultivo

Área cosechada	<100	Rendimiento	<1	Producción	<100	1-extra bajo
	100 a 300		1 a 3		100 a 500	2-muy bajo
	300 a 600		3 a 6		500 a 1000	3-bajo
	600 a 1000		6 a 9		1000 a 5000	4-poco bajo
	1000 a 2000		9 a 12		5000 a 10000	5-medio
	2000 a 4000		12 a 15		10000 a 25000	6-poco alto
	4000 a 7000		15 a 18		25000 a 50000	7-alto
	7000 a 9000		18 a 21		50000 a 100000	8-muy alto
	>9000		>21		>100000	9-extra alto
	Criterio		[ha]		Criterio	[t/ha]

Una vez establecido el peso de los criterios y la satisfacción de cada criterio para las alternativas (cultivos), se procede a realizar el cálculo de la puntuación siguiendo el ejemplo para cada cultivo que presenta el departamento de Cundinamarca.

Ejemplo: Se obtuvieron los siguientes datos del cultivo de aguacate, área cosechada – 415,9[ha]; producción – 2662,7[t]; rendimiento – 6,4[t/ha]. Los datos fueron adquiridos del documento Estadísticas de Cundinamarca 2011-2013 realizado por la Gobernación de Cundinamarca (véase anexo A)

Se establece el valor del criterio dependiendo de la clasificación del cuadro 6.

Área cosechada (3-bajo) pertenece al rango de (300 a 600) [ha]

Rendimiento (4-poco bajo) pertenece al rango de (6 a 9) [t/ha]

Producción (4-poco bajo) pertenece al rango de (1000 a 5000) [t]

Luego se calcula la puntuación para la alternativa con la ecuación 3.

○ Área cosechada, ○ Rendimiento, ○ Producción

*Peso ponderación*

$$Score = (5 \times 3) + (2 \times 4) + (4 \times 4) = 39$$

*Rating satisfacción*

Este proceso se realiza para los cultivos permanentes así como para los transitorios, en la tabla 1 y 2, se ilustra los puntajes calculados para cada cultivo.

Tabla 1. Calculo del score para cultivos permanentes de Cundinamarca

<b>Ponderación</b>	5	2	4	
<b>Cultivo</b>	<b>Área cosechada</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Producción</b>	<b>Score</b>
Aguacate	3	4	4	39
Anturio	1	9	9	59
Arandalo	1	2	1	13
Aromáticas	1	3	1	15
Bananito	1	1	1	11
Banano	4	2	4	40
Cacao	2	1	2	20
Caducifolios	1	3	2	19
Café	9	2	7	77
Caña panelera	9	5	9	91
Caucho	1	1	1	11
Cidron	1	1	1	11
Cítricos	7	4	7	71
Clavel	1	9	9	59
Curuba	1	4	1	17
Durazno	2	6	4	38
Feijoa	1	2	1	13
Flores y follajes	3	9	9	69
Frambuesa	1	1	1	11
Fresa	3	9	6	57
Frutales varios	1	8	1	25
Granadilla	2	5	4	36
Guanábana	1	7	4	35
Guayaba	3	5	4	41
Gulupa	2	5	4	36
Helecho cuero	1	9	4	39
Heliconia	1	4	2	21
Lima	1	4	3	25
Limón	4	5	5	50
Limonaria	1	5	1	19
Lulo	1	6	3	29
Mandarina	6	4	6	62
Mango	8	5	8	82
Manzana	1	3	1	15
Maracuyá	2	5	4	36
Mora	6	4	7	66
Naranja	5	7	7	67
Palma de aceite	7	7	8	81
Papaya	1	9	2	31

Tabla 1. (Continuación).

<b>Ponderación</b>	5	2	4	
<b>Cultivo</b>	<b>Área cosechada</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Producción</b>	<b>Score</b>
Piña	2	8	4	42
Pitahaya	1	5	2	23
Plátano	7	4	7	71
Romero	1	8	1	25
Rosa	2	9	9	64
Ruda	1	1	1	11
Ruscus	1	9	9	59
Sábila	1	1	1	11
Tomate de árbol	6	8	6	70
Tomillo	1	2	1	13
Uchuva	2	6	4	38
Zapote	1	3	1	15

Fuente

- ECN, Phyllis 2. Database for biomass and waste. [En línea] disponible en internet <<https://www.ecn.nl/phyllis2/>>
- HERNÁNDEZ, Humberto. PRADA, Janneth. et al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 2010.
- RÁMIREZ, Nidia. SILVA, Ángela. et al. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Bogotá : Cenipalma, 2011. Boletín técnico No. 30.
- RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexánder. KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados. Kassel : Kassel University Press, 2011.

Tabla 2. Calculo del score para cultivos transitorios de Cundinamarca

<b>Ponderación</b>	5	2	4	
<b>Cultivo</b>	<b>Área cosechada</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Producción</b>	<b>Score</b>
maíz	9	3	8	63
sorgo	6	2	5	43
frijol	8	3	6	56
cebolla bulbo	6	8	8	58
habichuela	6	6	7	53
tomate	5	7	7	50
pepino cohombro	1	6	4	25
guatila	1	9	2	29
pepino	2	4	4	26
lechuga	6	7	7	55
zanahoria	6	9	8	60
papa	9	8	9	74
brócoli	6	7	7	55
Cebada	2	2	2	20
Papa criolla	6	7	7	55
Coliflor	1	8	4	29

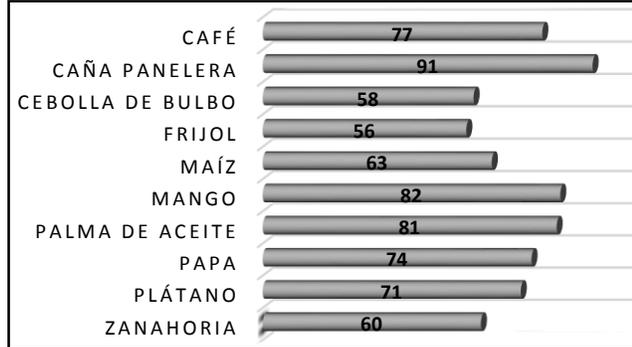
Tabla 2. (Continuación).

<b>Ponderación</b>	5	2	4	
<b>Cultivo</b>	<b>Área cosechada</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Producción</b>	<b>Score</b>
Haba	1	3	2	17
Remolacha	1	7	4	27
Ajo	1	5	2	21
Cilantro	3	4	4	31
Tomate invernadero	3	9	6	43
Ahuyama	4	5	5	39
Arveja	7	4	7	54
Pimentón	2	7	4	32
Trigo	1	2	1	14
Espinaca	3	8	5	40
Calabacín	1	4	2	19
Gladiolo	1	9	9	36
Girasol	2	9	9	41
Perejil	1	6	2	23
Acelga	1	7	3	26
Rábano	1	9	2	29
Repollo	4	9	6	48
Hortalizas	5	5	7	46
Algodón	2	2	2	20
Apio	2	5	4	28
Arroz seco	6	3	5	45
Soya	4	2	4	32
Arroz riego	5	4	5	42
Plantas aromáticas	1	3	2	17
Arracacha	1	3	2	17
Flores	1	9	9	36
Limonaria	1	2	1	14
Albahaca	1	2	1	14
Garbanzo	1	2	1	14
Calabaza	2	7	4	32

Fuente

- ECN, Phyllis 2. Database for biomass and waste. [En línea] disponible en internet <<https://www.ecn.nl/phyllis2/>>
- HERNÁNDEZ, Humberto. PRADA, Janneth. et al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 2010.
- RÁMIREZ, Nidia. SILVA, Ángela. et al. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Bogotá : Cenipalma, 2011. Boletín técnico No. 30.
- RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados. Kassel : Kassel University Press, 2011.

Grafica 1. Cultivos seleccionados



La grafica 1, ilustra cinco cultivos permanentes y cinco cultivos transitorios que poseen la ponderación más elevada, por lo tanto representan la mejor alternativa para proceder con la selección del tipo de residuo que estos cultivos puedan generar.

Los criterios de selección del residuo de biomasa, se determinan teniendo en cuenta los aspectos de gasificación.

- *Potencial energético*, con una ponderación de 3 o importancia media, es un modelo matemático que se le da a los residuos de un cultivo en forma general a lo largo del año sin tener en cuenta los posibles usos que se le pueden dar. El potencial energético se obtiene de multiplicar el poder calorífico con la masa del residuo<sup>43</sup>.
- *Cantidad de residuo*, ponderado en 4 o algo importante, representa un punto clave para la tecnología de gasificación sea sostenible. Igual que el potencial energético existe incertidumbre en la utilidad del residuo.
- *Poder calorífico*, ponderación asignada 5 o muy importante, es la energía que contiene el residuo que se libera en un proceso de combustión.
- *Humedad*, con una ponderación de 5 o muy importante, en el proceso de gasificación es evidente que es un factor influyente para no gastar demasiada energía en secar el residuo. Las técnicas de almacenamiento deben asegurar que el porcentaje no aumentara. Si el residuo posee un porcentaje alto es necesario realizar un proceso antes que ingrese al reactor elevando los costos de aprovechamiento<sup>44</sup>.

<sup>43</sup> HERNÁNDEZ, Humberto. PRADA, Janneth. et al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 2010.p 150

<sup>44</sup> Ibíd. p. 135.

- *Cenizas*, ponderado en 5 – muy importante, corresponde a los componentes que no generan reacción entonces se traduce en desecho generado del proceso de gasificación que puede aglomerar y erosionar los ductos del equipo si no se realiza un debido mantenimiento<sup>45</sup>.
- *Material volátil*, ponderación asignada 5 o muy importante, es la cantidad de gases producidos por el residuo al tratarlo en elevadas temperatura para posteriormente hacerlos interactuar con los componentes del agente reactante<sup>46</sup>.
- *Azufre y Nitrógeno*, con una ponderación de 3 o importancia media, estos componentes generan desechos nocivos cuando ocurren las reacciones de gasificación. La biomasa tiene la característica de tener niveles bajos de nitrógeno y azufre.
- *Disponibilidad*, ponderado en 4 o hace referencia al uso y disposición que se le da actualmente a cada uno de los residuos, es posible que sean materia prima de algunos procesos industriales, también puede ser utilizado en la misma área productora como un posible abono orgánico, alimento para ganado, o simplemente depositado en rellenos sanitarios.
- *Homogeneidad*, ponderación asignada 3 o importancia media, corresponde a las dimensiones físicas (tamaño) en el que se encuentra el residuo para ser gasificado. A la mayoría de residuos se les realizan un proceso de transformación física antes de ingresar al reactor.

Se establece la satisfacción de cada criterio para las alternativas como lo muestra el cuadro 6.

Cuadro 6. Rating de satisfacción para selección de biomasa residual

Potencial energético [TJ/año]	Cantidad de residuo [t/año]	Poder calorífico [MJ/kg]	Humedad [% en peso]	Cenizas [% en peso]	Rating de satisfacción
<100	<100	<10	>80	>15	1-extra bajo
100a300	100a1000	10a14	60a80	10a15	2-muy bajo
300a600	1000a5000	14a16	50a60	7a10	3-bajo
600a1000	5000a10000	16a17	0a10	5a7	4-poco bajo
1000a2000	10000a50000	17a18	40a50	3a5	5-medio
2000a4000	50000a100000	18a20	30a40	2a3	6-poco alto
4000a7000	100000a500000	20a40	20a30	1a2	7-alto
7000a9000	500000a1000000	40a45	15a20	0.5a2	8-muy alto
>9000	>1000000	>45	10a15	<0.5	9-extra alto

<sup>45</sup> IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Op. cit., p. 10.

<sup>46</sup> ARENAS CASTIBLANCO, Erika. LONDONO, Carlos. CHEJNE, Farid. Biomasa y Carbón, Op. cit., p. 8.

Cuadro 6. (Continuación).

Material volátil [% en peso]	Azufre [% en peso]	Nitrógeno [% en peso]	Rating de satisfacción	Disponibilidad	Homogeneidad
<20	>1	>1.5	1-extra bajo	1 - Uso total	1 - Dos o más procesos
20a40	0.6a1	1.2a1.5	2-muy bajo	2 - Alto uso	
40a60	0.3a0.6	1a1.2	3-bajo		
60a70	0.1a0.3	0.8a1	4-poco bajo	3 - Uso medio	2 - Un proceso
70a75	0.08a0.1	0.6a0.8	5-medio		
75a80	0.04a0.08	0.4a0.6	6-poco alto	4 - Poco uso	3 - Ningún proceso
80a85	0.02a0.04	0.2a0.4	7-alto		
85a90	0.01a0.02	0.1a0.2	8-muy alto	5 - Sin uso	
>90	<0.01	<0.1	9-extra alto		

Una vez establecido el peso de los criterios y la satisfacción de cada criterio para las alternativas (residuo de los cultivos seleccionados), se procede a realizar el cálculo del puntaje siguiendo el ejemplo, para cada tipo de residuo que se presentan en el cultivo.

Ejemplo: En el cultivo de caña panelera se obtuvieron los siguientes datos del bagazo, potencial energético – 13563.8 [TJ/año], cantidad de residuo – 1591993[t/año], poder calorífico – 18.72 [MJ/kg], humedad – 46[% en peso], cenizas – 12.38 [% en peso], material volátil – 88.29 [% en peso], azufre – 0.06 [% en peso], nitrógeno – 0.26 [% en peso], un porcentaje es utilizado como combustible en hornos, otro porcentaje sirve para la fabricación de papel y otra cantidad es destinada para alimentar animales entonces la satisfacción de disponibilidad es un 2 – alto uso, las dimensiones del bagazo de caña generalmente son pequeñas sin embargo hay excepciones, se necesitara un proceso físico que reduzca el bagazo a partículas homogéneas y por sus características no sería necesario un secado previo, entonces la satisfacción es un 2 – procesos de intervención uno. Los datos fueron adquiridos de diferente fuente (véase anexo b). Se establece el valor de cada criterio para el residuo del cultivo, dependiendo de la satisfacción del cuadro 6.

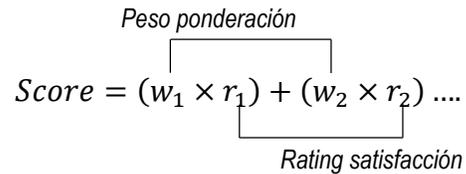
**Potencial energético** (9-extra alto) pertenece al rango (>9000) [TJ/año]  
**Cantidad de residuo** (9-extra alto) pertenece al rango (>1000000) [t/año]  
**Poder calorífico** (6-poco alto) pertenece al rango (18a20) [MJ/kg]  
**Humedad** (5-medio) pertenece al rango (40a50) [% en peso]  
**Cenizas** (2-muy bajo) pertenece al rango (10a15) [% en peso]  
**Material volátil** (8-muy alto) pertenece al rango (85a90) [% en peso]  
**Azufre** (6-poco alto) pertenece al rango (0.04a0.08) [% en peso]  
**Nitrógeno** (7-alto) pertenece al rango (0.2a0.4) [% en peso]  
**Disponibilidad** (2 – ato uso)  
**Homogeneidad** (2 – un proceso)

Luego se calcula el score para el bagazo de caña panelera, con la ecuación 3.

$$Score = (3 \times 9) + (4 \times 9) + (5 \times 6) + (5 \times 5) + (5 \times 2) + (5 \times 8) + (3 \times 6) + (3 \times 7) + (4 \times 2) + (3 \times 2) = 221$$

Donde

$$Score = (w_1 \times r_1) + (w_2 \times r_2) \dots$$



El cálculo de la puntuación se realizó para los cultivos con la información suficiente y que son aprovechables para la transformación de energía vía gasificación. El cisco de café, así como, las hojas y el bagazo de la caña panelera, son los residuos de biomasa que obtienen el mayor puntaje representando la mejor alternativa para el desarrollo del proyecto como lo muestra la tabla 3, sin embargo no hay que descartar los otros residuos ya que servirán de estudio a futuro.

Tabla 3. Calculo del score para los residuos de biomasa

CRITERIOS	PONDERADO	CAFÉ		CAÑA PANELERA			CEBOLLA	FRIJOL		MAIZ			MANGO			PALMA ACEITE		
		PULPA	CISCO	BAGAZO	HOJAS	RAC	CASCARA	PLANTA	PAJA	RASTROJO	VAINA	CASCARA	CASCARA	PEPA	MADERA	CUESCO	FIBRA	RACIMOS
Potencial energético	3	5	5	9	9	9	3	5	5	4	4	4	1	1	1	2	2	2
Cantidad de residuo	4	7	7	9	9	9	5	6	6	6	6	6	3	3	3	5	5	5
Poder calorífico	5	5	6	6	4	3	2	1	4	3	3	4	1	1	5	4	5	4
Humedad	5	6	9	5	6	6	9	1	4	4	4	4	2	3	7	9	4	9
Cenizas	5	8	7	2	3	2	2	6	4	1	6	7	7	7	6	7	4	5
Material volátil	5	5	7	8	7	7	6	1	6	4	5	6	1	0	8	6	6	7
Azufre	3	3	6	6	5	4	4	7	8	5	5	4	7	6	5	6	5	6
Nitrógeno	3	3	5	7	7	5	6	6	4	5	6	3	7	6	7	7	3	6
Disponibilidad	4	3	2	2	3	2	4	4	4	2	1	3	2	3	4	2	2	3
Homogeneidad	3	2	3	2	2	2	3	1	2	2	2	1	1	1	2	3	3	2
<b>SCORE</b>		199	238	221	217	194	179	142	187	140	169	177	123	121	203	212	162	205

Fuente

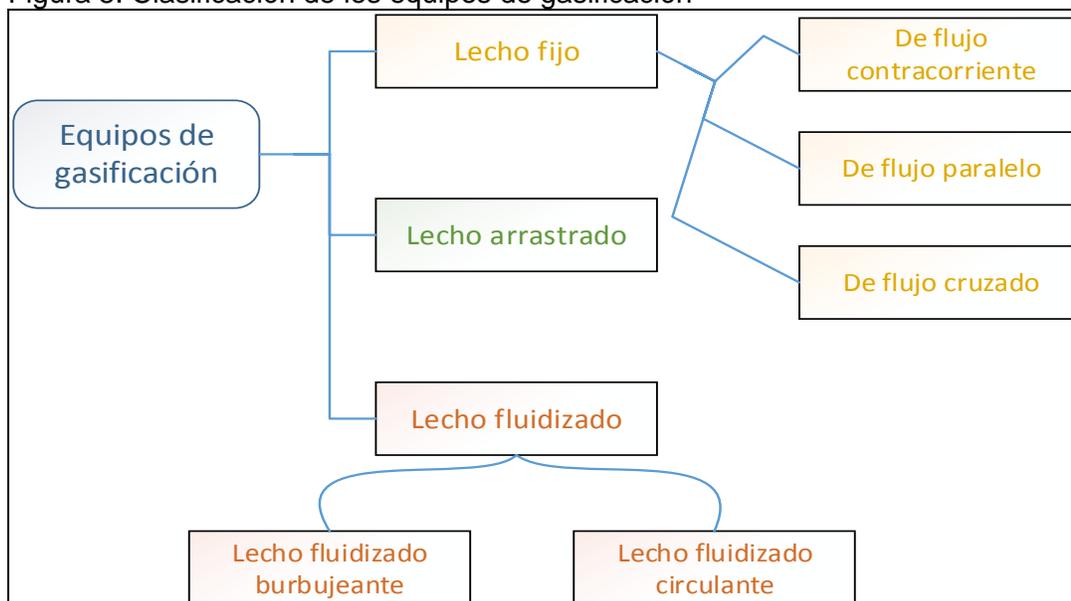
- ECN, Phyllis 2. Database for biomass and waste. [En línea] disponible en internet <<https://www.ecn.nl/phyllis2/>>
- HERNÁNDEZ, Humberto. PRADA, Janneth. et al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 2010.
- RÁMIREZ, Nidia. SILVA, Ángela. et al. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Bogotá : Cenipalma, 2011. Boletín técnico No. 30.
- RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexánder. KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados. Kassel : Kassel University Press, 2011.

### 3. ALTERNATIVA DE GASIFICACIÓN

#### 3.1 EQUIPOS DE GASIFICACIÓN

Los reactores para gasificación se pueden diferenciar por el tipo de lecho en que funcionan y también por la interacción de flujos que hay entre el agente oxidante y la materia prima<sup>47</sup>, la figura 5 presenta los principales equipos existentes para la gasificación de biomasa.

Figura 5. Clasificación de los equipos de gasificación



Fuente: ARENAS, Erika. LONDONO, Carlos. CHEJNE, Farid. Biomasa y Carbón: Una alternativa energética para Colombia; Modificado por el autor.

3.1.1 Lecho fijo. Los reactores de lecho fijo pueden ser alimentados de manera continua (lecho móvil) o por lotes de biomasa residual (lecho fijo). Se caracterizan en formar una cámara de residuo sólido, donde avanza hacia la parte inferior a medida que ocurren las reacciones<sup>48</sup>.

Los equipos de lecho fijo son apropiados para pequeña escala y son los más simples que existen, pueden ser operados por aire forzado o aire succionado<sup>49</sup>, el tiempo de residencia de la biomasa es alto (15min a 60min)<sup>50</sup>, por lo general las dimensiones de la biomasa es gruesa (15mm a 30mm)<sup>51</sup>, es indicado para biomasa o residuos que tienden a ser difícilmente pulverizables.

<sup>47</sup> TREVIÑO, Manuel. Tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC, Op. cit., p. 14.

<sup>48</sup> RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. Op. cit., p. 22.

<sup>49</sup> ARENAS CASTIBLANCO, Erika. LONDONO, Carlos. CHEJNE, Farid. Biomasa y Carbón, Op. cit., p. 16.

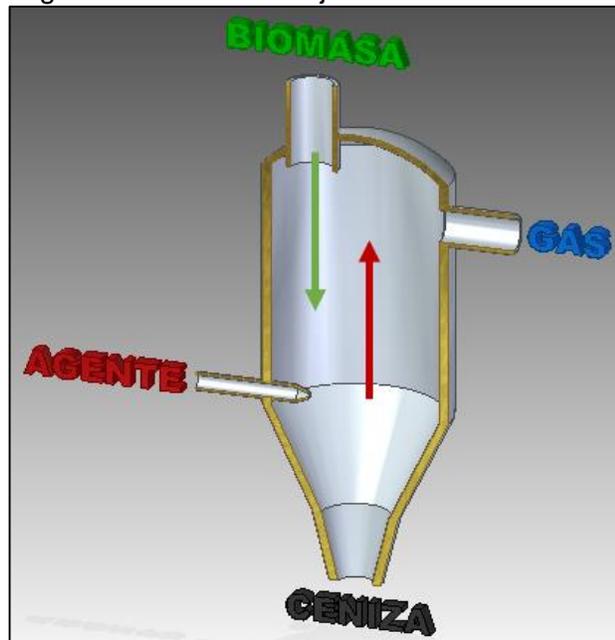
<sup>50</sup> TREVIÑO, Manuel. Op. cit., p. 32.

<sup>51</sup> Ibid.

Se clasifican según la dirección en que entra el residuo de biomasa y el flujo del agente reactante al gasificador<sup>52</sup>, en:

3.1.1.1 De flujo contracorriente. Conocido como reactor de flujo ascendente o como *gasifier updraft*. El residuo de biomasa ingresa al reactor por la parte superior se realiza el contra flujo cuando el agente oxidante entra por la parte inferior, en este tipo de reactor se entrega el gas de síntesis por la parte superior del equipo como lo muestra la figura 6.

Figura 6. Reactor de flujo contracorriente



A continuación se mencionan las características en el cuadro 7, del gasificador de lecho fijo de flujo contracorriente.

Cuadro 7. Aspectos del equipo en contracorriente

Puede funcionar con biomasa que tengan porcentajes de alta humedad, bueno para utilizarlo si se desea producir gas combustible para un horno, secador, quemador.
El gas de síntesis no es aconsejable para el uso de motores de combustión debido al porcentaje de alquitranes (5% a 20%).
Las biomásas con bajo contenido de carbón, cenizo y volátil se manejan bien en el reactor ascendente: Para las biomásas que tienen altos volátiles, este equipo es poco prácticos.

<sup>52</sup> Ibíd, p. 18.

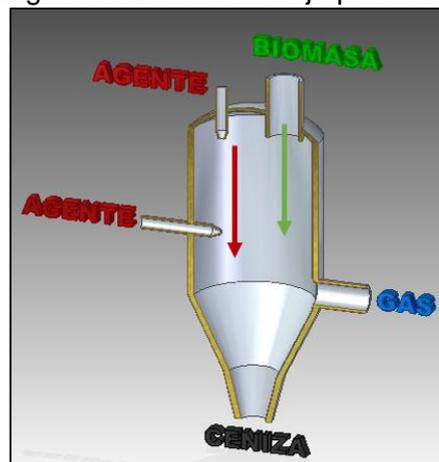
Cuadro 7. (Continuación).

En la puesta en marcha se gasta un tiempo largo debido a la gran masa térmica en cuestión.
El aire entra a altas temperaturas a reaccionar con la biomasa en descomposición esto puede producir desprendimiento de partículas de la rejilla o la destrucción completa, para manejar la temperatura de la rejilla se mezcla el aire con un poco de dióxido de carbono o vapor de agua.
Casi nada de la energía calórica se pierde ya que una parte de calor ayuda a secar la biomasa húmeda entrante.
Tiene una pequeña caída de presión
Buena eficiencia térmica
Tiende a formar contenidos bajos de escoria
Es pobre en la capacidad de reacción con grandes cargas de agente oxidante.
En la zona de combustión alcanza temperaturas cerca de los 1000°C
En gasificadores de gran escala son operados en modo de formación de escoria, es decir, la ceniza se funde en un hogar.
La temperatura en la que se entrega el gas de síntesis es de alrededor de los 300°C

Fuente: Apuntes tomados del pie de página<sup>53, 54, 55</sup>; modificado por el autor.

3.1.1.2 De flujo paralelo. Conocido también como reactor de flujo descendente en inglés como *gasifier downdraft*, el residuo de biomasa ingresa al reactor por la parte superior se realiza el flujo paralelo cuando el agente oxidante entra por la parte superior o intermedia del reactor, el gas de síntesis se entrega por la parte inferior del equipo como lo muestra la figura 7.

Figura 7. Reactor de flujo paralelo



<sup>53</sup> SOLAR TECHNICAL INFORMATION PROGRAM. Op. cit., p. 32-43.

<sup>54</sup> RAJVANSHI, Anil. Op. cit., p. 3-15.

<sup>55</sup> ARENAS CASTIBLANCO, Erika. LONDONO, Carlos. CHEJNE, Farid. Op. cit., p. 16-41.

A continuación se mencionan las características del gasificador de lecho fijo de flujo paralelo, en el cuadro 8:

Cuadro 8. Aspectos del equipo en paralelo

Se puede utilizar el gas producto para los motores de combustión, en la fabricación de metanol, amoniaco, hidrogeno.
Equipo desarrollado para aprovechar biomazas con un alto contenido de cenizas.
Bajo contenido de alquitrán, en el reactor se genera una llama en la zona de gasificación en el momento que entra el agente oxidante esto hace que se consuma el 99% de alquitranes y forme gran cantidad de gas combustible.
Entre el reactor contracorriente y el cruzado es el intermedio respecto en el tiempo de puesta en marcha y la respuesta de reacción.
Para una fácil alimentación de biomasa por gravedad es aconsejable que este de manera uniforme
Baja eficiencia térmica
Tiende a formar contenidos bajos de ceniza en el combustible
No es usual utilizar tamaños de biomasa muy pequeños.
Utiliza materiales simples de construcción, fácil de fabricar lo que lo hace relativamente barato.
La temperatura en la que se entrega el gas de síntesis es de alrededor de los 900°C a 1000°C
Se requiere que la humedad de la biomasa sea baja (menor del 30%).

Fuente: Apuntes tomados del pie de página <sup>54, 55, 56</sup>; modificado por el autor.

3.1.1.3 De flujo cruzado. Conocido también como reactor de flujo transversal en inglés como *gasifier crossdraft*, el residuo de biomasa ingresa al reactor por la parte superior se realiza el flujo cruzado cuando el agente oxidante entra directamente en la zona de gasificación por la misma zona se entrega el gas de síntesis como lo muestra la figura 8. En el cuadro 9, se mencionan las características del gasificador de lecho fijo de flujo cruzado:

Cuadro 9. Aspectos del equipo en cruzado

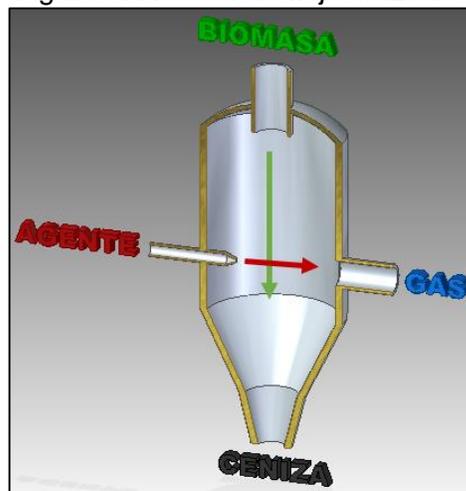
Contenido de alquitrán en al gas medio.
Temperaturas elevadas en el reactor.
Se puede utilizar el gas producto para los motores de combustión.
Las cenizas y la biomasa sirven con aisladores para las paredes del equipo permitiendo variedades de materiales a la hora de construirlo como el acero dulce excepto para las boquillas y rejillas.
Debido a las elevadas temperaturas se requiere que los contenidos de ceniza en la biomasa sean bajos con el objetivo de evitar taponamientos.

Cuadro 9. (Continuación).

Por las temperaturas casi que es obligatorio que las boquillas tengan un sistema de refrigeración ya sea por aire o agua.
La puesta en marcha es más rápida con respecto al reactor de flujo paralelo y contracorriente.
Es importante el tamaño de la biomasa para el funcionamiento correcto.
Caída de presión alta.
Baja eficiencia térmica
Tiende a formar contenidos altos de ceniza.
Es bueno en la capacidad de reacción con grandes cargas de agente oxidante.
La temperatura en la que se entrega el gas de síntesis es de alrededor de los 800°C a 900°C
No es viable para gran escala, porque las toberas quedan muy lejos y el agente gasificante sería incapaz de ingresar al centro de la biomasa en un lecho de gran diámetro.

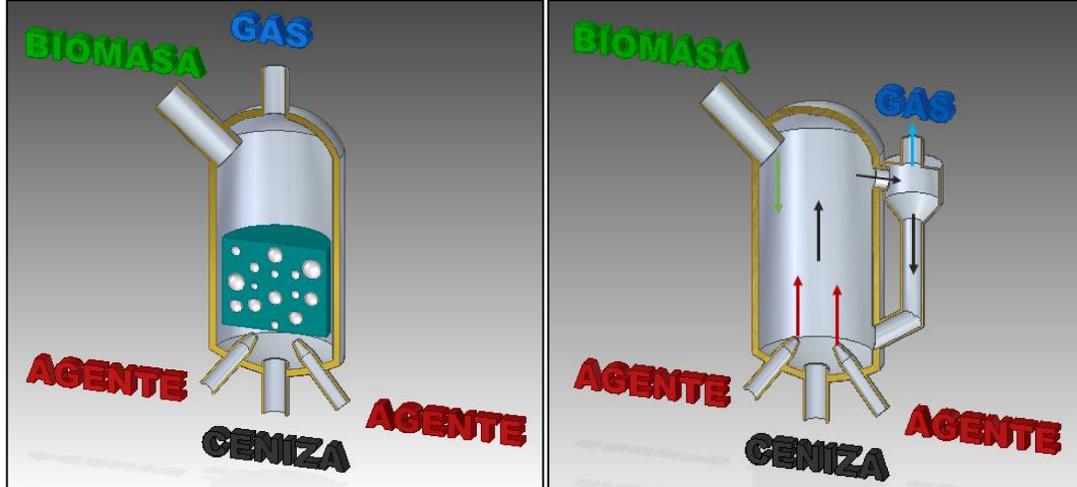
Fuente: Apuntes tomados del pie de página <sup>54, 55, 56</sup>; modificado por el autor.

Figura 8. Reactor de flujo cruzado



3.1.2 Lecho fluidizado. En los reactores de lecho fluidizado el agente oxidante entra por la parte inferior atravesando las partículas de biomasa haciéndolas levitar en sentido ascendente en este punto las partículas de biomasa tienden a comportarse como un fluido obteniendo las características que ello implica. En la figura 9 se ilustra los tipos de gasificadores de lecho fluidizado que existen, en el costado izquierdo se tiene el de lecho burbujeante donde las partículas de biomasa permanecen en suspensión dentro del reactor, y en el costado derecho se encuentra el de lecho circulante donde la velocidad es lo suficientemente grande para que las partículas de biomasa sean arrastradas por el reactor, este equipo tiene un sistema de realimentación de las partículas arrastradas.

Figura 9. Reactores de lecho fluidizado



En el siguiente cuadro se mencionan las características del gasificador de lecho fluidizado.

Cuadro 10. Aspectos del equipo de lecho fluidizado

Pueden tener alta capacidad volumétrica controlando la temperatura fácilmente.
Se presta bien para biomاسas con alto contenido de ceniza pero con el punto de fusión bajo.
Generalmente son utilizados a gran escala.
Se presenta uniformidad de temperatura en la zona de gasificación.
Pueden operar a presiones entre 10bar a 30bar.
Se presta bien para biomاسas con porcentaje de cenizas bajo para evitar la formación de aglomeraciones.
Tiempo de residencia del combustible medio 10s a 100s.
La biomasa debe tener dimensiones uniformes, iguales o menores de 6mm.
La temperatura de operación va desde los 800°C a 1000°C.
Materiales como arena o carbón ayudan a la fluidización de la biomasa permitiendo trabajar a grandes temperaturas y así reducir la formación de alquitranes.
Aspecto esencial en el diseño y operación del reactor es la velocidad mínima de fluidización, se puede determinar de forma experimental lo cual es lo más recomendado cuando no es posible contar con el equipo experimental se recurre a ecuaciones empíricas.
No es debido trabajar con índices de fluidización por encima de 8 por lo que hay un pobre contacto entre el sólido y el agente oxidante, lo cual no permite una buena conversión de las partículas de biomasa.

Cuadro 10. (Continuación).

Muchos tipos de biomasa no se pueden fluidizar ya que el lecho tiende a formar canales por donde el aire pasa mientras los sólidos permanecen estáticos.
La caída de presión en el lecho es un parámetro importante ya que con base en esto se puede saber si el lecho está o no en estado de fluidización.
Opera en alimentación continua o por tandas.
Se logra bajos contenidos de alquitrán debido a la uniformidad de la partícula y a la distribución uniforme de temperatura en la partícula.
Requiere carbón o biomasa muy reactivos.
Tiene un alto grado de complejidad en el diseño de sistemas sopladores y en tornillo sin fines de alimentación de biomasa
El comportamiento del lecho fluidizado depende no solo de la velocidad del gas sino también de las propiedades del sólido y el fluido, geometría del lecho, tipo de distribuidor, elementos internos.
Una solución para evitar aglomeraciones es la reducción de temperatura de operación pero generaría una pérdida de eficiencia por la conversión incompleta del carbonizado.
Hay que tener cuidado en la mezcla de la biomasa con otro material, porque puede presentar segregación dentro del lecho ya que pueden existir diferencias en cuanto al tamaño y densidades, logrando un inadecuado flujo de la biomasa dentro del equipo, generando puntos concentrados de temperatura dentro del gasificador.

Fuente: Apuntes tomados del pie de página <sup>54, 55, 56, 56, 57</sup>; modificado por el autor.

3.1.3 Lecho arrastrado. El residuo de biomasa es conducido por las corrientes de flujo del agente oxidante estos dos componentes entran al reactor en la misma dirección y la gasificación se genera de manera instantánea, como lo muestra la figura 10. A continuación en el cuadro 11, se mencionan las características del gasificador de lecho arrastrado:

Cuadro 11. Aspectos del equipo de lecho arrastrado

La temperatura de operación es muy elevada entre los 1200°C a 1600°C.
Las cenizas se extraen de manera fundida por la parte inferior del equipo.
La alimentación de la biomasa puede ser seca mezclada con nitrógeno o húmeda mezclada con agua.
La biomasa y el agente reactante fluyen en velocidades muy superiores a las que se dan en el resto de tipos de reactores.

<sup>56</sup> TREVIÑO, Manuel. Op. cit., p. 32-43.

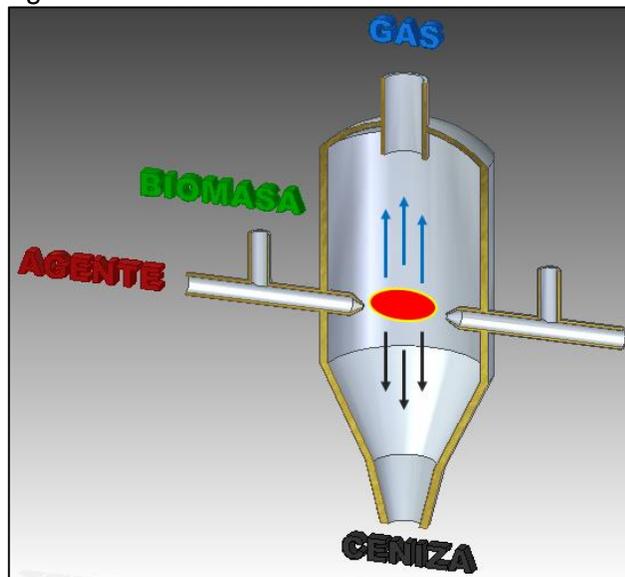
<sup>57</sup> DÍAZ, Felipe. Gasificación de carbón en Chile, para obtención de hidrógeno y electricidad en planta de ciclo combinado. Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2007. Tesis para optar el grado de magister, mención en química y título de ingeniero civil en biotecnología. p. 15-17.

Cuadro 11. (Continuación).

Bajo tiempo de residencia del combustible en el equipo entre 1s a 5s.
Elevada eficiencia.
No produce alquitranes.
Adecuado para plantas de producción de gran escala como centrales de ciclo combinado.
La temperatura en la que se entrega el gas de síntesis es muy alta.
Diseño poco complicado, sin embargo hay que tener en cuenta los sistemas exteriores de operación para un adecuado funcionamiento.
No es recomendable utilizar combustibles con alto punto de fusión de las cenizas, alto contenido de cenizas mayores a 25%, alto porcentaje de cloro mayor a 0.5% por lo que implica menor eficiencia y mayores costos.
La alimentación de la biomasa se da de manera pulverizada, menores de 100µm.

Fuente: Apuntes tomados del pie de página <sup>57, 58</sup>; modificado por el autor.

Figura 10. Reactor de lecho arrastrado.



La alternativa a diseñar se realiza teniendo en cuenta la información recolectada, que cumpla con los requerimientos esenciales para gasificar adecuadamente las biomazas seleccionadas en el capítulo 2 y que proporcione la oportunidad de estudiar otros tipos de biomasa residual.

Se realizara la selección de alternativas de diseño empleando el método de decisión multicriterio conocido como ponderación lineal ver el capítulo 2, en este caso se genera una escala de (1 a 5) siendo la ultima la de mayor importancia para cada criterio, luego las alternativas se califica en una escala de satisfacción de (1 a 3)

siendo el mayor número la mejor calificación y después se procede al cálculo de la ponderación ejecutando la ecuación 3, el que obtenga la mejor puntuación será la alternativa recomendada. A continuación se determinan los criterios con su respectivo peso de ponderación.

- *Alquitrán*, se asigna una ponderación de 5 o muy importante, es un producto generado en el proceso de gasificación que en grandes cantidades significa un uso pobre para el gas de síntesis por la pérdida de propiedades en el mismo, puede perjudicar el equipo obstruyendo las vías de extracción del gas de síntesis o en la entrada del agente gasificante.
- *Temperatura de funcionamiento*, ponderado en 4 o algo importante, representa un punto clave para determinar las propiedades de los materiales a utilizar en la construcción del gasificador ya que deben de cumplir con el requisito de soportar altas temperaturas.
- *Temperatura del gas de síntesis*, con una ponderación de 3 o importancia media, criterio considerado para el pos proceso de gasificación el de enfriamiento o climatización óptima del gas para el uso final, en este caso para motor de combustión interna se requiere que la temperatura de entrega del gas de síntesis sea baja.
- *Contenido de cenizas*, con un peso de 4 o algo importante, pertenece a componentes que no reaccionan durante el proceso de gasificación, son desechos que pueden aglomerar y erosionar los ductos del equipo.
- *Porcentaje de humedad*, se asigna una ponderación de 5 o muy importante, es evidente que es un factor influyente ya que el proceso de gasificación corresponde en desintegrar a elevadas temperaturas la biomasa se hace irrelevante desperdiciar energía en secar el residuo.
- *Capacidad volátil*, ponderación asignada 4 o algo importante, es la cantidad de gases generados por el proceso de descomposición a altas temperaturas en ausencia de oxígeno que posteriormente interactúan con los elementos del agente reactante.
- *Velocidad de fluidización*, con un peso de 3 o importancia media, hace referencia a la complejidad de determinar la velocidad mínima de fluidización así como los sistemas que se requieren para fluidizar la biomasa y los equipos de control para mantenerlos en este estado.

Se establece la satisfacción de cada criterio para las alternativas como lo muestra el cuadro 12 y 13. La velocidad de fluidización en gasificadores de lecho fluido circulante se necesita un gran número de equipos controladores para garantizar el funcionamiento ideal del mismo en comparación con el de lecho fluido burbujeante.

Cuadro 12. Rating de satisfacción para la selección de la alternativa de gasificación I

Criterio	[-]	Criterio	[°C]	Criterio	[°C]	Rating de satisfacción
Alquitrán	alto	Temperatura de funcionamiento	>1000	Temperatura del gas de síntesis	800-900	1-Bajo
	Medio		900-1000		600-800	2-Medio
	Bajo		800-900		<600	3-Alto

Cuadro 13. Rating de satisfacción para la selección de la alternativa de gasificación II

	Lecho fijo contracorriente	Lecho fijo paralelo	Lecho fijo cruzado	Lecho fluido burbujeante	Lecho fluido circulante	Rating de satisfacción
Contenido ceniza [%]	> 15	<5	>5			1-Bajo
	10 a 15	5 a 10	1 a 5	1.5 a 2	1 a 1.5	2-Medio
	<10	>10	<1	<1.5	<1	3-Alto
Porcentaje humedad [%]	<10	>30	>50			1-Bajo
	10 a 30	10 a 30	5 a 50	5 a 15	5 a 15	2-Medio
	30 a 60	<10	<5	>5	>5	3-Alto
Capacidad volátil [%]	>60	<90	<90			1-Bajo
	40 a 60	80 a 90	80 a 90	>90	80 a 90	2-Medio
	<40	>90	>90	80 a 90	>90	3-Alto

Una vez establecido el peso de los criterios y la satisfacción de cada criterio para las alternativas, se procede a realizar el cálculo del puntaje siguiendo el ejemplo.

Ejemplo: se obtienen los siguientes datos del gasificador de lecho fijo contracorriente genera abundantes contenidos de alquitrán, la temperatura de funcionamiento es cercana a los 1000°C, entrega el gas de síntesis a una temperatura aproximadamente a los 300°C. Se tienen los datos del bagazo de caña panelera y hojas de caña panelera como lo muestra el cuadro 14, para información de otros residuos de biomasa ver el anexo B

Cuadro 14. Información sobre los residuos de biomasa

	Ceniza [%]	Volátiles [%]	Humedad [%]
Bagazo de caña panelera	12.38	88.29	46
Hojas de caña panelera	7.72	83.88	7.72

Fuente

- ECN, Phyllis 2. Database for biomass and waste. [En línea] disponible en internet <<https://www.ecn.nl/phyllis2/>>
- HERNÁNDEZ, Humberto. PRADA, Janneth. et al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 2010.
- RÁMIREZ, Nidia. SILVA, Ángela. et al. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Bogotá : Cenipalma, 2011. Boletín técnico No. 30.
- RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados. Kassel : Kassel University Press, 2011.

Se establece el valor de satisfacción para cada criterio en el gasificador de lecho fijo contracorriente, dependiendo de los cuadros 12 y 13

- Alquitrán** (1-Bajo) genera abundantes contenidos de alquitrán
- Temperatura de funcionamiento** (2-medio) cercana a los 1000°C
- Temperatura del gas de síntesis** (3-Alto) la entrega alrededor de los 300°C
- Contenido de cenizas** para:  
 Bagazo de caña panelera (2-medio) pertenece al rango de (10 a 15) [%]  
 Hojas de caña panelera (3-Alto) pertenece al rango de <10%
- Porcentaje de humedad** para:  
 Bagazo de caña panelera (3-Alto) pertenece al rango de (30 a 60) [%]  
 Hojas de caña panelera (1-Bajo) pertenece al rango de <10%
- Capacidad volátil** para:  
 Bagazo de caña panelera (1-Bajo) pertenece al rango de >60%  
 Hojas de caña panelera (1-Bajo) pertenece al rango de >60%

Luego se calcula el score para el bagazo de caña panelera, con la ecuación 3.

$$Score = (5 \times 1) + (4 \times 2) + (3 \times 3) + [(4 \times 2) + (4 \times 3)] + [(5 \times 3) + (5 \times 1)] + [(4 \times 1) + (4 \times 1)] = 70$$

Donde

$$Score = (w_1 \times r_1) + (w_2 \times r_2) \dots$$

Para el presente proyecto el gasificador funcionara de lecho fijo tipo descendente y de tipo fluidizado de lecho burbujeante ya que son los equipos que obtienen el mayor puntaje, representando la mejor alternativa para el desarrollo del proyecto como lo muestra la tabla 4 cabe aclarar que no funcionara de las dos configuraciones al mismo tiempo.

Tabla 4. Calculo del score para las alternativas de diseño

CRITERIOS	PONDERADO	ALTERNATIVAS					
		Lecho fijo contracorriente	Lecho fijo paralelo	Lecho fijo cruzado	Lecho fluido burbujeante	Lecho fluido circulante	
Alquitrán	5	1	3	2	3	3	
Temperatura de funcionamiento	4	2	3	1	3	3	
Temperatura del gas de síntesis	3	3	1	2	2	1	
Cenizas	Bagazo de caña panelera	4	2	3	1		
	Hojas de caña panelera		3	2	1		
	Cisco de café					3	2
Humedad	Bagazo de caña panelera	5	3	1	2		
	Hojas de caña panelera		1	3	2		
	Cisco de café					2	2
Volátiles	Bagazo de caña panelera	4	1	2	2		
	Hojas de caña panelera		1	2	2		
	Cisco de café					3	2
Velocidad de fluidización	3				3	2	
<b>SCORE</b>		70	86	64	76	62	

Fuente

- ARENAS CASTIBLANCO, Erika. LONDONO, Carlos. CHEJNE, Farid. Biomasa y Carbón: Una alternativa energética para Colombia. Colombia : Gerencia Creativa, 2006. Vol. 1.
- DÍAZ, Felipe. Gasificación de carbón en Chile, para obtención de hidrógeno y electricidad en planta de ciclo combinado. Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2007. Tesis para optar el grado de magister, mención en química y título de ingeniero civil en biotecnología.
- RAJVANSHI, Anil. Biomass gasification. [ed.] Yogi Goswami. Alternative energy in agriculture. Maharashtra, 1986. Vol. II, Cap 4.
- SOLAR TECHNICAL INFORMATION PROGRAM. 1988. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. 1988.
- TREVIÑO, Manuel. 2006 en Virtual-Pro. Tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC. España : Club español de la energía, ELCOGAS S.A., 2006 en Virtual-Pro.

Se selecciona el gasificador de lecho fijo descendente debido a que produce una gran proporción de gas de síntesis con un bajo contenido de alquitrán tolerado en motores de combustión interna. Permite gasificar biomasa con un porcentaje alto de cenizas como el bagazo y las hojas de la caña panelera que contienen un 12,38% y 7.72% respectivamente. La dimensión del combustible debe ser uniforme no es útil para partículas muy pequeñas, el bagazo y las hojas de caña panelera tendrán un proceso de reducción física. El porcentaje de humedad admitido por el equipo es menor del 30% por lo que el bagazo y las hojas de caña panelera deberán de secarse con la energía del sol al aire libre o con un sistema de secado de biomasa porque su contenido de humedad es de 46% y 33% respectivamente, es fácil de fabricar, sencillo de operar lo cual resulta económico. Los gasificadores de pequeña escala generalmente son de tipo descendente para generación de electricidad y ámbitos académicos.

Se selecciona el reactor fluidizado de lecho burbujeante porque se logra contenidos bajos de alquitrán debido a la uniformidad del combustible y la distribución uniforme de temperatura en las partículas de biomasa. La biomasa como el cisco de café se presta bien para este equipo debido al bajo contenido de cenizas 1,2% para evitar la formación de aglomeraciones dentro del equipo, se requiere que los contenidos de humedad sean bajos y el material volátil alto debido a que los subprocesos de gasificación se realizan rápidamente y el cisco de café cumple con estas condiciones con un contenido de humedad 10,1% y material volátil del 82%. El tamaño del combustible debe ser uniforme menor a 6mm como el cisco de café ver figura 11 para permitir la flotabilidad de las partículas. Permite la introducción de materiales inertes para ayudar a la fluidización y a trabajar grandes temperaturas logrando reducir un porcentaje de alquitrán en el gas de síntesis. Además se selecciona en conjunto con el grupo de investigación en energía s alternativas de la Fundación Universidad de América donde se realiza un proyecto de grado que lleva como nombre el diseño conceptual de un proceso de gasificación con biomasa lignocelulocica en reactores de lecho fluidizado.

Figura 11. Dimensiones del cisco de café (cm)



Fuente: RINCÓN, Sonia. *Et all.* Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados.

## 4. DISEÑO DEL GASIFICADOR

Se realiza el cálculo de las dimensiones del reactor de lecho fijo de flujo descendente mediante el concepto de carga de hogar o superficie de garganta, lo anterior para el bagazo y las hojas del cultivo de caña panelera. Partiendo de las dimensiones del reactor se realizó el cálculo de la placa distribuidora cuando funcione el equipo en lecho burbujeante fluidizado; lo anteriormente para el cisco de café. Posteriormente se esbozó el gasificador dual para biomasa residual agropecuaria a escala laboratorio mediante el software de diseño Solid Edge.

### 4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL GASIFICADOR

El diseño del gasificador se realiza para suministrar un motor de combustión interna con las siguientes especificaciones (motor CGR 4T OHV, diámetro del cilindro 56.52mm, carrera del pistón 49.82mm, cilindrada 125cm<sup>3</sup>, potencia máxima 10.34Hp a 8500 RPM, relación de compresión 9.5:1)<sup>58, 59</sup>

Se determina la entrada máxima de aire/gas del motor con la ecuación 4.

Ecuación 4. Entrada máxima aire/gas

$$\text{Entrada máxima aire/gas} = \frac{1/2 \times (RPM) \times \text{cilindrada}[l]}{60 \times 1000} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$\text{Entrada Máxima aire/gas} = \frac{1/2 \times (8500rpm) \times 0.125l}{60 \times 1000} = 0.008854167 m^3/s$$

Juan Pérez *et al.* Propone que para valores de proporción menores a 1m<sup>3</sup>/s se tendría una combustión pobre, mientras que para valores superiores a 1m<sup>3</sup>/s la combustión es rica, sin embargo concreta que la relación estequiométrica de combustible/aire es 1<sup>60</sup>. Coeficiente de aire/gas estequiométrico es 1.1:1.0<sup>61</sup> luego se calcula la máxima entrada de gas con la ecuación 5.

Ecuación 5. Máxima entrada de gas

$$\text{Máxima entrada de gas} = \frac{1.0}{2.1} \times \text{entrada máxima aire/gas}$$

<sup>58</sup> AKT MOTOS. Manual de servicio AK 125 SLR - NKDR. 2011. p. 21.

<sup>59</sup> AKT MOTOS Manual del usuario AK 125 SLR - NKDR. p. 19.

<sup>60</sup> PÉREZ, Juan. MELGAR, Andrés. BENJUMEA, Pedro. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. Elsevier Ltd, 2012. Vol. 96. p. 490.

<sup>61</sup> FAO, Food and agriculture organization of the united nations. Wood gas as engine fuel. FAO Forestry Department, 1986. Disponible en línea <<http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s00.htm#Contents>>.

$$\text{Máxima entrada de gas} = \frac{1.0}{2.1} \times 0.008854167 \text{ m}^3/\text{s} = 0.00421627 \text{ m}^3/\text{s}$$

En el ciclo de admisión se mide el porcentaje de llenado en el cilindro esto se conoce como eficiencia volumétrica, una eficiencia volumétrica buena de un motor de combustión interna es del 80%<sup>62</sup> a velocidades normales a 1300rpm que es la velocidad mínima de ralentí del motor seleccionado, por lo tanto se calcula la entrada real del gas con la ecuación 6.

Ecuación 6. Entrada real de gas

$$\text{Entrada real de gas} = \text{Máxima entrada de gas} \times \text{Eficiencia volumétrica}$$

$$\text{Entrada real de gas} = 0.00421627 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.8 = 0.003373016 \text{ m}^3/\text{s}$$

El valor calorífico del gas del bagazo de caña panelera es de 4847.83KJ/m<sup>3</sup>, para las hojas de caña de azúcar se considera en 4800KJ/m<sup>3</sup>. Entonces se calcula la potencia térmica del gas con la ecuación 7.

Ecuación 7. Potencia térmica del gas

$$\text{Potencia térmica del gas} = \text{entrada real del gas} \times \text{valor calorífico del gas}$$

$$\text{Potencia térmica del gas (bagazo de caña panelera)}$$

$$= 0.003373016 \text{ m}^3/\text{s} \times 4847.83 \text{ KJ}/\text{m}^3 = 16.3518075 \text{ KW}$$

$$\text{Potencia térmica del gas (hojas de caña panelera)}$$

$$= 0.003373016 \text{ m}^3/\text{s} \times 4800 \text{ KJ}/\text{m}^3 = 16.1904762 \text{ KW}$$

“la eficiencia del motor depende en parte del índice de compresión del motor. Para un índice de compresión de 9.5:1 la eficiencia puede estimarse en el 28%”<sup>63</sup> se calcula la máxima producción mecánica del motor con la ecuación 8 y la máxima producción eléctrica con un  $\cos \varphi = 0.8$  del generador con la ecuación 9.

Ecuación 8. Producción mecánica del motor (máx.)

$$\text{Producción mecánica máx.} = \text{potencia térmica del gas} \times \text{eficiencia del motor}$$

Ecuación 9. Producción eléctrica (máx.)

$$\text{Producción eléctrica máx.} = \text{producción mecánica máx.} \times \cos \phi \text{ generador}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción mecánica máx. (bagazo de caña panelera)} &= 16.3518075 \text{ KW} \times 0.28 \\ &= 4.57850611 \text{ KW} \end{aligned}$$

<sup>62</sup> NULLVALUE. Así se mide la eficiencia de los motores I. Colombia: El tiempo, 2000. Disponible en línea <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1227130>>.

<sup>63</sup> FAO, Op. cit.

$$\begin{aligned} \text{Producción mecánica máx. (hojas de caña panelera)} &= 16.1904762KW \times 0.28 \\ &= 4.5333333KW \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción eléctrica máx. (bagazo de caña panelera)} &= 16.3518075KW \times 0.8 \\ &= 3.66280489KVA \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción eléctrica máx. (hojas de caña panelera)} &= 16.1904762KW \times 0.8 \\ &= 3.62666667KVA \end{aligned}$$

Después de hallar los valores pertinentes al motor de combustión que funcionara conjuntamente al gasificador se procede a realizar los cálculos del consumo de biomasa considerando que la eficiencia térmica del reactor es del 70%, primero se calcula el consumo de energía con la ecuación 10. Después se procede al cálculo del consumo de biomasa con la ecuación 11 teniendo en cuenta los datos del valor calorífico de los residuos de biomasa.

Ecuación 10. Consumo de energía térmica

$$\text{Consumo de energía térmica (plena carga)} = \frac{\text{potencia térmica del gas}}{\text{Eficiencia térmica del gasificador}}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía térmica plena carga (bagazo de caña panelera)} \\ &= \frac{16.3518075KW}{0.7} = 23.3597251KW \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía térmica plena carga (hojas de caña panelera)} \\ &= \frac{16.1904762KW}{0.7} = 23.1292517KW \end{aligned}$$

El valor calorífico del bagazo de caña panelera con un 46% de humedad es de 18715.2KJ/Kg<sup>64</sup> y el de las hojas de caña panelera con un 33% de humedad es de 16829.4KJ/Kg<sup>65</sup>.

Ecuación 11. Consumo de biomasa del gasificador

$$\text{Consumo de biomasa del gasificador} = \frac{\text{consumo de energía térmica}}{\text{valor calorífico de la biomasa}}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo de biomasa del gasificador (bagazo de caña panelera)} \\ &= \frac{23.3597251KW}{18715.2 \frac{KJ}{Kg}} = 0.00124817 \frac{Kg}{s} = 4.49340697 \frac{Kg}{h} \end{aligned}$$

<sup>64</sup> HERNÁNDEZ, Humberto. PRADA, Janneth. et al. Op. cit. p.124.

<sup>65</sup> Ibid.

$$\begin{aligned} \text{Consumo de biomasa del gasificador (hojas de caña panelera)} &= \frac{23.1292517KW}{16829.4 \frac{KJ}{Kg}} \\ &= 0.00137434 \frac{Kg}{s} = 4.9476099 \frac{Kg}{h} \end{aligned}$$

Después se procede al diseño de la geometría del reactor por el concepto de “carga de hogar definida como la cantidad de gas pobre reducida a condiciones normales de presión y temperatura, dividida por el área de la superficie de la garganta”<sup>66</sup> como se muestra en la ecuación 12.

Ecuación 12. Carga del hogar

$$\text{carga del hogar} = \frac{\text{entrada de gas del motor} \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{\text{superficie de la garganta} \left[ cm^2h \right]}$$

El valor máximo que puede alcanzar la carga del hogar es de 0.9 para gasificadores de lecho fijo paralelo que tengan funcionamiento continuo y con condiciones ideales de operación con dos gargantas de hogar, si los valores de la carga del hogar son superiores se generan caídas de presión considerables en la zona de reducción del equipo. Como el gasificador va a ser a escala laboratorio no tendrá que trabajar de manera continua durante la semana. Será de una sola reducción de garganta debido a la geometría operacional, para equipos de una sola garganta el valor de carga de hogar es de 0.275.<sup>67</sup>

Despejando la superficie de la garganta de la ecuación 12 tenemos que:

$$\text{Superficie de la garganta} = \frac{\text{entrada de gas del motor} \left( \frac{m^3}{s} \right) \times 3600s}{\text{carga del hogar} \left( \frac{m^3}{cm^2h} \right)} [cm^2]$$

Entonces:

$$\text{Superficie de la garganta} = \frac{0.003373016 \frac{m^3}{s} \times 3600s}{0.275 \frac{m^3}{cm^2h}} = 44.1558441cm^2$$

Ecuación 13. Área de un círculo

$$\text{Área de un círculo} = \pi \times (\text{radio})^2$$

Despejando el radio de la ecuación 13 obtendremos el diámetro de la garganta de la siguiente manera:

---

<sup>66</sup> FAO, Op. cit.

<sup>67</sup> Ibid. FAO.

$$\text{Diámetro de la garganta} = \sqrt{\frac{\text{superficie de garganta}}{\pi}} \times 2$$

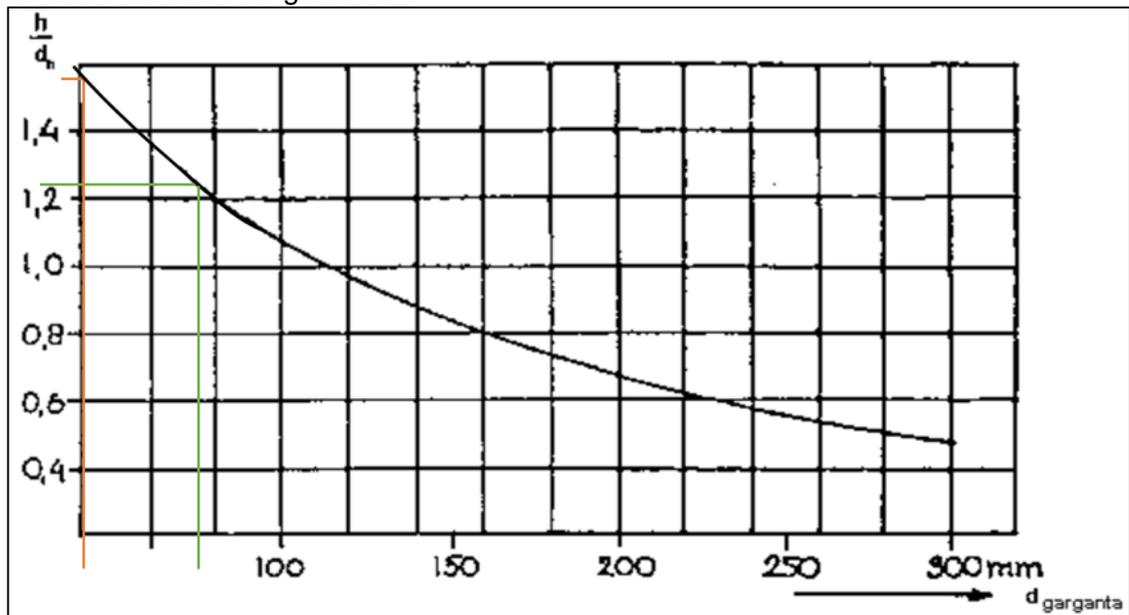
$$\text{Diámetro de la garganta} = \sqrt{\frac{44.15584416\text{cm}^2}{\pi}} \times 2 = 7.49\text{cm} = 74.98\text{mm}$$

Determinado el diámetro de la garganta se obtienen dimensiones importantes como la altura del plano de las toberas sobre la sección transversal de la garganta por medio de la ecuación 14. Utilizando la gráfica 2 obtenemos valores de  $h/dh$ , para el diámetro de garganta es aproximadamente de 1.24. En la figura 12 se observa gráficamente las dimensiones de diámetro de garganta y altura del plano de toberas.

Ecuación 14. Altura del plano de las toberas sobre la sección transversal de la garganta

$$\text{Altura del plano de toberas} = \text{diámetro de garganta} \times \frac{h}{dh}$$

Gráfica 2. Altura del plano de las toberas sobre el estrechamiento del hogar, para diversos tamaños de generador

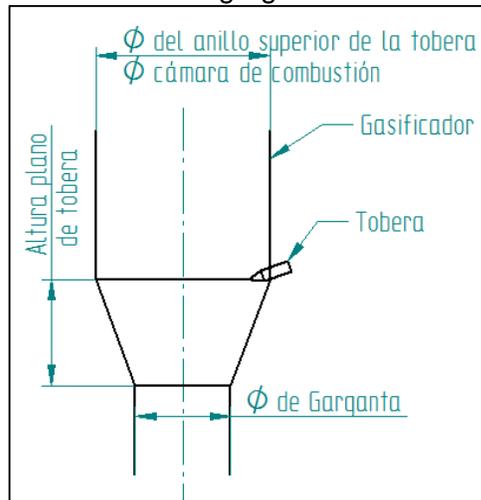


Fuente: FAO, Food and agriculture organization of the united nations. Wood gas as engine fuel.

La altura del plano de las toberas sobre la sección transversal de la garganta es:

$$\text{Altura del plano de tobera} = 7.49\text{cm} \times 1.24 = 9.29\text{cm} = 93\text{mm}$$

Figura 12. Dimensiones de diámetro de garganta y altura del plano de toberas sobre la garganta

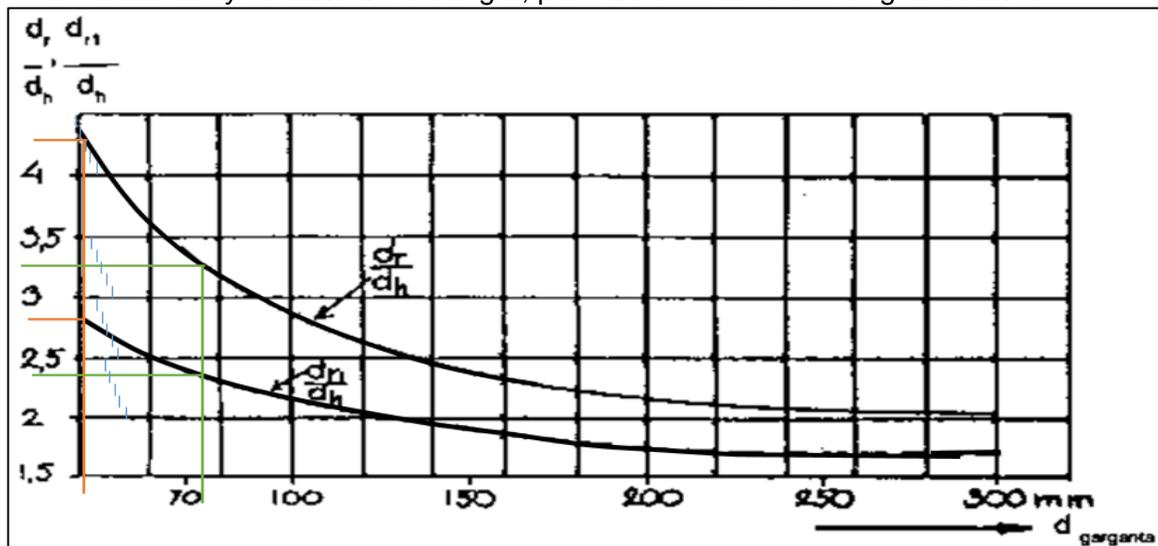


El diámetro del anillo superior de las toberas se halla por medio de la ecuación 15 y con la ayuda de la gráfica 3, donde los valores para la relación  $d_{r1}/d_h$  para el diámetro de garganta es aproximadamente de 2.38. El diámetro de la cámara de combustión es igual al diámetro del anillo de las toberas para reactores de garganta simple como es el caso del gasificador en cuestión. Ver figura 12.

Ecuación 15. Diámetro del anillo superior de las toberas.

$$\text{Diámetro del anillo superior de las toberas} = \text{diámetro de garganta} \times \frac{d_{r1}}{d_h}$$

Grafica 3. Diámetro del anillo de las toberas y apertura de éstas, en relación con el estrechamiento y el diámetro del hogar, para diversos modelos de generadores



Fuente: FAO, Food and agriculture organization of the united nations. Wood gas as engine fuel.

$$\begin{aligned} \text{Diámetro de la cámara de combustión "anillo de toberas"} &= 7.49\text{cm} \times 2.38 \\ &= 17.84\text{cm} = 178.5\text{mm} \end{aligned}$$

Se realiza una interpolación con el diámetro de garganta para hallar el diámetro de la tobera (9.55mm) como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Toberas apropiadas para gasógenos de madera

Diámetro de garganta (mm)	Diámetro de toberas (mm)
70	10.5
74.98	9.55
80	9
90	10
100	11
120	12.7
130	13.5
150	15
170	14.3
190	16

Fuente: FAO, Food and agriculture organization of the united nations. Wood gas as engine fuel. Modificado por el autor.

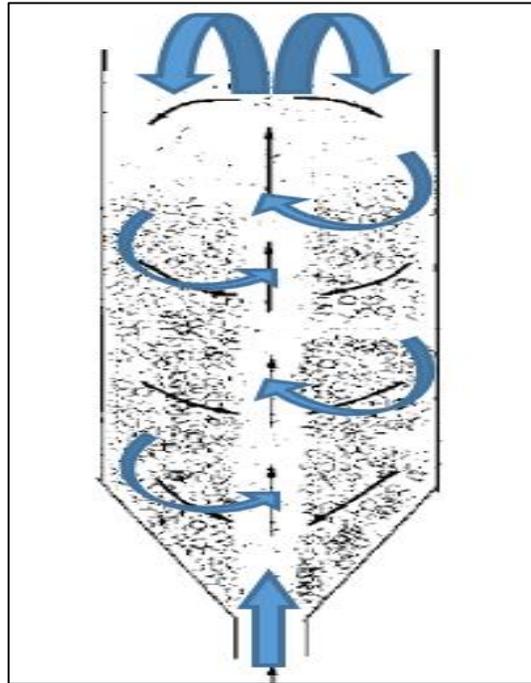
#### 4.2 PLACA DISTRIBUIDORA DE LECHO FLUIDIZADO

Para el diseño de la placa distribuidora en el lecho fluidizado se fija el diámetro del lecho 75mm y la altura de 365mm. En la figura 13 se observa el funcionamiento que tendrá el reactor de este proyecto cuando funcione en lecho fluido.

Se procede a calcular la pérdida de presión en el lecho y en el plato distribuidor con las ecuaciones 16 y 17, de acuerdo con la literatura consultada no se permite que la caída de presión en la placa sea menor a 2500Pa<sup>68</sup>. Existen tres configuraciones para ingresar el agente oxidante en el reactor debajo del plato distribuidor como se observa en la figura 14, para el gasificador dual se selecciona la dirección directa hacia arriba.

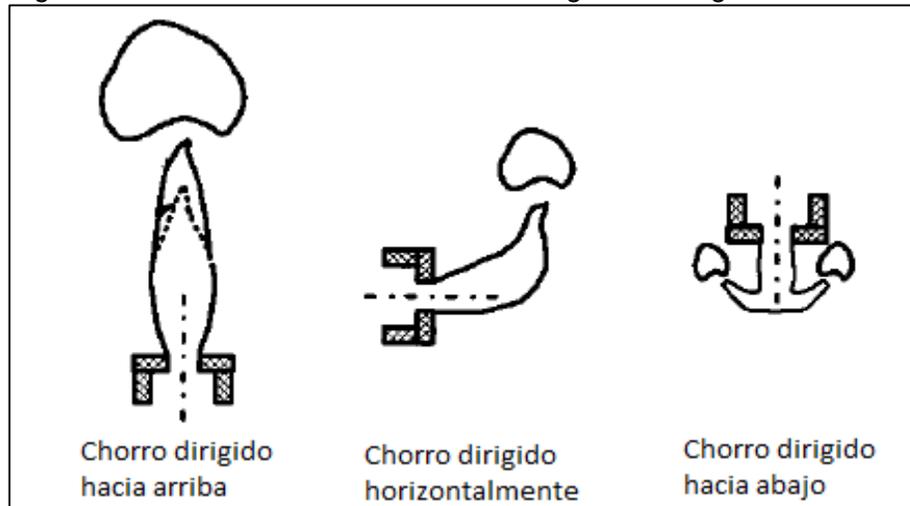
<sup>68</sup> YANG, WEN CHING. Handbook of fluidization and fluid particle system. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003. p. 168.

Figura 13. Lecho fluido clásico.



Fuente: YANG, WEN CHING. Handbook of fluidization and fluid particle system

Figura 14. Diferentes orientaciones en el ingreso del agente oxidante



Fuente: YANG, WEN CHING. Handbook of fluidization and fluid particle system

Ecuación 16. Pérdida de presión en el lecho

$$\Delta P_{lecho} = g \times \rho_b \times L_b$$

*g* – gravedad  
*ρ<sub>b</sub>* – densidad de biomasa  
*L<sub>B</sub>* – altura del lecho

La cascarilla de café tiene aproximadamente una densidad de  $(370 \text{ Kg/m}^3)^{69}$ , se escoge una densidad de  $800 \text{ Kg/m}^3$  para los cálculos y garantizar que otros tipos de biomasa que estén por debajo de este rango puedan utilizarse en el reactor.

$$\Delta P_{lecho} = 9.81 \frac{m}{s^2} \times 800 \frac{Kg}{m^3} \times 0.36798m = 2887.90Pa$$

Ecuación 17. Perdida de presión en el plato distribuidor

$$\Delta P_{distribuidor} = c \times \Delta P_{lecho}$$

*c – factor de corrección entrada agente gasificante*

El factor de corrección *c*, es un coeficiente para tratar igualar la distribución del flujo del agente gasificante en estado inestable, es un valor experimental debido a la configuración con que entra el agente gasificante a la placa distribuidora para chorros dirigidos hacia arriba y horizontalmente es de 0.3 y para chorros dirigidos hacia abajo es de 0.1.<sup>70</sup>

$$\Delta P_{distribuidor} = 0.3 \times 2887.90Pa = 866.37Pa$$

Como la caída de presión en la placa distribuidora es pequeña se toma la referencia que bajo ninguna circunstancia debe ser menor a  $2500Pa^{71}$

Luego se calcula la velocidad del gas en el orificio y la velocidad de flujo volumétrico del agente con la ecuación 18 y 19 respectivamente con el fin de hallar el número de orificios necesarios en la placa distribuidora.

Ecuación 18. Velocidad del gas en el orificio

$$U_{orif.} = c_{orif.} \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P_{distribuidor}}{\rho_g}}$$

*c<sub>orif.</sub> – coeficiente de corrección del orificio*  
*ρ<sub>g</sub> – densidad del aire*

El valor típico del coeficiente de corrección del orificio para agentes que fluyen a través del orificio es de 0.8<sup>72</sup>. La densidad del aire en Bogotá a 20°C es de  $0.8878 \text{ Kg/m}^3$ .<sup>73</sup>

---

<sup>69</sup>

<sup>70</sup> YANG, Op. cit.

<sup>71</sup> Ibid.

<sup>72</sup> Ibid. p.169.

<sup>73</sup> DEL PILAR, E. VACCA, E. LUGO, I. Diseño y fabricación de un vehículo autónomo impulsado por energía solar. 2012. Vol. XVI, 32. p. 96.

$$U_{orif.} = 0.8 \times \sqrt{\frac{2 \times 2500 Pa}{0.8878 \text{ Kg}/m^3}} = 60.03 \text{ m/s}$$

Ecuación 19. Velocidad del flujo volumétrico del agente debajo de la rejilla

$$Q = U_{agente} \times \frac{\pi \times d^2}{4}$$

*Q – flujo volumétrico del agente*  
*U<sub>agente</sub> – velocidad del agente*  
*d – diametro del lecho*

El proyecto de investigación en energías alternativas que va articulado con el presente proyecto nos concede la velocidad del agente (1m/s)<sup>74</sup>.

$$Q = 1 \text{ m/s} \times \frac{\pi \times (0.07498m)^2}{4} = 0.00441 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se procede a calcular el número de orificios necesarios para la placa distribuidora con la ecuación 20.

Ecuación 20. Número de orificios necesarios

$$N = \frac{Q \times 4}{U_{orif.} \times \pi \times d_h^2}$$

*N – número de orificios*  
*d<sub>h</sub> – diámetro del orificio*

Diámetro del orificio, fijado en 3mm debido a las dimensiones de la cascarilla de café.

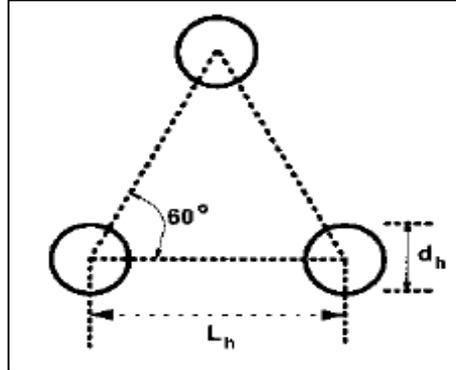
$$N = \frac{0.00441 \text{ m}^3/\text{s} \times 4}{60.03 \text{ m/s} \times \pi \times (0.003m)^2} = 10.39 \approx 10$$

Para el cálculo del paso entre agujeros se selecciona una configuración triangular como lo muestra la figura 15, porque garantiza un mayor número de orificios en un área determinada, Esto se hace para reducir al mínimo las zonas de en las que se puede estancar la biomasa<sup>75</sup>

<sup>74</sup> PEÑA, Ivon. REYES, Camila. Diseño conceptual de un proceso de gasificación de biomasa residual lignocelulosica en reactores de lecho fluidizado. Bogotá, 2016.

<sup>75</sup> YANG, Op. cit. p.170.

Figura 15. Configuración triangular



Fuente: YANG, WEN CHING. Handbook of fluidization and fluid particle system

Ecuación 21. Paso para una configuración triangular

$$L_h = \frac{1}{\sqrt{N_d \times \sin 60^\circ}}$$

$L_h$  – paso del agujero  
 $N_d$  – densidad del orificio

Ecuación 22. Densidad del orificio

$$N_d = \frac{N \times 4}{\pi \times D^2}$$

$$N_d = \frac{10 \times 4}{\pi \times (74.98\text{mm})^2} = 0.00226 \text{ orificios/mm}^2$$

Entonces el paso de los agujeros es de

$$L_h = \frac{1}{\sqrt{0.00226 \times \sin 60^\circ}} \approx 23\text{mm}$$

Despejando  $t$  de la ecuación 23 calculamos el espesor mínimo de la placa distribuidora

Ecuación 23. Coeficiente de corrección del orificio

$$c_{orif.} = 0.82 \times \left(\frac{t}{d_h}\right)^{0.13}$$

Despejando

$$t = \left[\frac{c_{orif.}}{0.82} \times d_h^{0.13}\right]^{1/0.13}$$

$$t = \left[\frac{0.8}{0.82} \times 3\text{mm}^{0.13}\right]^{1/0.13} = 2.48\text{mm}$$

Se comprobó el valor del coeficiente de corrección del orificio y para ello es necesario la división del espesor mínimo de la placa entre el diámetro del orificio una vez se encontró el valor de  $L_h$  la relación anterior que corresponde a 0.827 se utiliza la gráfica 4 para obtener el valor gráfico del coeficiente de corrección del orificio.

$$\frac{t}{d_h} = \frac{2.48mm}{3mm} = 0.827$$

El valor aproximado del coeficiente de corrección gráfico es de 0.942

$$c_{grafica} = 0.942$$

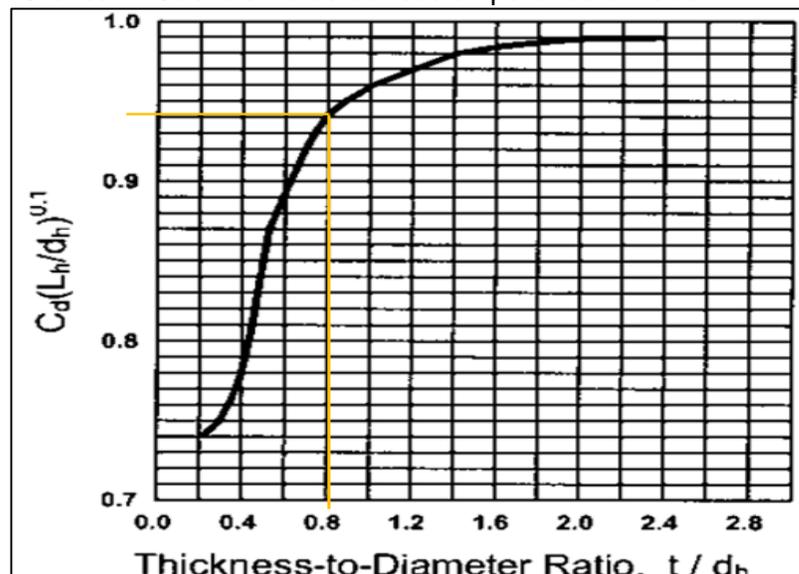
Determinado este valor del coeficiente de corrección gráfico se reemplaza en la ecuación 24. El resultado debe ser muy cercano al coeficiente de corrección del orificio seleccionado previamente de lo contrario se debe utilizar el calculado hasta que concuerden<sup>76</sup>, tienen correlación debido a que están muy cercanos 0.7989 vs 0.8

Ecuación 24. Comprobación del factor de corrección del orificio

$$c_{comprobado} = c_{grafica} \times \left(\frac{d_h}{L_h}\right)^{0.1}$$

$$c_{comprobado} = 0.942 \times \left(\frac{3mm}{15.58mm}\right)^{0.1} = 0.7989$$

Grafica 4. Coeficiente de corrección para los orificios



Fuente: YANG, WEN CHING. Handbook of fluidization and fluid particle

<sup>76</sup> Ibid. p. 177

### 4.3 ESPESOR DEL GASIFICADOR

En el cálculo del espesor para el gasificador se utiliza la ecuación 25 suministrada por ASME<sup>77</sup> para recipientes cilíndricos a presión teniendo en cuenta la temperatura de trabajo

Ecuación 25. Espesor para recipientes cilíndricos a presión

$$t_{cilindro} = \frac{P \times R}{S \times E - 0.6 \times P}$$

Donde

P: es la presión de diseño

$$P = P_t + P_h + 30psi$$

$P_t$  – presión de trabajo

$P_h$  – presión hidrostática

R: radio interno del cilindro

S: esfuerzo ultimo a tensión del material a la temperatura de operación.

E: eficiencia de las soldaduras.

La densidad del agua es de 1000Kg/m<sup>3</sup>, la aceleración de gravedad es de 9.81m/s<sup>2</sup>, la altura del gasificador es de 1.4m, la presión de trabajo es de 14.7psi, el esfuerzo ultimo a tensión del acero inoxidable austenítico AISI 310S a una temperatura de 800°C es de (25500psi 175MPa)<sup>78</sup>

Entonces la presión de diseño queda.

$$P = 14.7psi + \frac{(1000 Kg/m^3 \times 9.81m/s^2 \times 1.4m)}{6894.75Pa} + 30psi = 46.69psi \approx 343KPa$$

El espesor del cuerpo del cilindro es:

$$t_{cilindro} = \frac{46.69psi \times 3.51in}{25500psi \times 0.75 - 0.6 \times 46.12psi} = 0.0856in = 0.217mm$$

$$Espesor\ permisible = FS \times Espesor\ diseño$$

Al espesor mínimo se le adiciona 1mm como margen de pérdida de masa debida a la corrosión entonces quedaría con un espesor de 1.217mm, además el factor de seguridad de 4<sup>79</sup>, el espesor final es de 4.87mm.

<sup>77</sup> ASME, American Society of Mechanical Engineers. UG-27 Thickness of shells under internal pressure. New york: The American Society of Mechanical Engineers, 1989

<sup>78</sup>ACERINOX. Ficha de tipo de acero. [En línea] [Citado el: 19 de Marzo de 2016.] <http://www.acerinox.com/es/productos/tipos-de-acero/tsacxtipoacero/EN-1.4845---AISI-310S/>.

<sup>79</sup> CASILLAS, A. Máquinas, cálculos de taller. Ed. 27. Madrid, España: COPYRIGHT BY EDICIONES MÁQUINAS, 1974. p. 436.

#### 4.4 UNIÓN ATORNILLADA

Para el cálculo de los pernos de apriete en las uniones críticas se tiene que el espesor de las uniones es de 10mm cada uno; especificado lo anterior se busca la longitud de apriete teniendo en cuenta el espesor de la empaquetadura. Para las temperaturas y los tipos de agentes corrosivos que se presentan en el equipo se selecciona una empaquetadura de material mica que tienden a perder poco peso a elevadas temperaturas, son resistentes a una variedad de productos químicos. Este tipo de juntas se encuentran entre la unión de la culata y el bloque del motor de muchos automóviles, bridas atornilladas, quemadores de gas, intercambiadores, turbinas de gas.<sup>80</sup> Las juntas de material mica se encuentran comercialmente en espesores de (0.8, 1.6, 3.2) mm, fabricadas en dimensiones estandarizadas o según especificaciones de plano.<sup>81</sup>

La longitud de apriete es la suma del espesor de la junta y el espesor de las uniones involucradas 21.6mm. Teniendo en cuenta lo anterior y como se encuentran comercialmente la longitud del tornillo es de 25mm.<sup>82</sup> Los perno y tornillos tienen una longitud roscada para verificar se utiliza la ecuación 26.

Ecuación 26. Longitud roscada del perno, para roscas métricas

$$L_t = \begin{cases} \frac{2d_c + 6}{1} & L \leq 125 \\ \frac{2d_c + 12}{1} & 125 < L \leq 200 \\ \frac{2d_c + 25}{L} & L > 200 \end{cases}$$

*L<sub>t</sub> es longitud roscada*  
*L es longitud total del perno*  
*d<sub>c</sub> es diametro de la cresta*

Entonces

$$L_t = 2 * 10mm + 6 = 26mm$$

Luego se calcula la rigidez del perno con la ecuación 27. el material del tornillo es de acero AISI 316 su módulo de elasticidad es de 165GPa a altas temperaturas.<sup>83</sup>

Ecuación 27. Rigidez del perno, Kb

$$\frac{1}{K_b} = \frac{4}{\pi E} \left[ \frac{L_s + 0.4d_c}{d_c^2} + \frac{L_t + 0.4d_r}{d_r^2} \right]$$

<sup>80</sup> LAMONS. Manual de juntas, guía técnica de estanqueidad. [En línea] [Citado el: 19 de Marzo de 2016.] [http://www.lamons.com/public/pdf/lit\\_referencia/ManualDeJuntas-GuiaTecnicaDeEstanqueidad.pdf](http://www.lamons.com/public/pdf/lit_referencia/ManualDeJuntas-GuiaTecnicaDeEstanqueidad.pdf).

<sup>81</sup> FLEXILATINA INGENIERÍA Y REPRESENTACIONES. Empaques en lámina. [En línea] [Citado el: 19 de Marzo de 2016.] <http://flexilatina.com/empaques-en-lamina/>.

<sup>82</sup> MUNDIAL DE TORNILLOS. Catalogo productos, tornillos. [En línea] [Citado el: 19 de Marzo de 2016.] <http://www.mundialdetornillos.com/index.php?id=4001041>.

<sup>83</sup> ACERINOX. Op cit.

$L_s$  longitud no roscada  
 $L_t$  longitud roscada  
 $d_r$  diametro de rosca  
 $E$  modulo de elasticidad

Entonces

$$\frac{1}{K_b} = \frac{4}{\pi \times 1.65 \times 10^{11} Pa} \left[ \frac{0m + 0.4 \times 0.01m}{(0.01m)^2} + \frac{0.0166m + 0.4 \times 0.00816m}{(0.00816m)^2} \right]$$

$$K_b = 383061138.7N/m$$

Ahora se calcula la rigidez de la junta con la ecuación 28. Donde el ángulo de presión se estima de  $30^\circ$ .<sup>84</sup> El ancho y la altura de un tornillo M10 de cabeza hexagonal es de (16, 6.85) mm respectivamente.

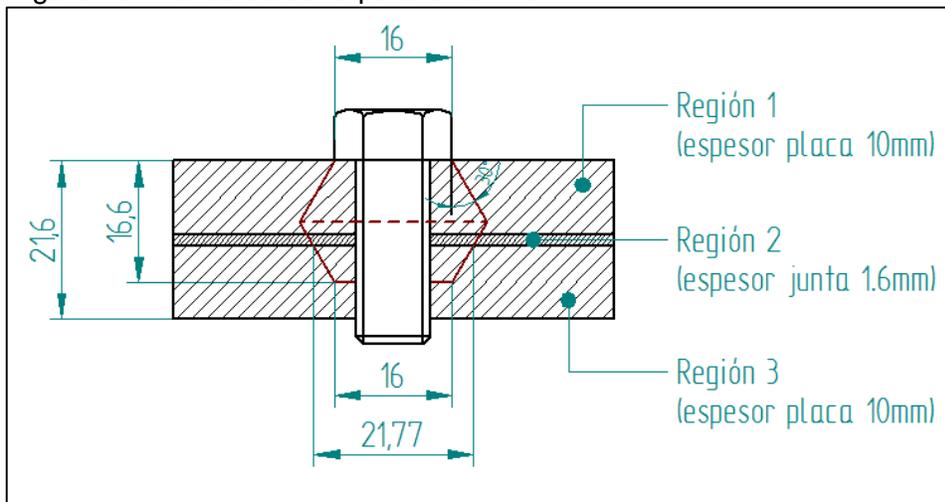
Ecuación 28. Rigidez de la junta,  $K_j$

$$\frac{1}{K_j} = \frac{1}{K_{j1}} + \frac{1}{K_{j2}} + \frac{1}{K_{j3}} + \dots$$

$$K_{jn} = \frac{\pi E d_c t \tan \alpha}{2 \ln \left[ \frac{(L_i \tan \alpha + d_i - d_c)(d_i + d_c)}{(L_i \tan \alpha + d_i + d_c)(d_i - d_c)} \right]}$$

$L_i$  longitud axial del tronco conico  
 $d_i$  diametro menor del tronco conico  
 $E$  modulo de elasticidad de la región

Figura 16. Tronco de cono para el tornillo



<sup>84</sup> BUDYNAS, R. NISBETT, K. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México D.F.: McGraw-hill, 2008. p 409, 410.

La región 1 y 2 son de acero inoxidable AISI 310S que posee un módulo de elasticidad a 800°C de 130GPa<sup>85</sup>. La rigidez para la región 1 es:

$$K_{j1} = \frac{\pi \times 1.30 \times 10^{11} Pa \times 0.01m \times \tan 30}{2 \ln \left[ \frac{(10mm \times \tan 30 + 16mm - 10mm)(16mm + 10mm)}{(10mm \times \tan 30 + 16mm + 10mm)(16mm - 10mm)} \right]}$$

$$K_{j1} = 2489610453 N/m$$

La región 2 posee un módulo de elasticidad de 40MPa<sup>86</sup>. entonces la rigidez en la junta quedaría.

$$K_{j2} = \frac{\pi \times 4 \times 10^7 Pa \times 0.01m \times \tan 30}{2 \ln \left[ \frac{(1.6mm \times \tan 30 + 21.77mm - 10mm)(21.77mm + 10mm)}{(1.6mm \times \tan 30 + 21.77mm + 10mm)(21.77mm - 10mm)} \right]}$$

$$K_{j2} = 7735601.865 N/m$$

La rigidez para la región 3 es:

$$K_{j3} = \frac{\pi \times 1.30 \times 10^{11} Pa \times 0.01m \times \tan 30}{2 \ln \left[ \frac{(5mm \times \tan 30 + 16mm - 10mm)(16mm + 10mm)}{(5mm \times \tan 30 + 16mm + 10mm)(16mm - 10mm)} \right]}$$

$$K_{j3} = 4100541787 N/m$$

Utilizando la ecuación 28 la rigidez total en la unión es

$$\frac{1}{K_j} = \frac{1}{2489610453} + \frac{1}{7735601.865} + \frac{1}{4100541787}$$

$$K_j = 7697165.022 N/m$$

Ahora se encuentra la constante de rigidez C con la ecuación 29.

Ecuación 29. Constante de rigidez

$$R_c = \frac{K_b}{K_b + K_j}$$

<sup>85</sup> ACERINOX. Op cit.

<sup>86</sup> LAMONS. Op cit.

$$R_c = \frac{383061138.7N/m}{383061138.07N/m + 7697165.022N/m} = 0.98$$

Para el cálculo de la precarga para cargas estáticas como para la de fatiga se utiliza la ecuación 30.

Ecuación 30. Precarga para el perno  $F_i$

$$F_i = \begin{bmatrix} 0.75F_p \\ 0.9F_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{conexiones reutilizadas} \\ \text{conexiones permanentes} \end{bmatrix}$$

$$F_p = A_t S_p$$

$F_p$  carga de prueba

$A_t$  área de esfuerzo de tensión

$S_p$  resistencia de prueba

En el proyecto se utiliza la precarga para conexiones reutilizables debido a que hay que tener en cuenta el mantenimiento de las piezas internas del equipo. El área de esfuerzo a tensión para un tornillo M10 es de  $58\text{mm}^2$ .<sup>87</sup> Y la resistencia de prueba para un tornillo M10 de clase 5.8 es de  $380\text{MPa}$ <sup>88</sup>. La precarga para el tornillo es:

$$F_i = 0.75 \times 0.000058\text{m}^2 \times 3.8 \times 10^8\text{Pa} = 16530\text{N}$$

Entonces se realiza el cálculo de la carga máxima que puede soportar el tornillo, con la ecuación 31 y suponiendo un factor de seguridad 3.

Ecuación 31. Carga máxima soportada por el tornillo

$$P_{m\acute{a}x,b} = \frac{A_t S_p - F_i}{n_{sb} R_c}$$

$$P_{m\acute{a}x,b} = \frac{0.000058\text{m}^2 \times 3.8 \times 10^8\text{Pa} - 16530\text{N}}{3 \times 0.9803} = 1873.52\text{N}$$

La presión de diseño ejercida en el gasificador es de  $46.69\text{psi}$  donde la fuerza es de  $8056.46\text{N}$  para sacar el número de pernos se divide la fuerza ejercida en el gasificador entre la carga soportada por el tornillo.

$$\#pernos = \frac{8056.46\text{N}}{1873.52\text{N}} = 4.3$$

“para mantener la adecuada uniformidad, los pernos adyacentes no se deben colocar con una separación mayor de seis diámetros nominales en el círculo de pernos. Para mantener un espacio libre para que entre la llave, los pernos deben

<sup>87</sup> BUDYNAS, R. NISBETT, K. Op cit. p 394.

<sup>88</sup> Ibid. p 416.

colocarse al menos con una separación de tres diámetros<sup>89</sup> como lo indica la ecuación 32.

Ecuación 32. Espaciamiento de los pernos en un círculo

$$3 \leq \frac{\pi D_b}{N d_c} \leq 6$$

$D_b$  diámetro del círculo de pernos  
 $N$  número de pernos

$$\frac{\pi \times 228\text{mm}}{16 \times 10\text{mm}} = 4.47$$

Con 16 tornillos se encuentra un espaciamiento aproximado de 4 diámetros, cumple con la especificación. Con el nuevo número de tornillos se calcula el factor que realmente se alcanza con la ecuación 33.

Ecuación 33. Factor corregido

$$n_{sb'} = \frac{S_p A_t - F_i}{R_C \left( \frac{F_{\text{diseño}}}{N} \right)}$$

$$n_{sb'} = \frac{3.8 * 10^8 \text{Pa} \times 0.000058\text{m}^2 - 16530\text{N}}{0.9803 \times \left( \frac{8056.46\text{N}}{16\text{pernos}} \right)} = 11.16$$

Calculamos la carga máxima antes de que ocurra la separación con la ecuación 34.

Ecuación 34. Carga máxima de separación

$$P_{\text{máx},j} = \frac{F_i}{n_{sb'}(1 - R_C)}$$

$$P_{\text{máx},j} = \frac{16530\text{N}}{3(1 - 0.9803)} = 280056.602\text{N}$$

La falla debida a la separación no ocurrirá antes que la falla del perno. Para el estudio de fatiga, la carga media de diseño es  $8056.46\text{N}/2=4028.23\text{N}$ , se supone una probabilidad de supervivencia de 90%, resistencia mínima a la tensión para un tornillo M10 de clase 5.8 es de  $520\text{MPa}$ <sup>90</sup>. Para el límite de fatiga para carga axial se tiene la ecuación 35.

---

<sup>89</sup> Ibid.

<sup>90</sup> Ibid. p 416.

Ecuación 35. Límite de fatiga

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200Kpsi(1400MPa) \\ 100Kpsi & S_{ut} > 200Kpsi \\ 700MPa & S_{ut} > 1400MPa \end{cases}$$

$S_{ut}$  resistencia a la tensión mínima

$$S'_e = 0.5 \times 520MPa = 260MPa$$

Ahora se calcula el límite de fatiga modificado por los diferentes factores con la ecuación 36.

Ecuación 36. Límite de fatiga modificado

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e S'_e$$

$K_a$  factor de superficie  
 $K_b$  factor de tamaño  
 $K_c$  factor de carga  
 $K_d$  factor de temperatura  
 $K_e$  factor de confiabilidad

El factor de superficie es  $K_a = (a)S_{ut}^{(b)}$ . El tornillo es laminado en frío o maquinado, el factor (a) es de 4.51MPa y el factor (b) de -0.265, entonces el factor de superficie da:

$$K_a = 4.51MPa \times 520MPa^{-0.265} = 0.8598$$

En cargas axiales no existe algún efecto de tamaño por lo que es igual a uno  $K_b=1$ <sup>91</sup>, el factor de carga es de 0.85 para cargas axiales<sup>92</sup>, el factor de temperatura es de 0.549 para 600°C<sup>93</sup>, el factor de confiabilidad para el 90% es de 0.897<sup>94</sup>. El límite de fatiga corregido es:

$$S_e = 0.8598 \times 1 \times 0.85 \times 0.549 \times 0.897 \times 260MPa = 93.58MPa$$

Calculamos el esfuerzo alternante y el esfuerzo medio experimentado por el número de perno con la ecuación 37 y 38 respectivamente.

Ecuación 37. Esfuerzo alternante de un perno

$$\sigma_a = \frac{C(F_{diseño}/\#pernos)}{2A_t}$$

---

<sup>91</sup> Ibid. p 275.

<sup>92</sup> Ibid. p 277.

<sup>93</sup> Ibid. p 278.

<sup>94</sup> Ibid. p 279.

$$\sigma_a = \frac{0.9803 \times (8056.46N/16)}{2 \times 0.000058m^2} = 4255365.41Pa$$

Ecuación 38. Esfuerzo medio de un perno

$$\sigma_m = \frac{C(F_{diseño}/\#pernos)}{2A_t} + \frac{F_i}{A_t}$$

$$\sigma_m = \frac{0.9803 \times (8056.46N/16)}{2 \times 0.000058m^2} + \frac{16530N}{0.000058m^2} = 289255365.4Pa$$

Calculamos el factor de seguridad por fatiga con la ecuación 39. El componente de modificación para tornillos de rosca laminada de grado métrico de 5.8 es de 2.2<sup>95</sup>. El resultado es considerado seguro por lo cual no se espera una falla por fatiga a un corto tiempo.

Ecuación 39. Factor de seguridad por fatiga

$$n_s = \frac{S_{ut} - (\sigma_m - \sigma_a)}{\sigma_a C \left[ \frac{K_f S_{ut}}{S_e} + 1 \right]}$$

$$n_s = \frac{5.2 * 10^8 Pa - (289255365.4Pa - 4255365.41Pa)}{4255365.41Pa \times 0.9803 \left[ \frac{2.2 \times 5.2 * 10^8 Pa}{9.358 * 10^7 Pa} + 1 \right]}$$

$$n_s = 4.25$$

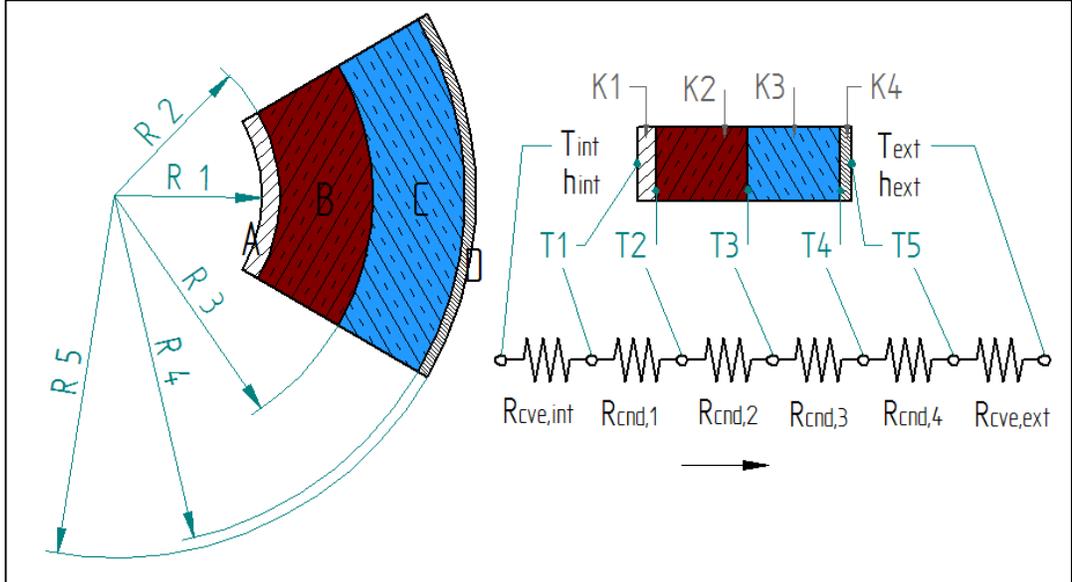
#### 4.5 AISLANTE TÉRMICO

Se reduce la temperatura interior del equipo de forma que si por algún motivo ocurre un accidente de contacto involuntario no se involucre en lesiones considerables. Proporciona que la temperatura interior del reactor se mantenga, esto hace que el funcionamiento del quemador no sea continuo facilitando el ahorro de combustible en el mismo.

---

<sup>95</sup> Ibid. p 425.

Figura 17. Circuito térmico de paredes cilíndricas compuestas para el gasificador



Fuente: INCROPERA, Frank. DEWITT, David. Fundamentos de transferencia de calor. Modificado por el autor.

En la figura 17 se muestra la distribución de resistencia térmica y de temperaturas en el equipo, la sección A es el acero AISI 310S con un espesor de 5mm su conductividad térmica K1 es 27W/mk. La sección B es la primera capa de aislante con una conductividad térmica K2 de 0.272W/mk para la colcha de fibra cerámica. La sección C es fibra de vidrio como segundo aislante conductividad térmica K3 de 0.038W/mk. La sección D es la capa protectora contra el aislante es de material aluminio con un espesor de 1mm su conductividad térmica K4 de 205W/mk. La temperatura interior es de 1000°C con un coeficiente de convección interior de 15W/m<sup>2</sup>k, la temperatura promedio de Bogotá es de 15°C con el coeficiente de convección exterior de 25 W/m<sup>2</sup>k. Para hallar el espesor del aislante se utiliza el despeje de T5 de la ecuación 42 iterando los radios de los aislantes para poder obtener la temperatura superficial cerca de 40°C adecuada para que no se generen lesiones considerables en caso de accidente de contacto.

Ecuación 40. Resistencia térmica por convección para un cilindro

$$R_{cve} = \frac{1}{h \times 2 \times \pi \times r \times l}$$

*h* – coeficiente de convección

*r* – radio de circunferencia

*l* – longitud del cilindro

Ecuación 41. Resistencia térmica por conducción para una configuración cilíndrica

$$R_{cnd} = \frac{\ln(r_{n+1}/r_n)}{2 \times \pi \times K \times l}$$

$r_{n+1}$  – radio superior  
 $r_n$  – radio inferior  
 $K$  – conductividad termica  
 $l$  – longitud del cilindro

Tabla 6. Determinación de la temperatura exterior

longitud	478	mm
Text	15	°C
Tint	1000	°C
hcve ext	25	W/m2K
Kacero 310S	27	W/mk
Kaislante 1	0.272	W/mk
Kaislante 2	0.038	W/mk
Kaluminio	205	W/mk
hcve int	15	W/m2K

espesor total	20	40	60	80	mm
T sup exter	105.926457	65.4833164	49.3684117	40.7844009	°C
R1	124.25	124.25	124.25	124.25	mm
R2	129.25	129.25	129.25	129.25	mm
R3*	139.25	149.25	159.25	169.25	mm
R4**	149.25	169.25	189.25	209.25	mm
R5	150.25	170.25	190.25	210.25	mm
espesor1	10	20	30	40	mm
espesor2	10	20	30	40	mm
Rcve int	0.17865064	0.17865064	0.17865064	0.17865064	K/W
Rcnd1	0.00048653	0.00048653	0.00048653	0.00048653	K/W
Rcnd2	0.09122418	0.17611906	0.25550624	0.33005701	K/W
Rcnd3	0.60766866	1.10187162	1.51228387	1.85890588	K/W
Rcnd4	1.0846E-05	9.5682E-06	8.5597E-06	7.7435E-06	K/W
Rcve ext	0.08864163	0.07822852	0.07000476	0.06334557	K/W
suma de R	0.96668248	1.53536594	2.01694059	2.43145337	K/W

\* $r_3 = r_2 + \text{espesor1}$  \*\* $r_4 = r_3 + \text{espesor2}$

Ecuación 42. Temperatura superficial exterior

$$\frac{T_5 - T_{ext}}{R_{cve,ext}} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}}$$

Despejando  $T_5$

$$T_5 = \left[ \left( \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}} \right) \times R_{cve,ext} \right] - T_{ext}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_{int} 2\pi r_1 l} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 l} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 l} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_3 l} + \frac{\ln(r_5/r_4)}{2\pi k_4 l} + \frac{1}{h_{ext} 2\pi r_5 l}$$

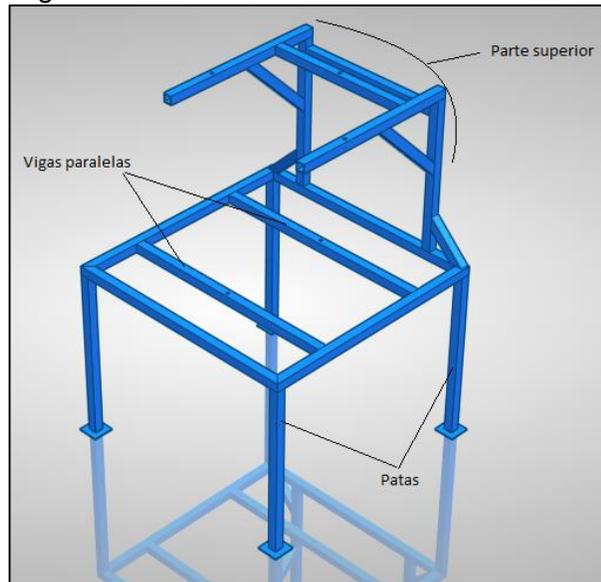
$$R_{cve,ext} = \frac{1}{h_{ext} 2\pi r_5 l}$$

En la tabla 6 se observa los cálculos para hallar la temperatura superficial exterior del gasificador con diferentes espesores de aislantes. Por lo tanto un espesor de 40mm para la colcha de fibra cerámica y 40mm para la fibra de vidrio nos asegura que la temperatura exterior del equipo será aproximadamente de 41°C, temperatura que la piel humana puede resistir sin causar lesiones graves<sup>96</sup>

#### 4.6 ESTRUCTURA

La estructura donde se colocara el equipo gasificador se observa en la figura 18, donde la carga del reactor se liberara en las vigas paralelas situadas en el medio de la estructura y sobre las cuatro columnas o patas, la geometría de la parte superior es para mejorar el anclaje con el gasificador garantizando la estabilidad del equipo.

Figura 18. Geometría de la estructura



<sup>96</sup> SANVITO, Omar. Quemaduras. *Dogliotti y dogliotti*. [En línea]. [Citado el: 8 de Abril de 2016.] [http://www.manopediatrica.com.ar/?p=p\\_83&sName=quemaduras](http://www.manopediatrica.com.ar/?p=p_83&sName=quemaduras).

Se realiza el cálculo para una viga dividiendo la carga soportada, se escoge un perfil estructural de tubo cuadrado por su simplicidad de manejo y de ensamble. Se halla el módulo de sección de perfil necesario para obtener las medidas de sección transversal, siguiendo el método de esfuerzos a flexión<sup>97</sup>.

Se realiza la sumatoria de fuerzas en y de momentos en un punto para hallar las reacciones de acuerdo con la figura 19.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A - 1420.56 + R_B = 0$$

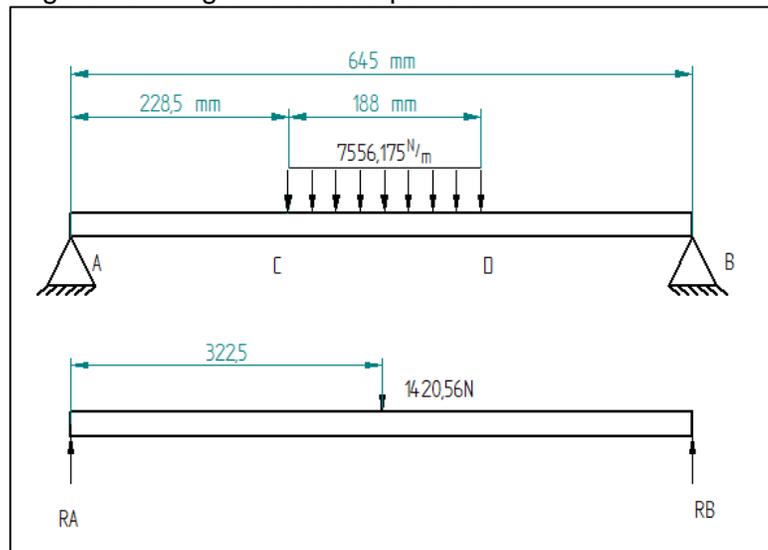
$$\sum M_A = 0$$

$$-(1420.56N \times 0.3225m) + (R_B \times 0.645m) = 0$$

$$R_B = \frac{1420.56N \times 0.3225m}{0.645m} = 710.28N$$

$$R_A = 1420.56N - 710.28N = 710.28N$$

Figura 19. Diagrama de cuerpo libre



Ahora se halla el momento de flexión máximo como se muestra en la figura 20 y 21.

<sup>97</sup> MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. Ed.4 México: Pearson, 2006. p 107, 108.

Figura 20. Momento de corte máximo

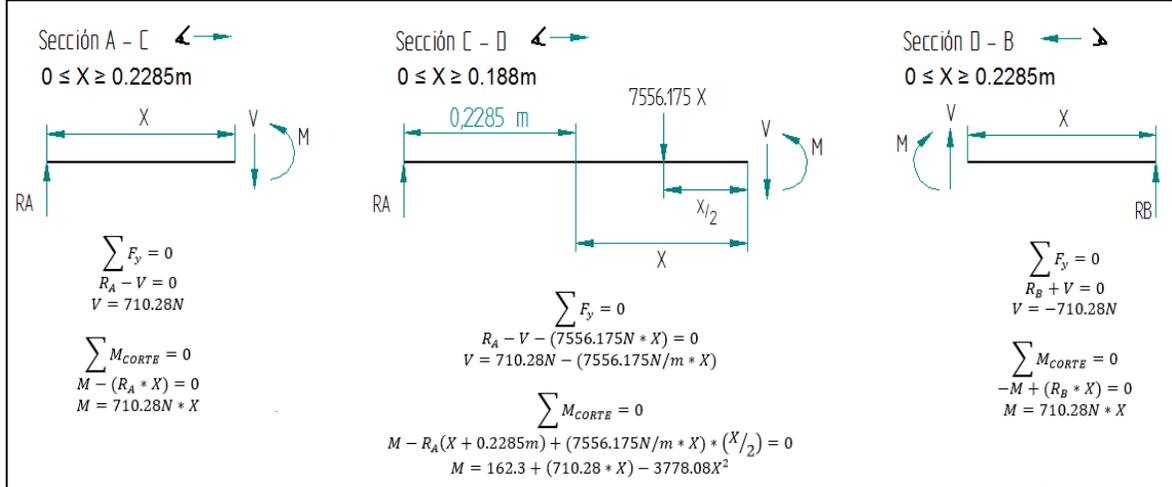
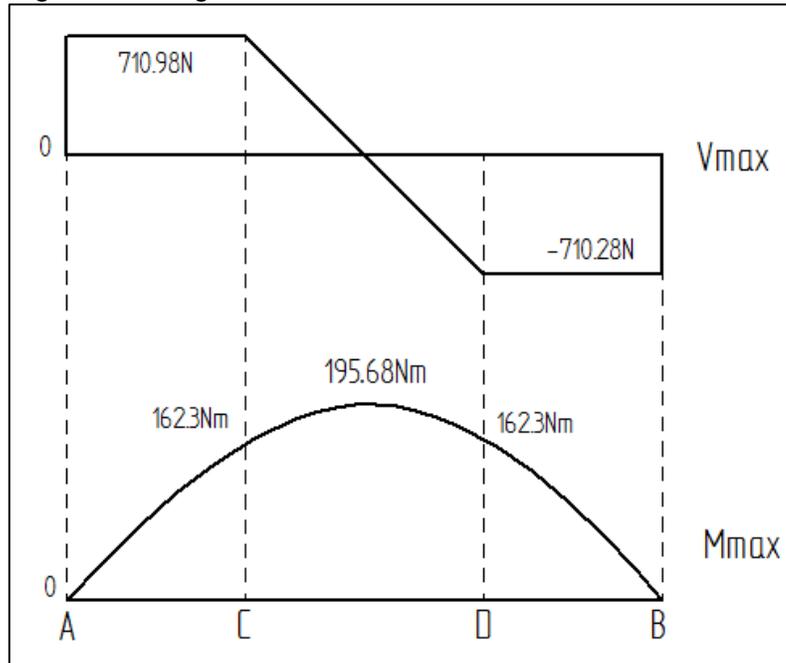


Figura 21. Diagrama de momento máximo



Es necesario tener el esfuerzo permisible para ello se tiene un factor de seguridad de dos y un esfuerzo de falla del material ASTM A500 grado C de 350MPa<sup>98</sup>, entonces el esfuerzo permisible es:

$$\sigma_{permisible} = \sigma_y / F_S$$

<sup>98</sup> Ibid. apéndice 13.

$$\sigma_{\text{permissible}} = 350\text{MPa}/2 = 175\text{MPa}$$

Para obtener el valor del módulo de sección de perfil se utiliza la ecuación 43.

Ecuación 43. Módulo de sección requerido

$$S = M/\sigma_{\text{perm.}}$$

$$S = 195.68\text{Nm}/175 \times 10^6\text{N/m}^2 = 1.12 \times 10^{-6}\text{m}^3 = 1.12\text{cm}^3$$

Se selecciona un perfil del anexo C, que tenga al menos este valor de módulo de sección. El escogido es un perfil estructural tubular cuadrado 25x25x2 con un S de 1.19cm<sup>3</sup>.

Se procede a calcular la pendiente máxima alcanzada debido a la carga, para ello se tiene.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x)$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = 162.3N + 710.28NX - 3778.08NX^2$$

Integrando

$$EI \frac{dy}{dx} = 162.3NX + 355.14NX^2 - 1259.36NX^3 + C_1$$

Condiciones de frontera, cuando x=0 dy/dx=0 entonces C<sub>1</sub>=0. Ya se puede calcular la pendiente máxima que ocurre en el centro de la viga cuando x se hace de 322.5mm.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{162.3N(0.3225m) + 355.14N(0.3225m)^2 - 1259.36N(0.3225m)^3}{(1.48 \times 10^{-8}\text{m}^4)(200 \times 10^9\text{N/m}^2)}$$

$$\frac{dy}{dx} = 15.9\text{mm}$$

Para hallar la flecha máxima se integra la siguiente expresión

$$EI \frac{dy}{dx} = 162.3NX + 355.14NX^2 - 1259.36NX^3$$

$$EIy = 81.15NX^2 + 118.38NX^3 - 314.84NX^4 + C_2$$

Condiciones de frontera, cuando  $x=0$   $y=0$  entonces  $C_2=0$ . Ya se puede calcular la flecha máxima que ocurre en el centro de la viga cuando  $x$  se hace de 322.5mm.

$$y = \frac{81.15N(0.3225m)^2 + 118.38N(0.3225m)^3 - 314.84N(0.3225m)^4}{(1.48 \times 10^{-8}m^4)(200 \times 10^9 N/m^2)}$$

$$y = 3.04mm$$

Se realiza el cálculo de la columna, para ello es necesario determinar la relación de esbeltez y compararla con la constante de la columna para averiguar qué tipo de análisis se realiza. Si la relación de esbeltez es mayor que la constante de la columna es una columna larga y si es menor se debe realizar como una columna corta<sup>99</sup>. La relación de esbeltez se define en la ecuación 44 y la constante de la columna en la ecuación 45.

Ecuación 44. Relación de esbeltez

$$Relacion\ Esbeltez = \frac{kl}{r_{min}}$$

*k* – factor de longitud efectiva  
*l* – longitud del elemento  
*r<sub>min</sub>* – radio minimo

La estructura va empotrada en los extremos entonces el factor de longitud efectiva es de 0.65 ver figura 22. La columna tiene una longitud de 500mm y un radio mínimo de 0.88cm ver anexo c.

$$Relacion\ Esbeltez = \frac{0.65 \times 50cm}{0.88cm} = 36.9$$

Ecuación 45. Constante de la columna

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}}$$

*E* – modulo de elasticidad  
*S<sub>y</sub>* – resistencia de fluencia

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2(200 \times 10^9 N/m^2)}{350 \times 10^6 N/m^2}} = 106.2$$

Entonces  $kl/r < C_c$  la columna es corta y se debe usar la ecuación 46 para calcular la carga crítica, fórmula propuesta por J.B. Johnson:

---

<sup>99</sup> Ibíd. p. 234, 235.

Figura 22. Factor de longitud K

Las líneas interrumpidas muestran la forma pandeada de la columna	a)	b)	c)	d)	e)	f)
						
Valor K teórico	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valores recomendados de diseño cuando las condiciones reales son parecidas a las ideales	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Símbolos para las condiciones de extremo	 Rotación y traslación impedidos  Rotación libre y traslación impedida  Rotación impedida y traslación libre  Rotación y traslación libres					

Fuente: CORMAC, Jack. Diseño de estructuras de acero, Metodo LRFD.

Ecuación 46. Carga crítica para columna corta

$$P_{cr} = AS_y \left[ \frac{1 - S_y \left( \frac{kl}{r_{min}} \right)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

$A$  – área de seccion transversal  $1.90\text{cm}^2$  ver anexo c

$$P_{cr} = (1.9 \times 10^{-4} \text{m}^2)(350 \times 10^6 \text{ N/m}^2) \left[ 1 - \frac{(350 \times 10^6 \text{ N/m}^2) (36.9)^2}{4\pi^2 (200 \times 10^9 \text{ N/m}^2)} \right]$$

$$P_{cr} = 62486.23\text{N}$$

Se aplica un factor de seguridad de dos para determinar la carga permisible que es de 31243.12N este valor seria la resistencia del material de la columna. Ahora se calcula la resistencia de diseño de la columna con la ecuación 47.

Ecuación 47. Resistencia de diseño de una columna

$$R_d = \Phi_r A F_{cr}$$

$\Phi_r$  – factor de resistencia  $0.85^{100}$

$A$  – área de seccion transversal

$F_{cr}$  – esfuerzo critico de pandeo

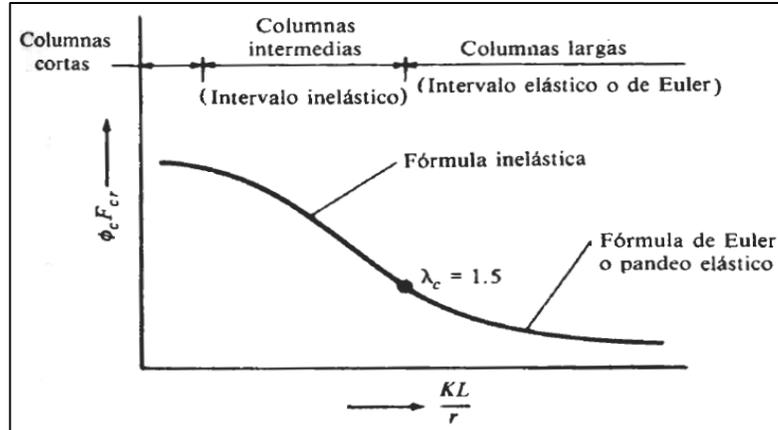
<sup>100</sup> CORMAC, Jack. Diseño de estructuras de acero, Metodo LRFD. Ed. 2 México: Alfaomega. p 146

$$\lambda \leq 1.5 \quad F_{cr} = [0.658^{\lambda^2}] S_y \text{ para columnas cortas ver grafica 5}$$

$$\lambda = \frac{kl}{\pi r_{min}} \sqrt{\frac{S_y}{E}}$$

$\lambda$  – factor de carga

Grafica 5. Esfuerzo critico de pandeo



Fuente: CORMAC, Jack. Diseño de estructuras de acero, Metodo LRFD.

$$\lambda = \frac{(0.65)(50cm)}{\pi(0.88cm)} \sqrt{\frac{(350 \times 10^6 N/m^2)}{(200 \times 10^9 N/m^2)}} = 0.49$$

$$F_{cr} = [0.658^{(0.49)^2}] (350 \times 10^6 N/m^2) = 316536708 N/m^2$$

Una vez hallado el esfuerzo de pandeo se procede a calcular la resistencia de diseño de la columna.

$$R_d = (0.85)(1.9 \times 10^{-4} m^2)(316536708 N/m^2) = 51120.68 N$$

Obtenidos los valores de resistencia del material de la columna y la resistencia de diseño se compara con la carga aplicada a la estructura como lo indica el método del LRDF. La carga no supera la resistencia, esto quiere decir que la columna de perfil tubular cuadrado es segura de utilizar.

$$\text{carga aplicada} \leq \frac{\text{resistencia del material}}{\text{resistencia de diseño}}$$

$$2845 N \leq \frac{31243.12 N}{51120.68 N}$$

## 4.7 VÁLVULAS

El gasificador dual para biomasa residual agropecuaria a nivel laboratorio posee el control sobre el flujo de extracción del gas de síntesis y los desechos generados en el proceso de gasificación, a partir de los siguientes dispositivos mecánicos.

Válvula de bola: es un dispositivo que permite el paso del fluido o lo obstruye completamente generalmente es posible mediante un cuarto de vuelta del manillar<sup>101</sup> su nombre característico se debe a que en su interior posee una esfera con un agujero pasante en su centro por lo general del diámetro de la tubería a conectar ver la figura 23. El sellado es excelente<sup>102</sup> porque la periferia de la esfera hace contacto de manera uniforme con los asientos.

Figura 23. Válvula de bola guiada o *trunnion*



Fuente: ESPECIALISTAS TÉCNICOS EN FLUIDOS DE OCCIDENTE SA DE CV. Válvulas y Medidores de flujo. Válvulas de bola, Esfera o Cierre rápido

Las válvulas en el gasificador serán de tipo de bola guiada o *trunnion* como se ve en la figura 23, la cualidad de este tipo de válvula es que la esfera agujerada se soporta sobre un par de muñones que amortiguarán los esfuerzos producidos por la presión y la temperatura, reduciendo el par operativo, es recomendable en aplicaciones donde se maneje presiones moderadas y altas temperaturas<sup>103</sup>. En la tubería del equipo gasificador se conectarán directamente al tubo por medio de soldadura esto es con el fin de reducir por completo la presencia de fugas además no requiere de mantenimiento operativo<sup>104</sup>. Debido a que se manejarán fluidos que pueden ser corrosivos a elevadas temperaturas y una presión baja en la extracción del gas de síntesis y los gases de combustión producidos por el quemador el

<sup>101</sup> MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. Ed. 6. México : Pearson Educación, 2006. p 312.

<sup>102</sup> VALVIAS. Válvulas de bola (Ball valve). [En línea] [Citado el: 25 de Julio de 2016.] <http://www.valvias.com/tipo-valor-de-bola.php>.

<sup>103</sup> Ibid.

<sup>104</sup> Ibid.

material para el cuerpo de la válvula, para la esfera agujerada y para el asiento en acero inoxidable ASTM A-351 CF8M (AISI-316)<sup>105</sup>

Válvula de cuchilla: es un tipo de válvula de compuerta la característica principal es que posee una especie de guillotina o cuchilla como lo muestra la figura 24 perpendicular al tubo que permite el paso del fluido o lo corta por completo cuando la cuchilla es empujada hacia el asiento evitando atascos<sup>106</sup>. En el gasificador estará operando en la parte inferior donde se acumulan los residuos del proceso de gasificación, se emplea este tipo de válvula por estar especialmente diseñadas en el manejo de fluidos con altos contenidos de sólidos abrasivos, pastosos como el alquitrán, por ser compactas ocupan poco espacio y permiten un sello hermético<sup>107</sup>, debido a las altas temperaturas en el proceso se requiere que el material de construcción de la cuchilla, del cuerpo y del asiento sea de acero inoxidable ASTM A-351 CF8M (AISI-316) ver el anexo D.

Figura 24. Válvula de cuchilla



Fuente: DIRECTINDUSTRY. Erhard. Válvula de guillotina.

---

<sup>105</sup> Ibid.

<sup>106</sup> CV, ESPECIALISTAS TÉCNICOS EN FLUIDOS DE OCCIDENTE SA DE. Válvulas y medidores de flujo. Válvulas de cuchilla. [En línea] [Citado el: 25 de Julio de 2016.] [http://www.valvulasymedidores.com/valvulas\\_de\\_cuchilla.html](http://www.valvulasymedidores.com/valvulas_de_cuchilla.html).

<sup>107</sup> QUIMINET. 2011. Las ventajas de las válvulas de cuchilla. [En línea] 18 de Octubre de 2011. [Citado el: 25 de Julio de 2016.] <http://www.quiminet.com/articulos/las-ventajas-de-las-valvulas-de-cuchilla-2600769.htm>.

## 5. ANÁLISIS DE DISEÑO

El estudio del comportamiento estructural y de transferencia de calor mediante el método de elementos finitos permite dar soluciones aproximadas de los modelos matemáticos bajo un entorno real. Se realizó el análisis de diseño por medio del paquete de cálculo basado en elementos finitos *ANSYS*, mediante el software se logra generar un informe que predice el comportamiento de los materiales y se logra tener conocimiento en los efectos de tensión, compresión, deformaciones, etc.<sup>108</sup>.

### 5.1 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

El desarrollo del estudio de la estructura se realizó mediante la ayuda de la plataforma *ANSYS Workbench* que permite determinar los desplazamientos, tensiones y deformaciones causadas por cargas o fuerzas, esto se realiza mediante el componente *Static Structural* incluido en la plataforma.

5.1.1 Pre-Proceso. En el desarrollo de esta etapa se define la geometría del sólido, se asigna las propiedades físicas del material, se enmalla los componentes y se determinan las condiciones de frontera.

5.1.1.1 Preparación del modelo. Con el fin de que el programa pueda establecer resultados significativos se debe realizar un modelo 3D del objeto a estudiar en un software CAD de dibujo, el modelo de la estructura se realizó en Solid Edge.

Se inspecciona el modelo creado para asegurarse de que el sólido no tenga discontinuidades, ya que esto genera problemas de cálculo durante el procesamiento. Las propiedades del material que se registraron en el programa se observa en el cuadro 15

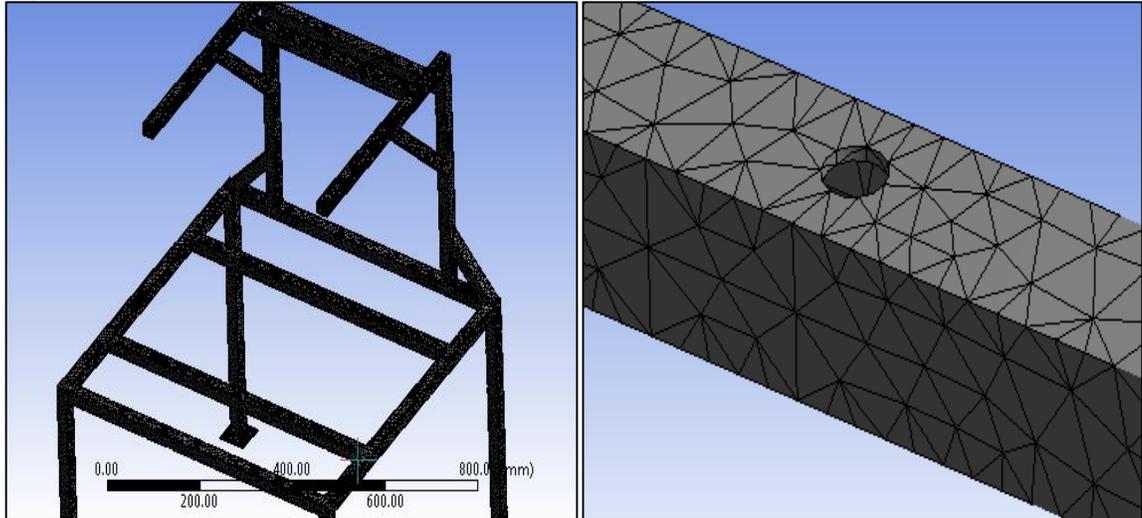
Cuadro 15. Propiedades del Acero estructural ASTM A500 grado C

Densidad	7,85	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Young	201,6	GPa
Coficiente de Poisson	0,26	
Esfuerzo de fluencia	345	MPa
Esfuerzo ultimo a tensión	425	MPa
Módulo de corte	80	GPa

<sup>108</sup> ANSYS. Plataforma ANSYS Workbench. [En línea] [Citado el: 26 de Julio de 2016.] <http://www.ansys.com/Products/Platform>.

5.1.1.2 Enmallado. En este paso se discretizó la estructura en elementos finitos con como lo muestra la figura 25. Para el análisis estático estructural, se tomó en cuenta una malla tetraédrica con una densidad fina. En el cuadro 16 se muestran los detalles del enmallado de la estructura.

Figura 25. Malla de la estructura

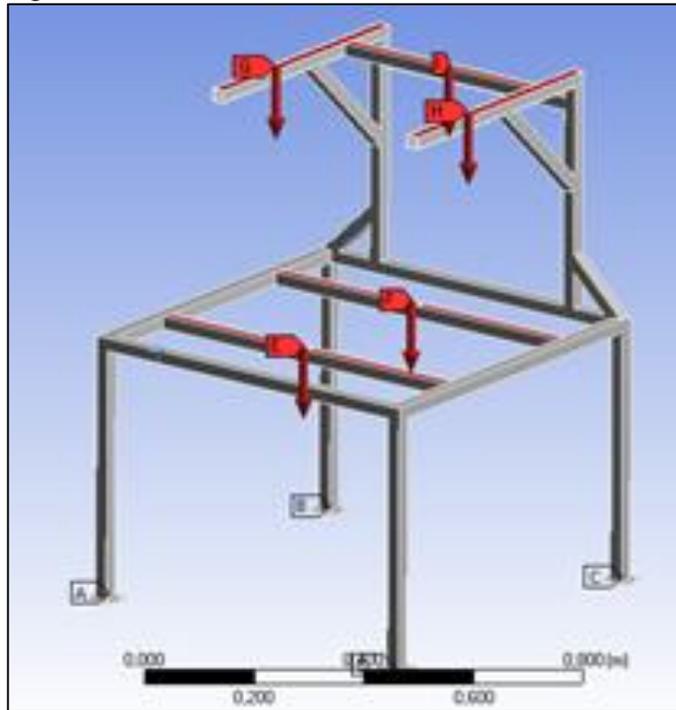


Cuadro 16. Características de la malla

Tamaño del elemento	5	mm
Suavidad	Alto	
Centro de relevancia	Fina	
Mínima longitud del vértice	0,1118	mm

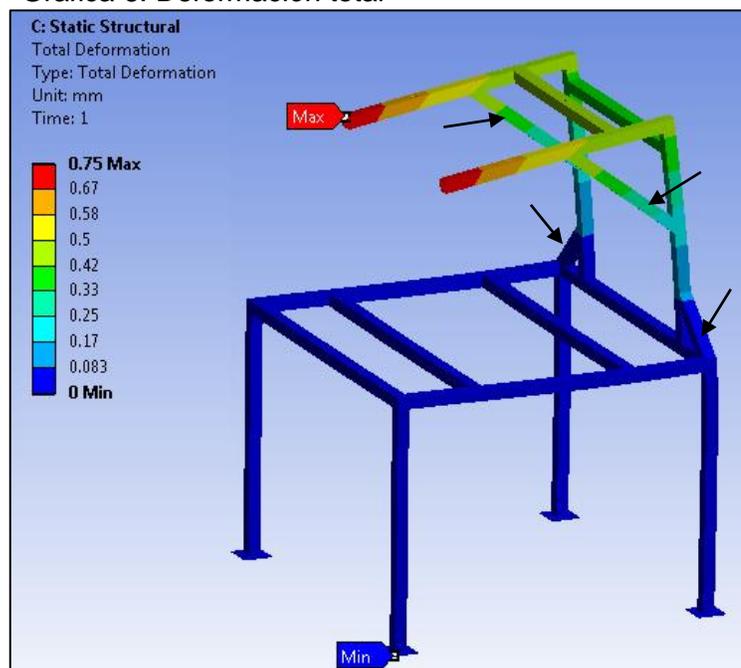
5.1.1.3 Condiciones de frontera. Son las condiciones físicas del sistema que determinan el comportamiento, en la figura 26 se ven los puntos con las letras A, B, C y D que representan los soportes de la estructura. La estructura estaría fija al suelo por medio de tornillos, por lo tanto, en el análisis de elementos finitos se considera una restricción total de sus grados de libertad. Las letras E, F, G, H e I son las superficies donde descansara el gasificador, por lo tanto, la carga total de 2844N se distribuye uniformemente en las mencionadas áreas de contacto.

Figura 26. Condiciones de frontera en la estructura



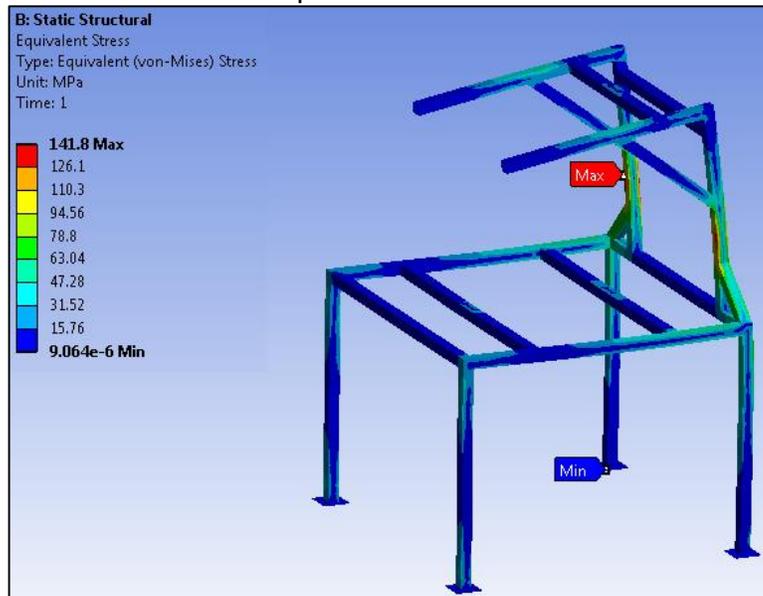
5.1.2 Pos-proceso. Visualización de esfuerzo y deformación de los resultados obtenidos por la simulación.

Grafica 6. Deformación total



La deformación más alta se encuentra en dos puntos de la parte superior en la estructura. Los puntos de menor deformación se encuentran en la parte inferior (los soportes). Adicionalmente se observa un buen comportamiento en el material de la estructura con una deformación menor a 1mm, esto se debe a que se tuvo en consideración la distribución de esfuerzos en la estructura en el momento de diseño agregándole 4 refuerzos señalados en la gráfica 6.

Grafica 7. Esfuerzo equivalente



En la gráfica anterior se utiliza el esfuerzo máximo que arrojó el software para calcular el factor de seguridad

Ecuación 48. Factor de seguridad

$$FS = \frac{\delta \text{ falla del material}}{\delta \text{ calculado}}$$

$$FS_1 = \frac{345 \text{ MPa}}{141,8 \text{ MPa}} = 2.43$$

El resultado anterior es cercano al elegido en los cálculos de diseño de la estructura. Se garantiza la confiabilidad del diseño de la estructura, pues no fallará a menos de que se duplique la carga.

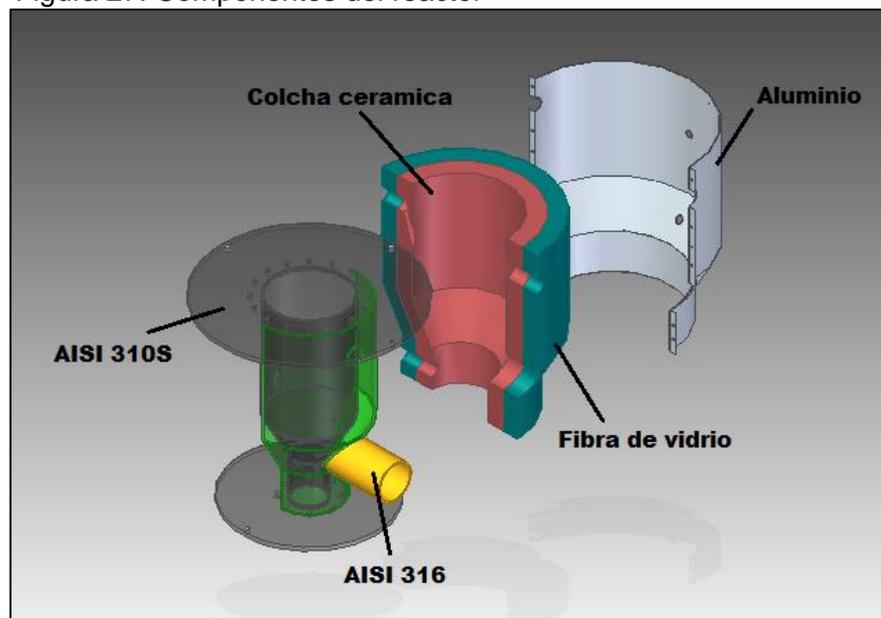
## 5.2 SIMULACIÓN TÉRMICA

El desarrollo del estudio del reactor se realizó mediante la ayuda de la plataforma *ANSYS Workbench* que permite determinar la distribución de temperatura en estado estable y flujo de calor mediante el componente *Steady-State Thermal* incluido en la plataforma.

### 5.2.1 Pre-Proceso.

5.2.1.1 Preparación del modelo. Se realizó el modelo 3D en el software Solid Edge, el modelo contiene el cuerpo del reactor, dos capas de aislante térmico y una superficie exterior de aluminio como se percibe en la figura 27 las propiedades de los materiales que se ingresaron manualmente se observan de los cuadros 17 al 21.

Figura 27. Componentes del reactor



Cuadro 17. Propiedades del acero inoxidable AISI 310S

Densidad	7,9	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Young	190	GPa
Coeficiente de Poisson	0,3	
Esfuerzo de fluencia	310	MPa
Esfuerzo ultimo a tensión	655	MPa
Conductividad térmica (900°C)	18,05	W/mK
Dilatación térmica (1000°C)	18,9	µm/mk

Cuadro 18. Propiedades de la colcha de vidrio

Densidad	192	g/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica (982°C)	0,32	W/mK
Dilatación térmica (1000°C)	18,9	μm/mk
temperatura máxima de funcionamiento	1100	°C

Cuadro 19. Propiedades de la fibra de vidrio

Densidad	2,58	g/cm <sup>3</sup>
Conductividad térmica (500°C)	0,05	W/mK
Dilatación térmica (700°C)	5,4	μm/mk
Temperatura máxima de funcionamiento	730	°C

Cuadro 20. Propiedades del aluminio

Densidad	2,68	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de young	68,3	GPa
Coeficiente de Poisson	0,34	
Esfuerzo de fluencia	145	MPa
Esfuerzo ultimo a tensión	186	MPa
Conductividad térmica (200°C)	209	W/mK
Dilatación térmica (300°C)	23	μm/mk

Cuadro 21. Propiedades del acero inoxidable AISI 316

Densidad	8000	Kg/m <sup>3</sup>
Coeficiente de Poisson	0.25	
Esfuerzo de fluencia	200	MPa
Esfuerzo ultimo a tensión	550	MPa
Conductividad térmica (800°C)	21.5	W/mK
Dilatación térmica (900°C)	18.5	μm/mk

5.2.1.2 Enmallado. Para el trabajo de análisis de transferencia de calor en estado estacionario computacional se tomó en cuenta una malla tetraédrica con el propósito de que la simulación genere efectos similares a la realidad. Los detalles de la malla del reactor se muestran en el cuadro 22.

Figura 28. Enmallado del reactor

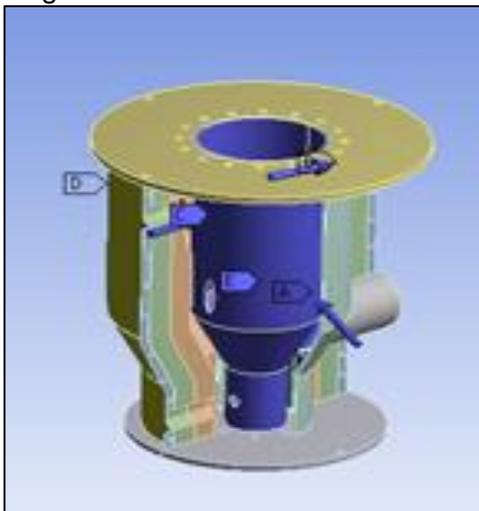


Cuadro 22. Características de la malla

Tamaño del elemento	10	mm
Suavidad	Alto	
Centro de relevancia	Fina	
Mínima longitud del vértice	0,6656	mm

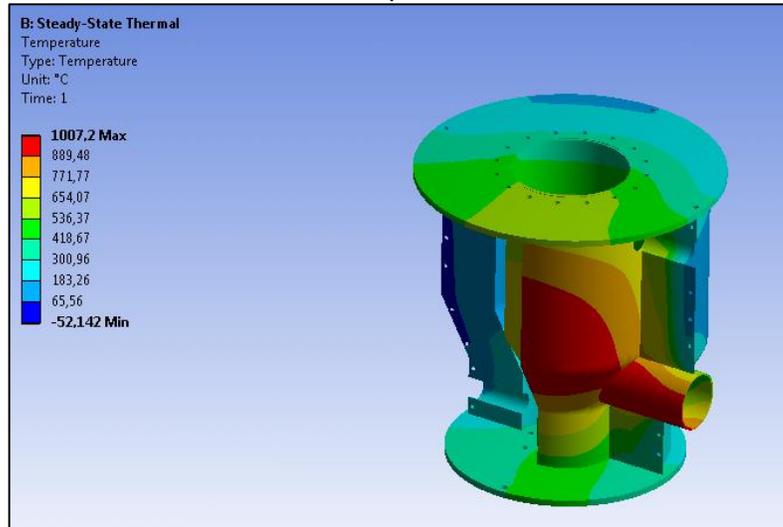
5.2.1.3 Condiciones de frontera. Son las condiciones físicas del sistema que determinan su comportamiento, en la figura 32 se ven los puntos con las letras A, B y C, son superficies donde el quemador suministra el calor para llevar a cabo el proceso termoquímico en aquellas superficies se colocó la temperatura de funcionamiento del gasificador  $900^{\circ}\text{C}$ , en el exterior del reactor con letra D se colocó el valor de transmisión de calor por convección del medio ambiente de la ciudad de Bogotá D.C.  $25\text{W}/\text{mm}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 29. Condiciones de frontera



5.2.2 Pos-proceso. En la siguiente grafica se observa la distribución de temperaturas en el gasificador, los datos obtenidos de la simulación se acercan con los calculados en la selección del aislante térmico. Se confirma que la temperatura en la superficie exterior es de 45°C esto se traduce en seguridad industrial ya que si por algún motivo ocurre un accidente de contacto involuntario con el gasificador no se transforma en lesiones considerables.

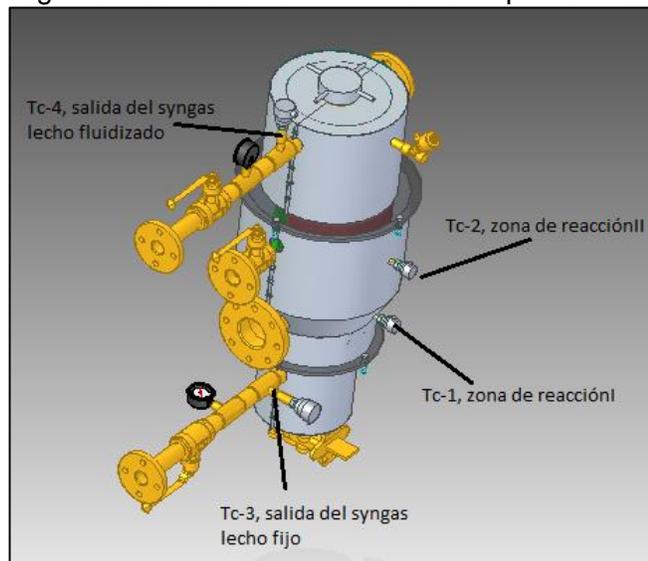
Grafica 8. Distribución de temperatura



## 6. MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Se crea una programación grafica en el software LabVIEW con el fin de registrar los datos de temperatura en los diferentes puntos del gasificador. Se utiliza una tarjeta que tenga la capacidad de realizar la adquisición de datos provenientes de los termopares. La temperatura será tomada en cuatro puntos clave, dos situados en la zona de reacción, uno a la salida del gas de síntesis cuando funcione en lecho fijo y otro punto a la salida del gas de síntesis cuando opere en lecho fluidizado. En la figura 30 indica los puntos a ser medidos donde Tc-1-Termopar I, Tc-2-Termopar II, Tc-3-Termopara III, Tc-4-Termopar IV.

Figura 30. Puntos de medición de temperatura.



A continuación se enuncian los dispositivos que se utilizarán en la configuración para medir la temperatura de los diferentes puntos en el gasificador.

### 6.1 TERMOPAR

Es el sensor a utilizar para medir la temperatura, el cual está compuesto por dos alambres conductores de electricidad de diferente material unidos en un extremo. Cuando se eleva o disminuya la temperatura en la unión se genera una tensión de voltaje que es función de la temperatura.<sup>109</sup> Los termopares que se utilizarán son de tipo K ya que permite la medición de grandes temperaturas hasta el rango de 1300°C<sup>110</sup> en ambientes oxidantes, el termopar tipo k consiste en dos alambres metálicos (cromo/Aluminio), la tensión que emite es del orden de los milivoltios.

<sup>109</sup> TERMOKEW, S.A. de C.V. Termopares. [En línea] [Citado el: 7 de Julio de 2016.] <http://www.termokew.mx/termopares.php>.

<sup>110</sup> Ibid.



el circuito integrado AD595 es de +12.5V<sup>112</sup>. Para calcular las resistencias que integraran el circuito impreso se emplea la ecuación 49

Ecuación 49. Voltaje de salida en un divisor de voltaje.

$$V_{sal} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{ent}$$

Se conoce los valores de voltaje en condiciones máximas ver la tabla de linealización de temperatura versus voltaje del circuito integrado AD595 en el anexo E luego se despeja R<sub>1</sub> de la ecuación 49 después de despejar se elige cualquier valor para R<sub>2</sub> el designado es de 200 Ohm.

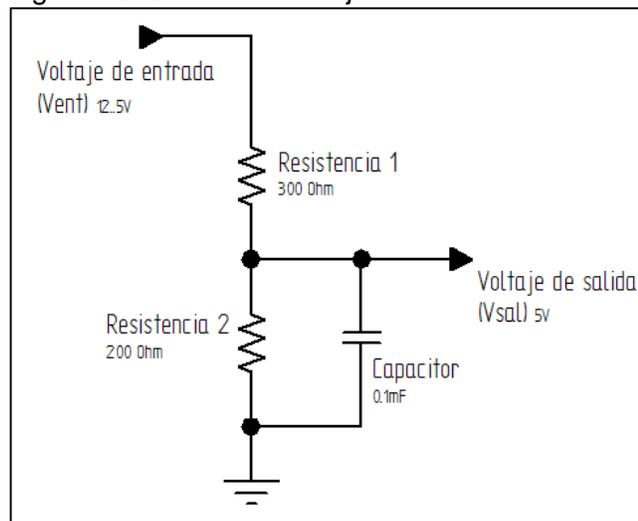
$$R_1 = \left( \frac{R_2 \times V_{ent}}{V_{sal}} \right) - R_2$$

$$R_1 = \left( \frac{200\text{Ohm} \times 12.5\text{V}}{5\text{V}} \right) - 200\text{Ohm}$$

$$R_1 = 300\text{Ohm}$$

Conocidas las resistencias seguir la información de la figura 32 para el empalme de la salida de señal del circuito integrado AD595 a la tarjeta de adquisición. El capacitor que se encuentra allí es de 0.1µF y es para evitar el ruido eléctrico.

Figura 32. Divisor de voltaje



Fuente: TECNOLOGIA, AREA. Divisor de tensión.

<sup>112</sup> ALLDATASHEET.ES. AD595 Datasheet, Analog Devices. [En línea] [Citado el: 10 de Julio de 2016.] <http://html.alldatasheet.es/html-pdf/48077/AD/AD595/19/1/AD595.html>.

El circuito de la figura 33 será copiado en la superficie de cobre de una placa fenólica y el diagrama de elementos de la figura 34 será copiado en la superficie contraria. Para realizar la construcción de la placa impresa siga las indicaciones del tutorial de circuitos impresos<sup>113</sup>. En el anexo F se puede observar el tamaño real del diseño del circuito y diagrama de elementos para las impresiones, además de las dimensiones para la placa fenólica

Figura 33. Diseño del circuito para medición temperatura

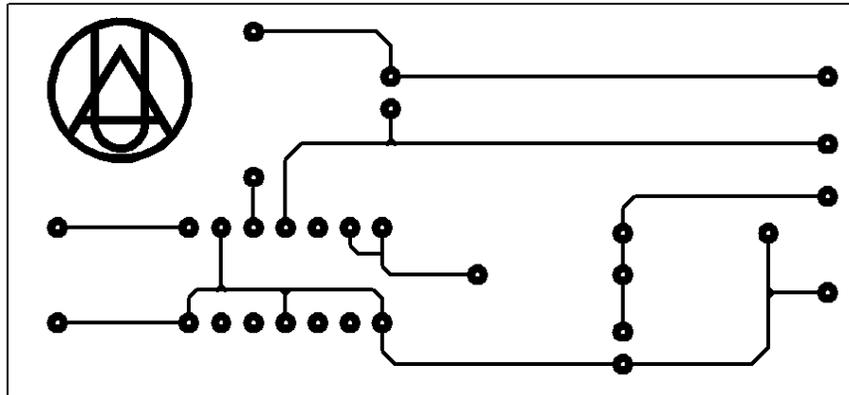
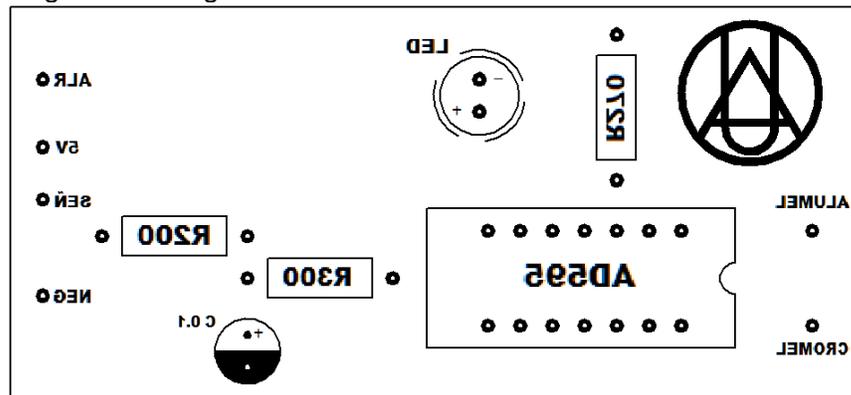


Figura 34. Diagrama de elementos electrónicos



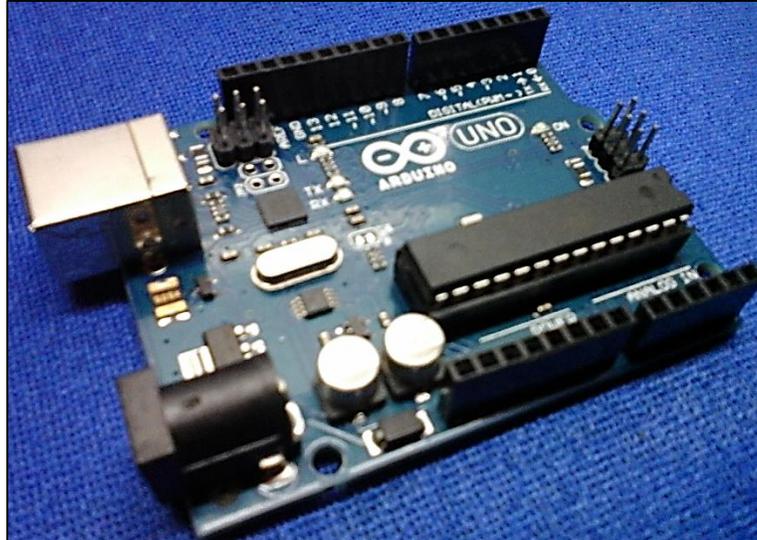
Para evitar interferencias de señal y mejorar la precisión de la misma es preferiblemente soldar directamente a la placa fenólica los cables del termopar y el circuito integrado AD595

<sup>113</sup> TERRAZOCULTOR, Jose Manuel. YOU TUBE. Tutorial#Electrónica Básica.Cómo hacer circuitos impresos PCB (I). [En línea]. [https://www.youtube.com/watch?v=anadeSIFI\\_A](https://www.youtube.com/watch?v=anadeSIFI_A).

### 6.3 TARJETA DE ADQUISICIÓN

La plataforma que va permitir la comunicación de datos con el software LabVIEW es la placa Arduino UNO ver figura 35, estas tarjetas proporcionan la lectura de señales analógicas y digitales como puede ser la luz en un sensor, oprimir algún botón, le señal de termopares. Convirtiendo estas señales de entrada en salidas como encender un diodo emisor de luz, activar un cilindro o un motor<sup>114</sup>.

Figura 35. Tarjeta Arduino



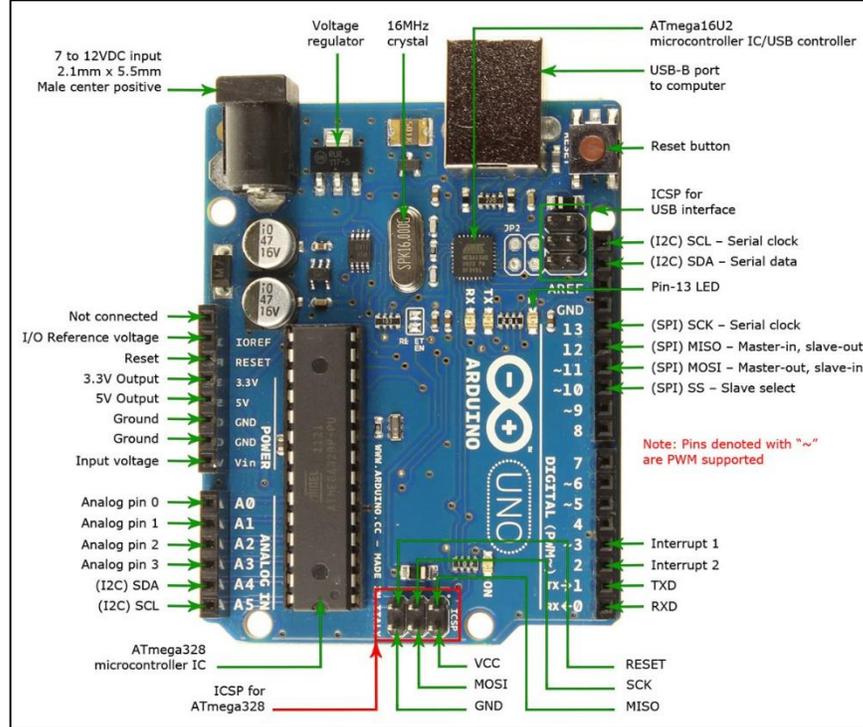
Para conectar la tarjeta impresa con la placa Arduino se recurre a la ficha de datos como se ilustra en la figura 36, donde cuenta con una conexión USB, una conexión de alimentación, 6 pines analógicos y 14 pines digitales entrada/salida entre otros<sup>115</sup>. En el anexo G va encontrar el diagrama de conexión unitaria de los elementos necesarios para la medición de temperatura para un solo punto del gasificador como también se podrá observar un diagrama de conexión total para la respectiva medición de temperatura en los 4 puntos del gasificador. Siga las instrucciones del anexo H para poder realizar la conexión de la tarjeta Arduino con el equipo ordenador y el software LabVIEW.

---

<sup>114</sup> ARDUINO, USA ONLY, Op. cit.

<sup>115</sup> Ibid.

Figura 36. Ficha de datos de la tarjeta Arduino UNO



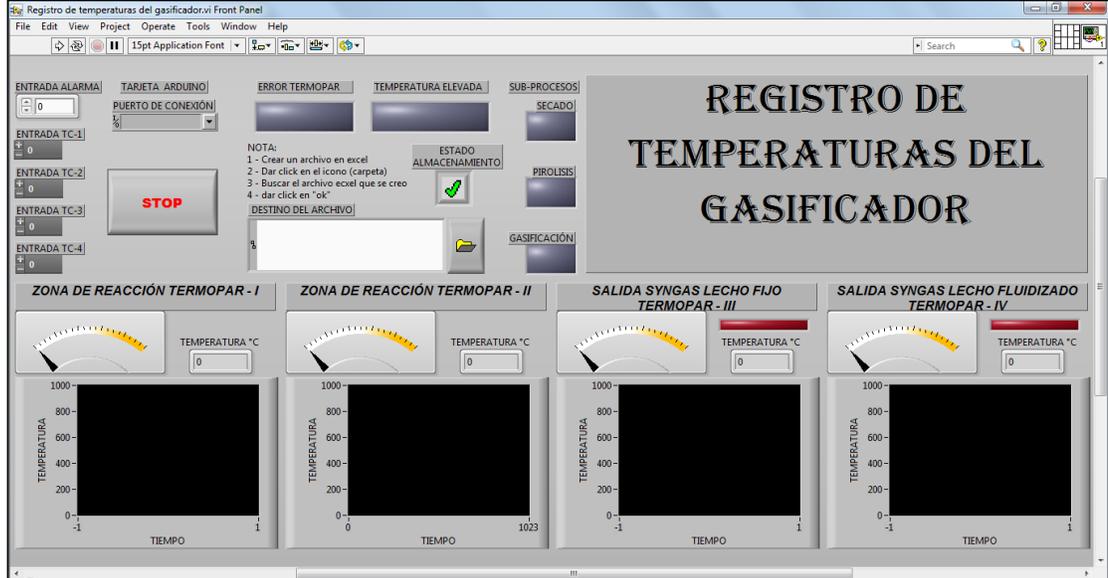
Fuente: LINUX.SU. Arduino: Kid en un millón.

## 6.4 LABVIEW

Es un software diseñado para apresurar la productividad en el área de la ingeniería y científica, funciona con un lenguaje de programación gráfico sencillo de interpretar ayuda a crear, visualizar, limitar tiempos, almacenar datos utilizados en proyectos de ingeniería. En el proyecto se utiliza el software para conocer y registrar la temperatura en el interior del gasificador.

El panel frontal de la figura 37 consta de 1 puerto para indicar en que entrada USB del computador está conectado la tarjeta Arduino, 1 puerto para conectar la señal de alarma del circuito impreso, 4 puertos para la señal del termopar, contiene un sistema de registro de datos, se visualizan las gráficas identificadoras de la temperatura en los distintos puntos para poder compararlas, 3 focos de luz que nos indicaran en que subproceso de gasificación se encuentra el equipo, 2 focos de luz indicaran si el gas de síntesis está a la temperatura indicada para extraerlo según el funcionamiento en que se trabaje el gasificador y se observa 2 focos de alarma si el equipo supera los 950°C o si hay algún error con el termopar. Los focos de luz funcionan normalmente apagados. La aplicación está diseñada para apagarse con el botón de *stop* o si hay algún error en la comunicación de la placa Arduino con el computador o si ocurre algún error con el sistema de registro de datos.

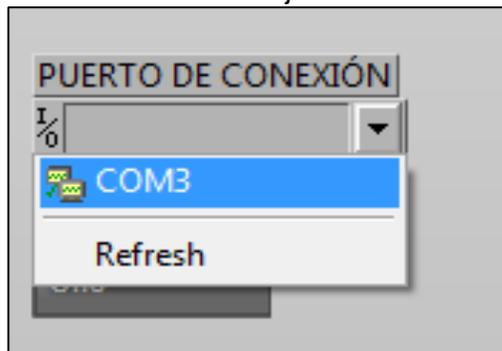
Figura 37. Panel frontal



A continuación se mostrara paso a paso como iniciar el registro de datos.

Conecte la tarjeta Arduino al equipo PC, siga las instrucciones del anexo H luego como muestra la figura 38 en el panel frontal donde dice puerto de conexión dar clic en la flecha para que despliegue las opciones luego seleccionar el puerto donde está conectada la tarjeta.

Figura 38. Selección del puerto al que está conectado la tarjeta Arduino



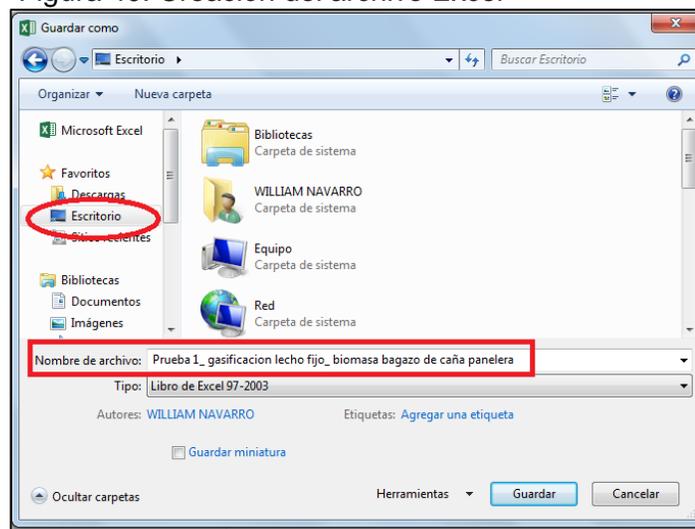
Como se ve en la figura 39 se digita el pin donde se encuentra la señal de alarma y la de cada termopar, la señal emitida por el circuito impreso es de tipo análoga por lo tanto la articulación de los termopares con la tarjeta de Arduino debe estar a los pines A0, A1, A2... en estos pines va las salida del circuito impreso. Las salidas negativas de los termopares se conectan de forma paralela para ir a un pin común de la tarjeta Arduino GND ver el anexo G el diagrama de conexión total de los elementos electrónicos.

Figura 39. Configuración de las entradas análogas



Realizado esto se abre un archivo Excel y se guarda, ver figura 40 tener en cuenta el nombre del archivo y en qué lugar de la PC quedo guardado, porque allí será donde queden registrados los datos de temperatura del gasificador.

Figura 40. Creación del archivo Excel



En el panel frontal del registro de temperaturas damos clic en el icono de la carpeta y buscamos en donde quedo el archivo Excel creado en el paso anterior de ahí también la importancia como lo muestra la siguiente figura

Figura 41. Camino para guardar los datos

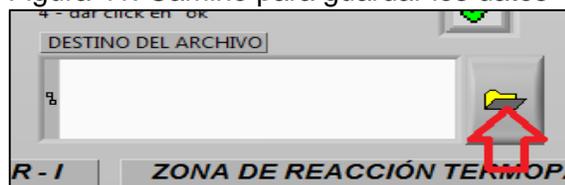
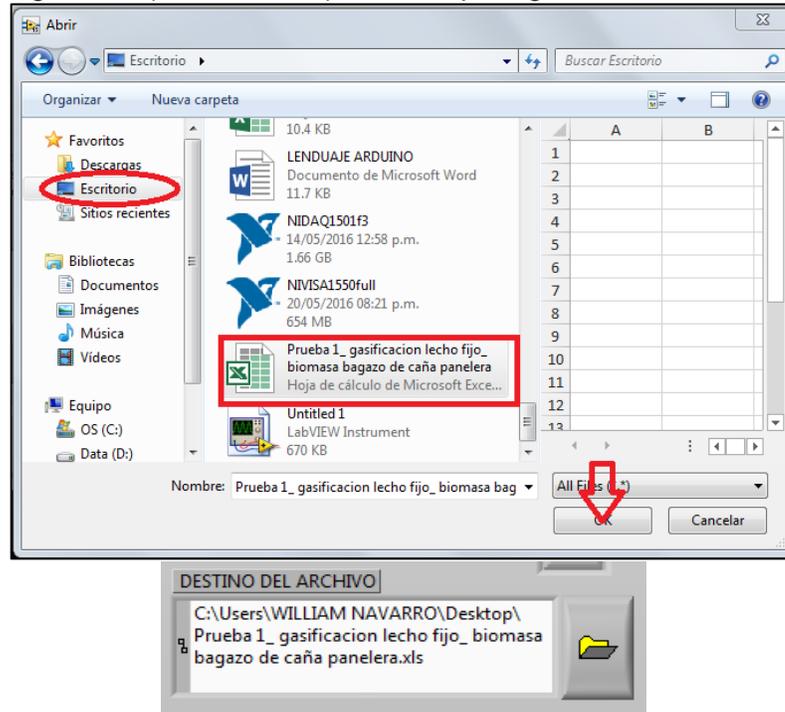
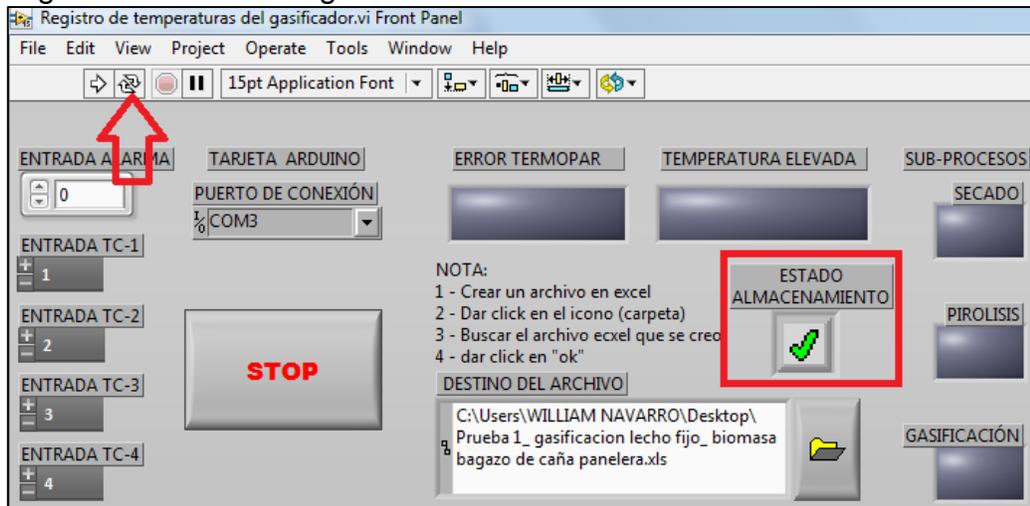


Figura 41. (Continuación), Camino para guardar los datos



Ahora solo queda poner en marcha la lectura de temperatura en el gasificador como se observa en la figura 42, estar pendiente de que los datos se registran y se guardan correcta mente, en caso de aparecer una "X" verifique la línea de destino del archivo

Figura 42. Iniciar el registro de datos



Cuando se termine la práctica simplemente damos clic al botón de paro como se observa en la figura 43, los archivos quedan guardados automáticamente, luego se podrá abrir el archivo Excel para su respectivo análisis ver la figura 44. El diagrama de programación de gráficos vi se encuentra en el anexo I.

Figura 43. Culminación del registro de datos

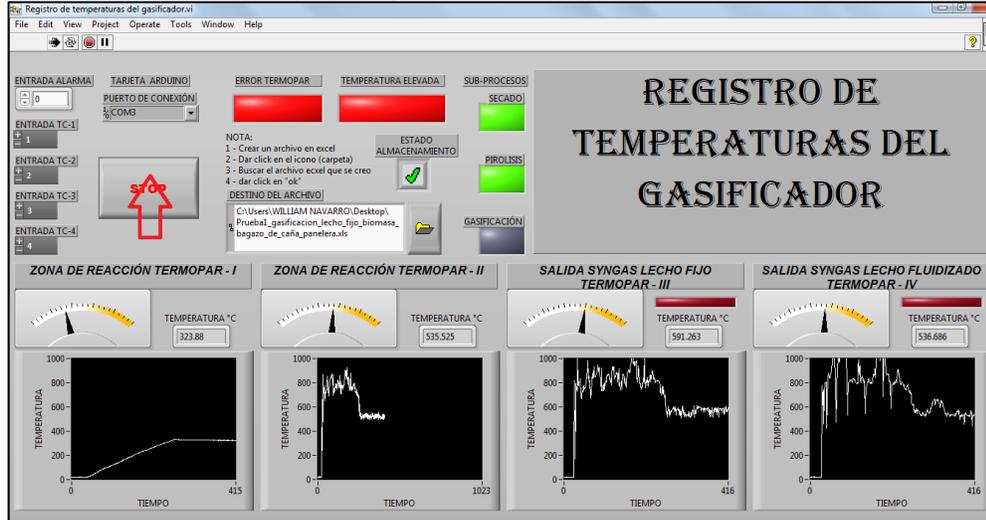


Figura 44. Archivo Excel con sus respectivos datos guardados

Prueba1\_gasificacion\_lecho\_fijo\_biomasa\_bagazo\_de\_caña\_panellera - Microsoft Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	FECHA	HORA	Tc-1, Zona de reacción I	Tc-2, Zona de reacción II	Tc-3, Syngas lecho fijo	Tc-4, Syngas lecho fluido					
2											
3	21/07/2016	05:53 a.m.	19.540539	19.540539	20.771368	19.540539					
4	21/07/2016	05:53 a.m.	20.771368	20.771368	20.771368	22.000902					
5	21/07/2016	05:53 a.m.	19.540539	20.771368	20.771368	19.540539					
6	21/07/2016	05:53 a.m.	20.771368	20.771368	20.771368	20.771368					
7	21/07/2016	05:53 a.m.	20.771368	22.000902	20.771368	20.771368					
8	21/07/2016	05:53 a.m.	20.771368	20.771368	22.000902	22.000902					
9	21/07/2016	05:53 a.m.	19.540539	22.000902	20.771368	22.000902					
10	21/07/2016	05:53 a.m.	19.540539	18.308451	19.540539	20.771368					
11	21/07/2016	05:53 a.m.	20.771368	20.771368	19.540539	22.000902					
12	21/07/2016	05:53 a.m.	20.771368	20.771368	20.771368	22.000902					
13	21/07/2016	05:53 a.m.	19.540539	22.000902	20.771368	19.540539					
14	21/07/2016	05:53 a.m.	20.771368	19.540539	18.308451	20.771368					
15	21/07/2016	05:53 a.m.	20.771368	22.000902	20.771368	20.771368					
16	21/07/2016	05:53 a.m.	19.540539	19.540539	19.540539	20.771368					

## 7. CONCLUSIONES

- En este proyecto de investigación en el área de Energías Alternativas de la Fundación Universidad de América se diseñó un gasificador de biomasa residual agropecuaria a nivel laboratorio para obtener gas de síntesis por medio de dos tipos de operaciones gasificantes, es pertinente mencionar que la limitación del equipo diseñado es el operar de manera paralela esto hace referencia a que no permite el doble funcionamiento gasificante durante una operación.
- En el desarrollo del trabajo se estudiaron, analizaron y eligieron los cultivos que presentaron abundancia de residuos por los cultivos permanentes y transitorios de Colombia en el departamento de Cundinamarca; destacándose las siembras de caña panelera, palma de aceite, mango, café y papa. La información de cada residuo de biomasa en los cultivos mencionados se priorizó en función de su aprovechamiento en el proceso de gasificación, lo que permitió determinar que en el departamento el cultivo de caña panelera es un potencial generador de residuos en volumen al igual que el cisco de café y que son favorables para la producción de gas de síntesis.
- La información recolectada sobre las características de cada tipo de gasificador de biomasa existente fortaleció la selección del equipo gasificador; demostrando que el reactor de lecho fijo de flujo paralelo es el adecuado para procesar los residuos de biomasa generados por el cultivo de caña panelera debido a su simplicidad de operación, a que produce una gran proporción de gas de síntesis con un bajo contenido de alquitrán, se maneja bien con materias que contengan un alto grado de cenizas y un porcentaje de humedad bajo. Para el cisco de café el reactor elegido es el fluidizado de lecho burbujeante por la característica de obtener gas de síntesis con porcentajes muy bajos de alquitrán, esto se debe a la dimensión, a la distribución uniforme de temperatura, al bajo contenido de cenizas, proporción de humedad baja y material volátil alto en el residuo.
- En el proceso de diseño detallado se presentó un cambio en el cálculo de los agujeros de la placa distribuidora para cuando opere en lecho fluidizado burbujeante, esto debido al tipo de biomasa que se desea gasificar puesto que no todos los residuos de biomasa necesitan la misma velocidad de entrada de agente gasificante y no todos se pueden gasificar en lechos fluidizados; esto conllevó a modificaciones drásticas en el número de agujeros en la placa. Para velocidades de agente gasificante de 1m/s se necesitan 10 agujeros para poder fluidizar el cisco de café pero si la velocidad cambia a 2m/s los agujeros requeridos serian 31. Solo queda decir que es necesario realizar pruebas de laboratorio a los residuos de biomasa que se desean gasificar en reactores de lecho fluidizado para obtener las propiedades fisicoquímicas de las materias primas en cuestión y así corroborar los datos obtenidos por medio de la revisión del estado del arte.

- El análisis de esfuerzos mediante el software de elementos finitos ANSYS permitió confirmar los datos calculados, definiendo el comportamiento de deformación del soporte donde ira apoyado el equipo de gasificación, los resultados conseguidos durante la simulación mostraron que el acero estructural ASTM A500 grado C es el adecuado para soportar las cargas sin sufrir un cambio considerable en su periferia. Como resultado en el desarrollo de la simulación térmica es posible afirmar que los datos obtenidos se acercan a los calculados en la sección de aislante térmico, puesto que a 45°C en la capa exterior, dicho aislamiento responde a las necesidades de seguridad en la operación del gasificador; esto corresponde a que en el diseño se consideró el empleo de aislantes por paredes compuestas.
- El desarrollo de la aplicación mediante la ayuda del instrumento virtual LabVIEW permitirá la medición, visualización y registro de datos de temperatura sobre puntos estratégicos en el gasificador; el diseño de un circuito impreso que involucra el acoplamiento del circuito integrado AD595 permite amplificar, compensar, linealizar y mitigar el ruido de la señal producida por el termopar tipo K.

## 8. RECOMENDACIONES

- Desarrollar a nivel experimental la caracterización fisicoquímica de los tipos de residuos de biomasa seleccionados (cisco de café, bagazo y hojas de caña panelera); así como el análisis de la cinética química de las reacciones que ocurren en el gasificador cuando opere en lecho fijo y en lecho fluidizado con los residuos de biomasa mencionados.
- Debido a que en el presente proyecto no se contemplaron los sistemas auxiliares de funcionamiento en el diseño del gasificador dual para biomasa residual agropecuaria a nivel laboratorio, porque están dentro de las limitaciones del proyecto de investigación; se sugiere realizar el proceso de diseño detallado del sistema de alimentación de biomasa, así como el sistema de abastecimiento de los diferentes agentes gasificantes para garantizar el apropiado funcionamiento del reactor planteado.
- De acuerdo con lo anterior cabe mencionar que para beneficiar el funcionamiento del equipo diseñado y sistemas auxiliares a diseñar, es de importancia agregar una red de control en los distintos actuadores que se contemplaran, esto favorecería las pruebas de valorización y caracterización de los residuos de biomasa. Se recomienda llevar a cabo dicha red de control mediante la ayuda de un software de instrumentación virtual que se sume al sistema de adquisición de datos de temperatura realizado en este proyecto de investigación.
- En el mercado se encuentran diferentes gamas de quemadores para diferentes aplicaciones sin embargo es recomendable, el diseño en detalle de un quemador donde su combustible principal sean los desechos provenientes del sector agropecuario o industrial, porque se encuentran muchos residuos que no tienen algún tipo de valorización.

## BIBLIOGRAFÍA

ACERINOX. Ficha de tipo de acero. [En línea] [Citado el: 19 de Marzo de 2016.] <http://www.acerinox.com/es/productos/tipos-de-acero/tsacxtipoacero/EN-1.4845---AISI-310S/>.

AGUIRRE, Eduardo. *El petróleo: una visión sencilla de nuestra industria petrolera*. Argentina : El Cid Editor - Ingeniería, 2007. OCLC 847479971.

AKT MOTOS. Manual de servicio AK 125 SLR - NKDR. Septiembre de 2011.  
—. Manual del usuario AK 125 SLR - NKDR.

ALBACETE, Instituto bachiller sabuco. Las revoluciones industriales. [En línea] [Citado el: 30 de Julio de 2015.] <<http://bachiller.sabuco.com/historia/revolucionesindustriales.htm>>.

ALLDATASHEET.ES. AD595 Datasheet, Analog Devices. [En línea] [Citado el: 10 de Julio de 2016.] <http://html.alldatasheet.es/html-pdf/48077/AD/AD595/19/1/AD595.html>.

ANSYS. Plataforma ANSYS Workbench. [En línea] [Citado el: 26 de Julio de 2016.] <http://www.ansys.com/Products/Platform>.

ARDUINO, USA ONLY. Arduino y Genuino products, Arduino UNO y Genuino UNO . [En línea] [Citado el: 10 de Julio de 2016.] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno?setlang=en>.

ARENAS CASTIBLANCO, Erika. LONDONO, Carlos. CHEJNE, Farid. *Biomasa y Carbón: Una alternativa energética para Colombia*. Colombia : Gerencia Creativa, 2006. Vol. 1. ISBN 958339095X.

ASME, American Society of Mechanical Engineers. UG-27 Thickness of shells under internal pressure. New york : The American Society of Mechanical Engineers, 1989.

ASOHOFrucOL y CORPOICA. Modelo tecnológico para el cultivo del mango en al Valle del alto Magdalena en el Departamento del Tolima. Bogotá, D.C. : Prensa-Asohofrucol, Mayra Suarez, 2013.

BUDYNAS, R. NISBETT, K. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F. : McGraw-hill, 2008. ISBN 9786071507716.

CASILLAS, A. Máquinas, cálculos de taller. Ed. 27. Madrid, España : copyright by ediciones máquinas, 1974.

CASTELLS, Elías.VELO, Enric. *La gasificación*. España : Ediciones Díaz de Santos, 2012. ISBN 9788499691305.

COLEGIO24HS. *Energía atómica*. Argentina : Colegio24hs, 2004. OCLC 780217271.

COLMENA, Acero en revolución. Perfil estructural tubular. [En línea] [Citado el: 11 de Mayo de 2016.] [http://www.tuboscolmena.com/web/fichas/ESTRUCTURAL\\_CERRADO.pdf](http://www.tuboscolmena.com/web/fichas/ESTRUCTURAL_CERRADO.pdf).

COLOMBIA, EPM. Energía: Parque eólico Jepírachi. [En línea] [Citado el: 14 de Agosto de 2015.] <<http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/ParqueE%C3%B3lico.aspx>>.

COLOMBIA, UNIVERSIDAD NACIONAL, IPSE, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. *Centro de innovación tecnológica con énfasis en gasificación*. (1a.ed.). Medellín : s.n., 2011. ISBN 9789589971352.

COLOMBIA, UPME. Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia. Bogotá : Aene consultoría S.A, 2003. Revisión 01. ANC-631-03.

COORDINACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES, DIRECCIÓN NACIONAL DE PROMOCIÓN y SUBSECRETARIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA. *Energías renovables: Energía Biomasa*. Argentina : Secretaría de Energía, 2008.

CORMAC, Jack. Diseño de estructuras de acero, Metodo LRFD. Ed. 2 México : Alfaomega. ISBN 9701506375.

CV, ESPECIALISTAS TÉCNICOS EN FLUIDOS DE OCCIDENTE SA DE. Válvulas y medidores de flujo. *Válvulas de cuchilla*. [En línea] [Citado el: 25 de Julio de 2016.] [http://www.valvulasymedidores.com/valvulas\\_de\\_cuchilla.html](http://www.valvulasymedidores.com/valvulas_de_cuchilla.html).

DEL PILAR, E. VACCA, E. LUGO, I. Diseño y fabricación de un vehículo autónomo impulsado por energía solar. 2012. Vol. XVI, 32. ISSN 0123921X.

DÍAZ, Felipe. Gasificación de carbón en Chile, para obtención de hidrógeno y electricidad en planta de ciclo combinado. Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2007. Tesis para optar el grado de magister, mención en química y título de ingeniero civil en biotecnología.

DIRECTINDUSTRY. Erhard. *Válvula de guillotina*. [En línea] [Citado el: 25 de Julio de 2016.] <http://www.directindustry.es/prod/erhard/product-119545-1282871.html>.

DOMÍNGUEZ GÓMEZ, José Antonio. *Energías alternativas*. (3a.ed.). España : Equipo Sirius, 2008. ISBN 9788495495884.

DURAN, Ricardo. ROPAIN, Karina. et all. Producción de compost a partir de residuos de poda para reducir el impacto ambiental en la ciudad de Valledupar, Colombia. s.l. : Revista documentos de ingeniería, 2007.

ECN, Phyllis 2. Database for biomass and waste. [En línea] [Citado el: 25 de Agosto de 2015.] <https://www.ecn.nl/phyllis2/>.

ESPECIALISTAS TÉCNICOS EN FLUIDOS DE OCCIDENTE SA DE CV. Válvulas y Medidores de flujo. *Válvulas de bola, Esfera o Cierre rápido*. [En línea] [Citado el: 25 de Julio de 2016.] [http://www.valvulasymedidores.com/valvulas\\_de\\_bola.html](http://www.valvulasymedidores.com/valvulas_de_bola.html).

FAO, Food and agriculture organization of the united nations. Wood gas as engine fuel. : FAO Forestry Department, 1986. ISBN 9251024367.

FLEXILATINA INGENIERÍA Y REPRESENTACIONES. Empaques en lámina. [En línea] [Citado el: 19 de Marzo de 2016.] <http://flexilatina.com/empaques-en-lamina/>.

FRERS, Cristian. *Una solución a la dependencia energética*. Argentina : El Cid Editor l apuntes, 2009. OCLC 780214231.

GAS Y ENERGÍA, S.A. Canasta energética. [En línea] [Citado el: 24 de Agosto de 2015.] <http://www.gasyenergia.com/datos-tecnico>.

GIL GARCÍA, Gregorio. *Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas*. España : Mundi-Prensa, 2008. ISBN 9788484763475.

GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA. Estadísticas de Cundinamarca 2011-2013. Bogotá : Panamericana Formas e impresos S.A., 2014. Primera edición. ISBN 9789585760059.

GÓMEZ ESXPÓSITO, Antonio. *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. España : McGraw-Hill España, 2002. ISBN 9788448135928.

HERNÁNDEZ, Humberto. PRADA, Janneth. et al. *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. 2010. ISBN 9789588504599.

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Energías renovables; Energía de la Biomasa. *Biomasa: Gasificación*. Madrid : IDAE, 2007. ISBN 9788496680203.

INCROPERA, Frank. DEWITT, David. Fundamentos de transferencia de calor. Ed. 4. México : Pearson, 1999. ISBN 9701701704.

INDUSTRIAS UNICON, C.A. Especificaciones de producto , tubo estructural. [En línea] [Citado el: 23 de Mayo de 16.] [http://www.unicon.com.ve/estructural\\_tubos\\_estructurales.html#notas](http://www.unicon.com.ve/estructural_tubos_estructurales.html#notas).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis de trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC1486. Sexta Edición. Bogotá en instituto, 2008. p1.

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura NTC 5613. Bogotá: el instituto, 2008, p12.

\_\_\_\_\_ Referencias bibliográficas, documentales para fuente de informaciones electrónicas NTC 4490. Bogotá: el instituto, p12.

LAMONS. Manual de juntas, guía técnica de estanqueidad. [En línea] [Citado el: 19 de Marzo de 2016.] [http://www.lamons.com/public/pdf/lit\\_reference/ManualDeJuntas-GuiaTecnicaDeEstanqueidad.pdf](http://www.lamons.com/public/pdf/lit_reference/ManualDeJuntas-GuiaTecnicaDeEstanqueidad.pdf).

LINUX.SU. Arduino: Kid en un millón. [En línea] 2003. [Citado el: 19 de Julio de 2016.] <http://linux.su/070516.shtml>.

MATEO RODRÍGUEZ, José Manuel. *Los caminos para el cambio: la incorporación de la sustentabilidad ambiental para el cambio. La incorporación de la sustentabilidad ambiental al proceso de desarrollo*. Cuba : Editorial Universitaria, 2008. ISBN electrónico 9789591607317.

MORO VALLINA, Miguel. *Tecnología industrial 1*. España : Paraninfo S.A., 2013. ISBN 9788497328272.

MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. Ed. 4 México : Pearson Educación, 2006. ISBN 9702608120.

MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. Ed. 6. México : Pearson Educación, 2006. ISBN 970260805-8.

MUNDIAL DE TORNILLOS. Catalogo productos, tornillos. [En línea] [Citado el: 19 de Marzo de 2016.] <http://www.mundialdetornillos.com/index.php?id=4001041>.

NULLVALUE. 2000. Así se mide la eficiencia de los motores I. Colombia : El tiempo, 2000.

PEÑA, Ivon. REYES, Camila. Diseño conceptual de un proceso de gasificación de biomasa residual lignocelulósica en reactores de lecho fluidizado. Bogotá, 2016.

PÉREZ, Juan. MELGAR, Andrés. BENJUMEA, Pedro. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. : Elsevier Ltd., 2012. Vol. 96. ISSN 00162361.

POWER-TECHNOLOGY. Power-technology.com. *Power from waste - the world's biggest biomass power plants*. [En línea] 1 de Abril de 2014. [Citado el: 2 de Noviembre de 2015.] <http://www.power-technology.com/features/featurepower-from-waste---the-worlds-biggest-biomass-power-plants-4205990/>.

QUIMINET. Las ventajas de las válvulas de cuchilla. [En línea] 18 de Octubre de 2011. [Citado el: 25 de Julio de 2016.] <http://www.quiminet.com/articulos/las-ventajas-de-las-valvulas-de-cuchilla-2600769.htm>.

RAJVANSHI, Anil. Biomass gasification. [ed.] Yogi Goswami. *Alternative energy in agriculture*. Maharashtra, 1986. Vol. II, Cap 4.

RÁMIREZ, Nidia. SILVA, Ángela. et al. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Bogotá : Cenipalma, 2011. Boletín técnico No. 30. ISBN 9789588360388.

RAMÍREZ, Santiago. SIERRA, Fabio. GUERRERO, Carlos. Ingeniería e investigación: Gasificación de materiales orgánicos residuales. Bogotá : U. Nacional, 2011. Vol. 31, No. 3. ISSN 22488723.

RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexánder. KLOSE, Wolfgang. *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados*. Kassel : Kassel University Press, 2011. ISBN 9783899589504.

SALINAS CALLEJAS, Edmar y GASCA QUEZADA, Victor. *Los biocombustibles*. Mexico : El cotidiano/Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal Redalyc, 2009. Vols. 24, No. 157. ISSN 01861840.

SANABRIA AGUIRRE, Sonia Esperanza y HURTADO AGUIRRE, Enrique. *Emprendimiento verde en Colombia: El caso del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)*. Colombia : Revista Entramado, 2013. Vols. 9, No. 1. ISSN 19003803.

SANVITO, Omar. Quemaduras. *Dogliotti y dogliotti*. [En línea] 2008. [Citado el: 8 de Abril de 2016.] <[http://www.manopediatrica.com.ar/?p=p\\_83&sName=quemaduras](http://www.manopediatrica.com.ar/?p=p_83&sName=quemaduras)>.

SEOÁNEZ CALVO, Mariano. *Tratado de la biomasa: con especial incidencia sobre la biomasa como fuente energética*. España : McGraw-Hill España, 2013. ISBN 9788448185237.

SOLAR TECHNICAL INFORMATION PROGRAM. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. 1988. SERI/SP 2713022.

TECNOLOGIA, AREA. Divisor de tensión. [En línea] [Citado el: 15 de Julio de 2016.] <http://www.areatecnologia.com/electronica/divisor-de-tension.html>.

TERMOKEW, S.A. de C.V. Termopares. [En línea] [Citado el: 7 de Julio de 2016.] <http://www.termokew.mx/termopares.php>.

TERRAZOCULTOR, Jose Manuel. YOU TUBE. *Tutorial#Electrónica Básica.Cómo hacer circuitos impresos PCB (I)*. [En línea] 18 de Abril de 2015. [Citado el: 18 de Julio de 2016.] [https://www.youtube.com/watch?v=anadeSIFI\\_A](https://www.youtube.com/watch?v=anadeSIFI_A).

TREVIÑO, Manuel. en Virtual-Pro. *Tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC*. España : Club español de la energía, ELCOGAS S.A., 2006 en Virtual-Pro.

U. NACIONAL, U. PONTIFICIA BOLIVARIANA, COLCIENCIAS, SENA. Biomasa y carbón: una alternativa energética para Colombia. Medellín : Gerencia Creativa, 2006.

VALVIAS. Válvulas de bola (Ball valve). [En línea] [Citado el: 25 de Julio de 2016.] <http://www.valvias.com/tipo-valvula-de-bola.php>.

WALWORTH, Since 1842. Válvulas de acero fundido al carbono, Aleado e Inoxidable. [En línea] [Citado el: 25 de Julio de 2016.] <http://es.slideshare.net/oscral2000/valvulas-acero-fundido-walworth>.

WEEDY, B.M. *Sistemas eléctricos de gran potencia* . España : Editorial Reverté, S.A., 1982. ISBN 8429130942.

XM, Compañía de Expertos en Mercados. Capacidad efectiva por tipo de generación. [En línea] [Citado el: 14 de Agosto de 2015.] <<http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>>.

YANG, WEN CHING. *Handbook of fluidization and fluid particle system*. New York : Marcel Dekker, Inc, 2003. ISBN 082470259X.

## **ANEXOS**

**ANEXO A.**  
**ESTADISTICA DE LOS CULTIVOS EN CUNDINAMARCA 2012-2013**

**Cultivos permanentes**

Cultivo	Municipio	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)	Producción (t)
Caducifolios	San Bernardo	33,00	25,00	6,00	150,00
<b>Total Caducifolios</b>		<b>81,40</b>	<b>25,00</b>	<b>6,00</b>	<b>150,00</b>
Café	Machetá	94,70	84,70	2,20	186,34
Café	Machetá	70,00	70,00	1,90	133,00
Café	Manta	173,00	107,00	0,60	64,20
Café	Tibirita	127,00	81,50	1,70	138,55
Café	Jerusalén	215,00	65,00	0,60	39,00
Café	Nilo	719,29	649,29	2,00	1298,58
Café	Caparrapi	276,40	248,69	1,03	256,15
Café	Caparrapi	418,35	188,35	0,86	161,98
Café	Guaduas	1595,00	1115,00	1,20	1338,00
Café	La Peña	257,00	247,00	0,95	234,65
Café	La Vega	4,00	4,00	0,50	2,00
Café	La Vega	333,00	333,00	1,00	333,00
Café	La Vega	645,00	500,00	1,20	600,00
Café	Nimaima	42,68	36,78	0,73	26,85
Café	Nocaima	69,00	54,00	4,44	239,76
Café	Quebradanegra	95,00	77,00	0,55	42,35
Café	San Francisco	595,00	543,96	1,25	679,95
Café	Sasaima	600,00	204,00	2,00	408,00
Café	Sasaima	680,00	680,00	2,00	1360,00
Café	Supatá	1134,00	1014,00	6,25	6337,50
Café	Vergara	1595,00	1335,00	1,40	1869,00
Café	Villeta	219,00	170,00	1,00	170,00
Café	Gachalá	76,81	8,00	0,80	6,40
Café	Gachetá	215,00	115,00	0,80	92,00
Café	Gama	64,50	39,50	0,50	19,75
Café	Junin	99,37	69,37	0,77	53,41
Café	Ubatá	109,45	40,25	0,60	24,15
Café	Beltrán	70,00	68,00	0,90	61,20
Café	Bituima	390,00	390,00	1,00	390,00
Café	Bituima	123,00	83,00	1,00	83,00
Café	Chaguani	37,53	18,94	0,31	5,87
Café	Chaguani	1023,79	909,59	0,32	291,07
Café	Guayabal De Siquima	1027,90	870,90	0,60	522,54
Café	Guayabal De Siquima	42,00	10,00	0,80	8,00
Café	Pulí	424,53	334,65	0,80	267,72

Café	San Juan de Rioseco	2790,00	2710,00	0,80	2168,00
Café	Viani *	282,80	85,00	0,75	63,75
Café	Viani *	715,00	81,00	0,63	50,63
Café	Medina	64,80	41,00	2,25	92,25
Cultivo	Municipio	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)	Producción (t)
Café	Paratebueno	13,50	10,00	0,80	8,00
Café	Cáqueza	86,00	42,00	2,00	84,00
Café	Chipaque	2,00	0,00	1,20	0,00
Café	Choachi	42,00	0,00	0,00	0,00
Café	Fómeque	90,00	32,00	3,75	120,00
Café	Fosca	20,44	20,44	0,40	8,18
Café	Fosca	23,00	11,00	0,40	4,40
Café	Guayabetal	192,78	22,78	3,00	68,34
Café	Gutiérrez	53,00	43,00	1,20	51,60
Café	Quetame	71,84	71,84	0,25	17,96
Café	Quetame	70,20	35,20	1,80	63,36
Café	Ubaque	37,00	10,00	1,60	16,00
Café	El Peñón	658,00	588,00	1,00	588,00
Café	La Palma	1290,00	1165,00	1,25	1458,25
Café	Pacho	1568,00	1308,00	1,00	1308,00
Café	Paima	1121,00	291,00	2,00	582,00
Café	San Cayetano	715,00	708,00	1,20	849,60
Café	Villagómez	79,00	53,00	4,00	212,00
Café	Yacopi	1370,00	1256,00	1,00	1256,00
Café	Zipacón	83,00	67,00	0,89	59,63
Café	Arbeláez	369,00	327,00	1,20	392,40
Café	Cabrera	50,59	45,59	1,00	45,59
Café	Fusagasugá	910,36	855,36	0,80	684,29
Café	Pandi	440,50	247,50	1,00	247,50
Café	San Bernardo	85,00	0,00	0,00	0,00
Café	Silvania	669,00	606,00	0,25	151,50
Café	Tibacuy	1267,00	1123,00	0,50	561,50
Café	Veneza	358,00	243,00	0,55	133,65
Café	Anapoima	107,00	107,00	0,50	53,50
Café	Cachipay	839,00	824,00	0,80	659,20
Café	El Colegio	1646,60	1398,40	0,90	1258,56
Café	La Mesa	1262,50	1197,00	1,10	1316,70
Café	Quipile	1710,00	1600,00	0,50	800,00
Café	San Antonio del Tequendama	579,60	542,00	1,25	677,50
Café	Tena	470,20	453,50	1,40	634,90
Café	Viotá	4390,00	2425,00	0,95	2303,75
<b>Total Café</b>		<b>40798,01</b>	<b>31890,08</b>	<b>1,17</b>	<b>37271,46</b>
Caña Panelera	Macheta	5,91	5,73	32,00	183,36

Caña Panelera	Manta	109,00	99,00	2,50	247,50
Caña Panelera	Tibirita	67,00	67,00	1,50	100,50
Caña Panelera	Jerusalén	219,00	9,00	6,00	54,00
Caña Panelera	Tocaima	580,20	560,20	60,00	33612,00
Cultivo	Municipio	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)	Producción (t)
Caña Panelera	Caparrapi	9960,00	9900,00	6,00	59400,00
Caña Panelera	Guaduas	128,00	93,00	3,60	334,80
Caña Panelera	Albán	23,00	23,00	4,00	92,00
Caña Panelera	La Peña	4582,00	4567,00	45,00	205515,00
Caña Panelera	La Vega	256,00	256,00	2,00	512,00
Caña Panelera	Nimaima	1761,00	1753,00	4,00	7012,00
Caña Panelera	Nocaima	2046,00	2036,00	40,00	81440,00
Caña Panelera	Quebradanegra	3366,00	3339,00	3,00	10017,00
Caña Panelera	San Francisco	14,00	14,00	4,00	56,00
Caña Panelera	Sasaima	325,00	325,00	5,00	1625,00
Caña Panelera	Sasaima	40,00	0,00	0,00	0,00
Caña Panelera	Sasaima	15,00	0,00	0,00	0,00
Caña Panelera	Supatá	285,00	285,00	3,50	997,50
Caña Panelera	Útica	3320,00	3300,00	6,00	19800,00
Caña Panelera	Vergara	1430,00	1370,00	4,00	5480,00
Caña Panelera	Villeta	3669,00	3404,00	4,50	15318,00
Caña Panelera	Gachalá	91,00	91,00	4,00	364,00
Caña Panelera	Gachetá	83,00	53,00	1,50	79,50
Caña Panelera	Gama	64,50	61,50	5,50	338,25
Caña Panelera	Junin	94,50	88,50	5,00	442,50
Caña Panelera	Ubalá	375,57	337,57	5,00	1687,85
Caña Panelera	Beltrán	60,00	60,00	5,00	300,00
Caña Panelera	Bituima	225,00	183,00	5,00	915,00
Caña Panelera	Chaguani	707,00	679,00	4,00	2716,00
Caña Panelera	Guayabal De Siquima	268,20	258,33	4,00	1033,32
Caña Panelera	Pulí	546,00	542,00	4,80	2601,60
Caña Panelera	San Juan de Rioseco	200,00	120,00	6,00	720,00
Caña Panelera	Viani	502,00	562,00	5,00	2810,00
Caña Panelera	Paratebueno	265,00	75,00	15,00	1125,00
Caña Panelera	Fosca	23,00	21,00	4,00	84,00
Caña Panelera	Guayabetal	123,00	96,00	6,00	588,00
Caña Panelera	Gutiérrez	96,00	84,00	5,00	420,00
Caña Panelera	Quetame	58,00	48,00	3,20	153,60
Caña Panelera	El Peñón	625,00	620,00	5,00	3100,00
Caña Panelera	La Palma	585,00	555,00	1,00	555,00
Caña Panelera	Pacho	47,00	39,00	4,00	156,00
Caña Panelera	Paima	382,00	68,00	3,50	238,00
Caña Panelera	San Cayetano	130,00	125,00	4,50	562,50

Cultivo	Municipio	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)	Producción (t)
Caña Panelera	Topaipi	554,00	554,00	4,00	2216,00
Caña Panelera	Villagómez	145,00	142,00	10,00	1420,00
Caña Panelera	Yacopi	1448,50	1272,00	4,00	5088,00
Caña Panelera	Arbeláez	75,00	70,00	6,00	420,00
Caña Panelera	Anapoima	417,00	417,00	6,00	2502,00
Caña Panelera	La Mesa	75,00	75,00	4,00	300,00
Caña Panelera	Quipile	1760,00	1660,00	5,00	8300,00
Caña Panelera	Viotá	170,00	170,00	10,00	1700,00
<b>Total Caña Panelera</b>		<b>42396,38</b>	<b>40534,83</b>	<b>11,96</b>	<b>484732,78</b>

Para información de los cultivos transitorios y permanentes por favor dirigirse al documento GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA. 2014. Estadísticas de Cundinamarca 2011-2013. Bogotá: Panamericana Formas e impresos S.A., 2014. Primera edición. ISBN 9789585760059.pg 350 a la 389

## **ANEXO B.**

### **DATOS DE RESIDUOS DE BIOMASA**

En la definición de los valores del rating de satisfacción del cuadro 7, se realizó teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

**Poder calorífico:** la clasificación del rating de satisfacción, se realizó dependiendo de los combustibles usados con gran frecuencia en el mundo como la gasolina, carbón, diésel, que contienen un alto grado de poder calorífico; las magnitudes de comparación se adquirieron de la página web <<http://www.gasyenergia.com/datos-tecnico>>, el residuo que contenga mayor poder calorífico obtendrá un puntaje superior.

**Porcentaje de humedad:** en la figura 2 la biomasa residual debe tener un contenido de humedad menor al 60%, donde lo ideal es de 10% a 15% según el IDEA de España en el documento Energía de la Biomasa. Biomasa: Gasificación en la página 10, es un factor importante porque los niveles altos de humedad generarían en el reactor desgaste, aglomeración, el residuo húmedo consumiría un exceso de energía para evaporar el agua.

**Contenido de cenizas:** una característica importante porque altos contenidos de ceniza provocan un manejo y quemado inestable, contribuyendo con una pérdida de combustible, se puede generar grandes tumultos de ceniza promoviendo a la creación de costras en las tuberías o paredes del reactor disminuyendo la funcionalidad normal del reactor, el residuo que contenga menor cenizas obtendrá un puntaje superior.

**Material volátil:** ítem destacado por lo que proporciona un encendido prácticamente fácil, además se puede reconocer el valor del rendimiento para lograr encontrar la tecnología adecuada, los residuos que tengan mayor contenido en material volátil obtendrán un puntaje superior.

**Azufre y Nitrógeno:** el residuo que tenga el menor contenido de estos elementos es el adecuado y poseerá el puntaje superior en el rating de satisfacción, por lo que un alto contenido sería un perjuicio para el medio natural que se encuentra deteriorado.

**Disponibilidad:** hace referencia a la utilización del residuo en algún proceso industrial, si es utilizado en la misma área productora como un posible abono orgánico, alimento para ganado, o simplemente es depositado en rellenos sanitarios. Entendido esto se le da mayor puntaje al residuo que no sea utilizado para algún beneficio, por lo que el proyecto busca darle un valor a algo que no lo tiene.

**Homogeneidad:** esta parte evalúa el tamaño físico en el que se encuentra el residuo, un tamaño pequeño y homogéneo nos da grandes beneficios para el reactor reduciendo las dimensiones del gasificador, se puede elevar el tiempo de estadía

del residuo para que haya una quema total de las partículas contaminantes, si al residuo no hay que hacerle ningún proceso de reducción de tamaño tendrá el mejor puntaje.

La información del potencial energético y la cantidad de residuo, para los cultivos en el departamento de Cundinamarca, se recopilaron de las páginas 156 a la 162 del documento que lleva como título Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia realizado en el año 2010 por Humberto Hernández, Janeth Prada, *et al.* Sin embargo para los cultivos de cebolla, frijol y mango los valores se estimaron de la siguiente manera

Se tiene un modelo general del potencial energético que básicamente es la masa del residuo multiplicado por el poder calorífico del mismo

Modelo general del potencial energético

$$PE = (M_{rs}) \times (E)$$

*PE: Potencial energético [TJ/año]*

*M<sub>rs</sub>: Masa de residuo seco [t/año]*

*E: Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t]*

Para hallar la masa del residuo se sigue el modelo matemático que brinda el atlas del potencial energético en la página 150

Modelo para masa seca del residuo agrícola

$$M_{rs} = A \times R_c \times M_{rg} \times Y_{rs}$$

*A: Área cultivada [ha/año]*

*R<sub>c</sub>: Rendimiento del cultivo [t/ha]*

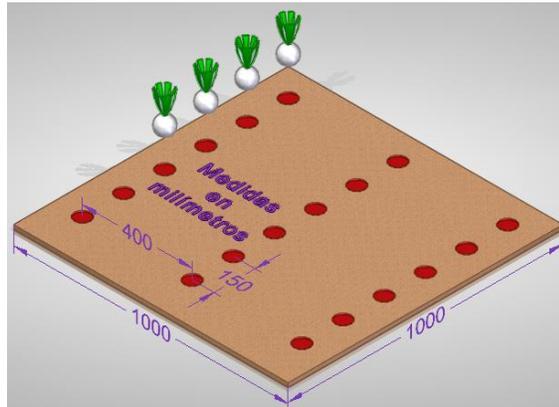
*M<sub>rg</sub>: Masa de residuo generada del cultivo [t residuo/t producto]*

*Y<sub>rs</sub>: Fracción de residuos seco [t residuo seco/t residuo húmedo]*

Entonces para el cultivo de cebolla del departamento de Cundinamarca se comprenden los siguientes datos:

Área sembrada – 3262.5 ha = 32625000 m<sup>2</sup>  
 Área cosechada – 3032 ha = 30320000 m<sup>2</sup>  
 Masa promedio cebolla – 175 gr = 17.5 x 10<sup>-5</sup> t  
 De 1m<sup>2</sup> se pueden sembrar 18 cebollas  
 Masa promedio de hojas y raíces – 50 gr = 5 x 10<sup>-5</sup> t  
 Rendimiento del cultivo – 18.69 t/ha  
 Producción – 62721t  
 Poder calorífico – 12.47MJ/Kg = 12.47 x 10<sup>-3</sup> TJ/t

### Siembra cultivo de cebolla



Empezamos a definir la masa de siembra, de cosecha y de hojas multiplicando el área por el número de cebollas cultivadas en un metro cuadrado teniendo en cuenta la masa promedio.

$$\text{Masa sembrada} = \frac{32625000m^2 \times 18\text{Ceb} \times 17.5 \times 10^{-5}t}{1m^2 \times 1\text{Ceb}} = 102768.75t_{sem}$$

$$\text{Masa cosechada} = \frac{30320000m^2 \times 18\text{Ceb} \times 17.5 \times 10^{-5}t}{1m^2} = 95508t_{cos}$$

$$\text{Masa hojas y raíces} = \frac{3032000m^2 \times 18\text{Ceb} \times 5 \times 10^{-5}t}{1m^2} = 27288t_{HyR}$$

Luego el residuo de cosecha que puede ser producto dañado, contaminado no apto para comerciar, se obtiene en la resta de la masa sembrada entre la masa cosechada. El total de la masa residual del cultivo se obtiene de la suma entre la masa de las hojas-raíces y la masa del residuo de cosecha.

$$\text{Residuo de cosecha} = 102768.75t_{sem} - 95508t_{cos} = 7260.75t_{Rcos}$$

$$\text{Total masa residual} = 27288t_{HyR} + 7260.75t_{Rcos} = 34548.75t_{residuo}$$

Una vez obtenida la masa residual se divide entre la producción para determinar el factor de masa residual generada por el cultivo [ $M_{rg}$ ]

$$M_{rg} = \frac{34548.75t_{residuo}}{62721t_{producción}} = 0.5508$$

Utilizamos el modelo matemático para determinar la masa del residuo omitiendo la fracción del residuo seco, luego se procede a determinar el potencial energético del modelo general.

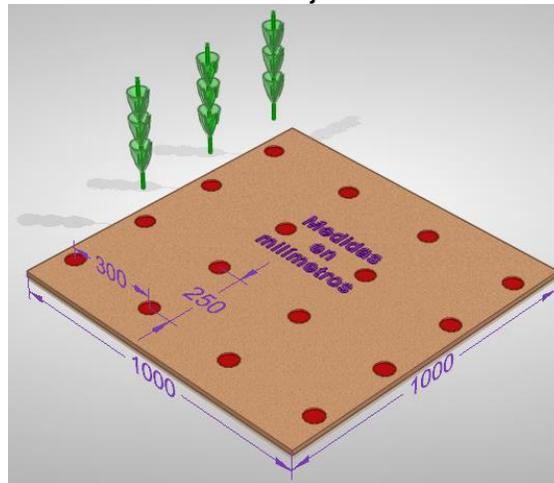
$$M_{rs} = 3262.5 \text{ ha/año} \times 18.69 \text{ t/ha} \times 0.5508 = 33585.6496 \text{ t/año}$$

$$PE = 33585.6496 \text{ t/año} \times 12.47 \times 10^{-3} \text{ TJ/t} = 418.8130 \text{ TJ/año}$$

Para el cultivo de frijol en el departamento de Cundinamarca se comprenden los siguientes datos:

Área sembrada – 9021 ha = 90210000 m<sup>2</sup>  
 Área cosechada – 8065.2 ha = 80652000 m<sup>2</sup>  
 Masa promedio frijol – 0.503 gr = 50.3 x 10<sup>-8</sup> t  
 De 1m<sup>2</sup> se pueden sembrar 16 semillas  
 Masa promedio de hojas y raíces – 45 gr = 45 x 10<sup>-6</sup> t  
 Rendimiento del cultivo – 3.47 t/ha  
 Producción – 21833.52t  
 Poder calorífico – 16.24MJ/Kg = 16.24 x 10<sup>-3</sup> TJ/t

Siembra cultivo de frijol



Empezamos a definir la masa de siembra, de cosecha, de hojas y raíces multiplicando el área por el número de cebollas cultivadas en un metro cuadrado teniendo en cuenta la masa promedio.

$$Masa sembrada = \frac{90210000 \text{ m}^2 \times 16 \text{ Semillas} \times 50.3 \times 10^{-8} \text{ t}}{1 \text{ m}^2} = 726.01 t_{sem}$$

$$Masa cosechada = \frac{80652000 \text{ m}^2 \times 16 \text{ Semillas} \times 50.3 \times 10^{-8} \text{ t}}{1 \text{ m}^2} = 649.087 t_{cos}$$

$$Masa hojas y raíces = \frac{80652000 \text{ m}^2 \times 16 \text{ Ceb} \times 45 \times 10^{-6} \text{ t}}{1 \text{ m}^2} = 58069.44 t_{HyR}$$

Luego el residuo de cosecha que es producto dañado, contaminado no apto para comerciar, se obtiene en la resta de la masa sembrada entre la masa cosechada. El total de la masa residual del cultivo se obtiene de la suma entre la masa de las hojas-raíces y la masa del residuo de cosecha.

$$\text{Residuo de cosecha} = 726.01t_{sem} - 649.087t_{cos} = 76.923t_{Rcos}$$

$$\text{Total masa residual} = 58069.44t_{HyR} + 76.923t_{Rcos} = 58146.363t_{residuo}$$

Una vez obtenida la masa residual se divide entre la producción para determinar el factor de masa residual generada por el cultivo [ $M_{rg}$ ]

$$M_{rg} = \frac{58146.363t_{residuo}}{21833.52t_{producción}} = 2.6631$$

Utilizamos el modelo matemático para determinar la masa del residuo omitiendo la fracción del residuo seco, luego se procede a determinar el potencial energético del modelo general.

$$M_{rs} = 9021 \text{ ha/año} \times 3.47 \text{ t/ha} \times 2.6631 = 83362.6731 \text{ t/año}$$

$$PE = 83362.6731 \text{ t/año} \times 16.24 \times 10^{-3} \text{ TJ/t} = 1353.8098 \text{ TJ/año}$$

Para el cultivo de mango en el departamento se comprenden los siguientes datos:

Área sembrada – 9316.6 ha  
 De 70 a 100 árboles por hectárea, entonces tomamos el promedio que sería 85 árboles por hectárea  
 Promedio de podas 100 t/mes = 1200 t/año  
 Rendimiento del cultivo – 10.43 t/ha  
 Producción – 87857.09t  
 Poder calorífico – 9.24MJ/Kg =  $9.24 \times 10^{-3}$  TJ/t

Teniendo el promedio de los residuos de poda, se saca el factor de masa residual generada por el cultivo [ $M_{rg}$ ]

$$M_{rg} = \frac{1200t_{residuo}}{87857.09t_{producción}} = 0.01365$$

Utilizamos el modelo matemático para determinar la masa del residuo omitiendo la fracción del residuo seco, luego se procede a determinar el potencial energético del modelo general.

$$M_{rs} = 9316.6 \text{ ha/año} \times 10.43 \text{ t/ha} \times 0.01365 = 1326.3996 \text{ t/año}$$

$$PE = 1326.3996 \text{ t/año} \times 9.24 \times 10^{-3} \text{ TJ/t} = 12.2559 \text{ TJ/año}$$

CRITERIOS	UNIDAD	CAFÉ		CAÑA PANELERA			CEBOLLA	FRIJOL		MAIZ			MANGO			PALMA ACEITE		
		PULPA	CISCO	BAGAZO	HOJAS	RAC	CASCARA	PLANTA	PAJA	RASTROJO	MAZORCA	CASCARA	CASCARA	PEPA	MADERA	CUESCO	FIBRA	RACIMOS
Potencial energético	TJ/año	1479,96		13563,8			418,813	1353,8098		947,01			12,2559			251,79		
Cantidad de residuo	t/año	151923		1591993			34548,75	58146,363		88184			1200			26102		
Poder calorífico	MJ/Kg	17,89	18,61	18,72	16,83	15,47	12,47	0,22	16,24	14,40	14,24	16,02	2,82	7,05	17,84	16,75	17,95	16,89
Humedad	% en peso	30,3	<u>10,1</u>	46	33	38,9	13,2	85,52	6,59	5,9	7,04	9	72,99	51,41	26,9	<u>11,2</u>	5,2	10,5
Cenizas	% en peso	0,79	<u>1,2</u>	12,38	7,72	13,34	11,045	2,23	5,93	21,57	2,9	1,4	1,18	1,46	2,98	<u>1,4</u>	5,2	3,5
Material volátil	% en peso	72,65	<u>82</u>	88,29	83,88	84,93	60,48	10,38	75,3	63,9	72,67	77,9	19,32	34,55	85,64	<u>79</u>	79	81
Azufre	% en peso	0,38	<u>0,07</u>	0,06	0,08	0,13	0,14	0,02	0,01	0,09	0,08	0,1	0,02	0,04	0,08	<u>0,06</u>	0,09	0,05
Nitrógeno	% en peso	1,1	<u>0,6</u>	0,26	0,2	0,64	0,49	0,52	0,83	0,65	0,44	1,1	0,25	0,55	0,28	<u>0,2</u>	1,12	0,47

Fuente:

- ECN, Phyllis 2. Database for biomass and waste. [En línea] disponible en internet <<https://www.ecn.nl/phyllis2/>>
- HERNÁNDEZ, Humberto. PRADA, Janneth. et al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 2010. ISBN 9789588504599.
- RÁMIREZ, Nidia. SILVA, Ángela. et al. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Bogotá : Cenipalma, 2011. Boletín técnico No. 30. ISBN 9789588360388.
- RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. 2011. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados. Kassel : Kassel University Press, 2011. ISBN 9783899589504.

**ANEXO C.**  
**PERFIL ESTRUCTURAL DE TUBO CUADRADO**

CARACTERÍSTICAS Y DENOMINACION								PROPIEDADES ESTÁTICAS						UNIDADES DE EMPAQUE
TAMAÑO PERFIL				Espesor pared e	PESO		AREA cm <sup>2</sup>	FLEXION			TORSION			
TAMAÑO NOMINAL		REAL			Negro Kg/m	Galvanizado Kg/m		Momento inercia Ix = Iy cm <sup>4</sup>	Módulo elástico Sx = Sy cm <sup>3</sup>	Radio de Giro rx = ry cm	Módulo Plástico Zx = Zy cm <sup>3</sup>	Momento Inercia J cm <sup>4</sup>	Módulo Elástico B cm <sup>3</sup>	
PULGADAS	MILIMETROS	d mm	b mm											
1 X 1	25 X 25	25,00	25,00	1,50	1,12	1,23	1,42	1,22	0,97	0,92	1,17	2,03	1,48	36
		25,00	25,00	2,00	1,49	1,60	1,90	1,48	1,19	0,88	1,47	2,58	1,82	
		25,00	25,00	2,50	1,80	1,90	2,29	1,69	1,35	0,86	1,71	3,07	2,11	
1 1/2 X 1 X/2	40 X 40	40,00	40,00	1,50	1,73	1,90	2,20	5,49	2,75	1,58	3,22	8,77	4,13	25
		40,00	40,00	2,00	2,32	2,49	2,95	6,94	3,47	1,53	4,13	11,36	5,25	
		40,00	40,00	2,50	2,81	2,98	3,58	8,22	4,11	1,52	4,97	13,79	6,25	
2 X 2	50 X 50	50,00	50,00	1,50	2,29	2,53	2,92	11,07	4,43	1,95	5,15	17,45	6,66	25
		50,00	50,00	2,00	3,04	3,31	3,87	14,15	5,66	1,91	6,66	22,73	8,53	
		50,00	50,00	2,50	3,76	3,97	4,79	16,94	6,78	1,88	8,07	27,75	10,26	
2 3/8 X 2 3/8	60 X 60	60,00	60,00	1,50	2,67	2,94	3,39	19,52	6,51	2,40	7,53	30,53	9,78	25
		60,00	60,00	2,00	3,63	3,86	4,63	25,14	8,38	2,33	9,79	39,91	12,61	
		60,00	60,00	2,50	4,37	4,63	5,56	30,34	10,11	2,34	11,93	48,92	15,26	
2 3/4 X 2 3/4	70 X 70	70,00	70,00	1,50	3,20	3,54	4,08	31,46	8,99	2,78	10,36	48,89	13,50	16
		70,00	70,00	2,00	4,32	4,65	5,50	40,73	11,64	2,72	13,52	64,10	17,50	
		70,00	70,00	2,50	5,26	5,59	6,70	49,41	14,12	2,72	16,54	78,79	21,27	
3 X 3	75 X 75	75,00	75,00	3,00	6,19	6,52	7,89	57,53	16,44	2,70	19,42	92,98	24,82	16
		75,00	75,00	4,00	8,35	-	10,95	71,62	19,10	2,92	22,49	115,14	28,81	
		75,00	75,00	5,00	10,30	-	13,36	106,33	28,35	2,82	34,46	180,41	43,33	
4 1/2 X 3 1/2	90 X 90	90,00	90,00	2,00	12,25	-	15,63	120,16	32,04	2,77	39,58	209,99	49,43	9
		90,00	90,00	2,50	15,63	-	19,63	152,01	40,00	3,54	50,00	270,00	63,00	
		90,00	90,00	3,00	19,63	-	24,28	197,82	48,29	3,53	63,04	342,14	82,59	
4 X 4	100 X 100	100,00	100,00	2,00	24,28	-	29,74	243,01	44,60	3,99	78,30	390,75	96,94	9
		100,00	100,00	2,50	29,74	-	36,99	312,63	55,13	3,96	98,86	495,64	122,27	
		100,00	100,00	3,00	36,99	-	45,58	392,05	67,41	3,94	124,21	629,48	158,27	
		100,00	100,00	4,00	45,58	-	56,74	482,35	84,27	3,89	153,30	796,04	201,31	
		100,00	100,00	5,00	56,74	-	70,46	583,10	104,22	3,84	186,59	989,62	252,14	

**PERFIL CUADRADO**

Fuente: COLMENA, Acero en revolución.

## ANEXO D. SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA VÁLVULAS, RELACIÓN PRESIÓN - TEMPERATURA PARA EL AISI-316, TIPO DE DISCOS

### SELECCIÓN DE MATERIALES

#### VÁLVULAS DE ACERO FUNDIDO

Lista parcial de la selección de materiales recomendados para fluidos específicos.

Nota: Guía de selección de materiales sólo como referencia. La correcta selección para aplicaciones específicas es responsabilidad del usuario

SELECCIÓN DE MATERIALES						
CÓDIGO DE SELECCIÓN	ACERO AL CARBÓN	ACERO INOXIDABLE 304	ACERO INOXIDABLE 316	ALLOY 20	MONEL	HASTELLOY
ALCOHOLES	-	S	S	-	S	-
ALQUITRÁN DE HULLA	-	-	S	-	S	-
ALUMINATO DE SODIO A 21°C (70°F)	S	P	S	-	-	S
AMINAS A 21°C (70°F)	S	-	S	-	S	-
AMONIACO ANHIDRO LÍQUIDO	-	-	S	-	S	-
AMONIACO GASEOSO	S	-	S	-	S	-
ANHIDRIDO ACÉTICO EN EBULLICIÓN	N	S	S	-	S	-
ANILINA A 21°C (70°F)	S	P	S	-	P	-
ANILINA EN MEDIO ÁCIDO A 21°C (70°F)	N	N	N	S	-	-
ANTIOXIDANTES	-	-	-	-	S	-
AZUFRE (FUNDIDO)	N	S	S	-	P	-
BARNIZ CALIENTE	N	S	S	-	S	-
BENCINA EN EBULLICIÓN	S	P	S	-	S	-
BORAX A 79°C (175°F)	S	P	-	-	-	-
BROMO ÁCIDO A 21°C (70°F)	N	N	S	-	P	-
BROMURO (HÚMEDO) A 21°C (70°F)	N	N	N	N	-	S
BROMURO (SECO) A 21°C (70°F)	N	N	N	S	S	P
BROMURO ANHIDRO LÍQUIDO	N	-	N	-	N	S
BROMURO DE AMONIO A 21°C (70°F)	N	S	P	-	-	-
BROMURO DE PLATA A 21°C (70°F)	N	S	P	-	-	-
BROMURO DE POTASIO A 21°C (70°F)	N	S	P	-	P	-
BROMURO DE SODIO	N	S	P	-	-	-
BUTADIENO	-	-	-	-	S	-
BUTANO	-	-	-	-	S	-
BUTILENO	-	-	-	-	S	-
CAFÉ EN EBULLICIÓN	N	S	S	-	-	-
CERVEZA Y MALTA A 71°C (160°F)	N	S	-	-	S	-
CLORO GASEOSO HÚMEDO A 21°C (70°F)	N	N	N	N	-	S
CLORO GASEOSO SECO A 21°C (70°F)	S	P	-	-	-	-
CLORURO DE AMONIO A 21°C (70°F)	N	S	P	-	S	-
CLORURO DE ETILO A 21°C (70°F)	S	P	P	-	S	-
CLORURO DE MAGNESIO A 21°C (70°F)	N	S	P	-	S	-
CLORURO DE POTASIO A 21°C (70°F)	N	S	P	-	S	-
CLORURO DE SODIO A 21°C (70°F)	N	S	P	-	S	-
DICLORURO DE ETILENO A 21°C (70°F)	S	-	-	-	S	-
DICLORURO PROPILENO A 21°C (70°F)	S	-	-	-	S	-
DIFENIL + ÓXIDO DE DIFENILO (DOWTHERM) EN EBULLICIÓN	S	P	-	-	-	-
DIÓXIDO DE CARBONO HÚMEDO	P	-	S	-	P	-
DIÓXIDO DE SULFURO HÚMEDO A 21°C (70°F)	S	P	-	-	-	-
DIÓXIDO DE SULFURO SECO A 302°C (575°F)	N	S	S	-	P	-
DICROMATO DE SODIO A 21°C (70°F)	S	-	-	-	P	-
ÉTERES A 21°C (70°F)	S	P	S	-	S	-
FLUORURO DE SODIO A 21°C (70°F)	N	S	P	-	S	-
FOSFATO TRISODIO	-	-	-	-	S	-
FREÓN	S	P	-	-	S	-
GAS NATURAL	S	S	S	-	S	-
GAS PROPANO	S	S	S	-	S	-
GASOLINA A 21°C (70°F)	S	P	S	-	S	-

Fuente: WALWORTH, Since 1842. Válvulas de acero fundido al carbono, Aleado e Inoxidable. [En línea] <http://es.slideshare.net/oscral2000/valvulas-acero-fundido-walworth>.

## TIPOS DE COMPUERTA O DISCO

Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de las válvulas de compuerta, **WALWORTH** ofrece en su línea de acero fundido, dos tipos de diseño de compuerta o disco recomendados por API-600, sólida y flexible; las cuales pueden ser instaladas en válvulas de diferentes diámetros según las necesidades del usuario.

### CARACTERÍSTICAS DE LA COMPUERTA O DISCO FLEXIBLE

- \*Fácil de sellar en cualquier rango de presión.
- \*Por su forma, compensa las deformaciones del cuerpo debido a los esfuerzos internos.
- \*La flexibilidad de su diseño compensa ciertas distorsiones de los asientos, lo que facilita el sello de la válvula.
- \*Ideal para procesos donde existen variaciones de temperaturas elevadas.
- \*Su uso abarca desde temperatura ambiente (38°C-100°F) hasta alta temperatura (538°C-1000°F)
- \*Su flexibilidad asegura de una larga duración de la válvula.
- \*Su capacidad de sello disminuye cuando se utilizan fluidos que contienen sólidos en suspensión.



### CARACTERÍSTICAS DE LA COMPUERTA O DISCO RÍGIDO

- \* Por su forma, no compensa las deformaciones del cuerpo debido a los esfuerzos internos.
- \* Cuando se cierra una válvula que maneja un fluido caliente y se permite que ésta se enfríe, la compuerta se adhiere a los asientos dificultando la apertura.
- \* El uso de fluidos que contienen sólidos en suspensión no afecta su capacidad de sello.
- \* Su diseño es ligero.



Fuente: WALWORTH, Since 1842. Válvulas de acero fundido al carbono, Aleado e Inoxidable. [En línea] <http://es.slideshare.net/oscral2000/valvulas-acero-fundido-walworth>.

## ARREGLO DE MATERIALES (TRIM)

El arreglo de materiales se refiere a las partes internas que están en contacto con el fluido, como asientos, compuerta (disco), vástago/flecha y casquillo. Los materiales indicados para los asientos y la compuerta (disco) únicamente son para las áreas de sello según se especifica en el **Estándar API 600**.

El Trim UT (API No. 8) se suministra en forma estándar. Para otros trims se deben seleccionar los materiales de acuerdo con la tabla siguiente, o bien, especificar claramente los materiales requeridos, el tipo de fluido a manejar, además de la presión y temperatura de trabajo.

TRIM		COMPONENTE			SERVICIO RECOMENDADO
WALWORTH	API	ASIENTO	COMPUERTA (DISCO)	VÁSTAGO / FLECHA / CASQUILLO	
UT	8	ESTELITE No. 6	13% Cr. (INOX. 410)	13% Cr. (INOX. 410)	Servicio general en agua, aceite y gas, vapor sobrecalentado hasta 399°C (750°F), vapor saturado, hidrocarburos pesados tales como gasolina, queroseno, aceites lubricantes, aceites combustibles, gas, mezclas de aceites ácidos, fenol y vapores de hidrocarburos pesados hasta 399°C (750°F). Este trim provee alta resistencia al desgaste de las áreas de sello debido a la abrasión y erosión provocado por el paso del fluido. También evita el desgaste y/o daño prematuro de las áreas de sello cuando se presenta el efecto "galling" (arrancamientos o ralladuras de materiales que tienen similitud en sus características químicas y físicas, en particular con una misma dureza).
AA	1	13% Cr. (INOX. 410)	13% Cr. (INOX. 410)	13% Cr. (INOX. 410)	Servicio general en agua, aceite y gas, vapor sobrecalentado hasta 399°C (750°F), vapor saturado, hidrocarburos pesados tales como gasolina, queroseno, aceites lubricantes, aceites combustibles, gas, mezclas de aceites ácidos, fenol y vapores de hidrocarburos pesados hasta 399°C (750°F).
HF	5	ESTELITE No. 6	ESTELITE No. 6	13% Cr. (INOX. 410)	Manejo de vapor sobrecalentado hasta 538°C (1000°F), hidrocarburos pesados tales como gasolina, queroseno, aceites lubricantes, aceites combustibles, gas, mezclas de aceites ácidos, fenol y vapores de hidrocarburos pesados hasta 538 °C (1000°F). Excelente resistencia a fluidos abrasivos y corrosivos.
1HF	-	ESTELITE No. 21	ESTELITE No. 21	(INOX. 316)	Manejo de vapor sobrecalentado hasta 538°C (1000°F), hidrocarburos pesados tales como gasolina, queroseno, aceites lubricantes, aceites combustibles, gas, mezclas de aceites ácidos, fenol y vapores de hidrocarburos pesados hasta 538 °C (1000°F). Excelente resistencia a fluidos abrasivos y corrosivos.
304	2	INOX. 304	INOX. 304	INOX. 304	Manejo de fluidos moderadamente corrosivos como ácidos orgánicos, acéticos y fosfóricos, sales alógenas, agua marina, agua de minas y soluciones alcalinas hasta una temperatura de 427°C (800°F). Manejo de fluidos a bajas temperaturas.
4HF	-	ESTELITE No. 6	INOX. 304	INOX. 304	Manejo de fluidos moderadamente corrosivos como ácidos orgánicos, acéticos y fosfóricos, sales alógenas, agua marina, agua de minas y soluciones alcalinas hasta una temperatura de 427°C (800°F). Manejo de fluidos a bajas temperaturas. Este trim provee alta resistencia al desgaste de las áreas de sello debido a la abrasión y erosión provocado por el paso del fluido. También evita el desgaste y/o daño prematuro de las áreas de sello cuando se presenta el efecto "galling".
316	10	INOX. 316	INOX. 316	INOX. 316	Manejo de fluidos corrosivos como ácidos orgánicos, acéticos y fosfóricos, sales alógenas, agua marina, agua de minas y soluciones alcalinas hasta una temperatura de 427°C (800°F). Manejo de fluidos a bajas temperaturas
3HF	12	ESTELITE No. 6	INOX. 316	INOX. 316	Manejo de fluidos moderadamente corrosivos como ácidos orgánicos, acéticos y fosfóricos, sales alógenas, agua marina, agua de minas y soluciones alcalinas hasta una temperatura de 427°C (800°F). Manejo de fluidos a bajas temperaturas. Este trim provee alta resistencia al desgaste de las áreas de sello debido a la abrasión y erosión provocado por el paso del fluido. También evita el desgaste y/o daño prematuro de las áreas de sello cuando se presenta el efecto "galling".
AAA	6	MONEL	13% Cr. (INOX. 410)	13% Cr. (INOX. 410)	Servicio general en agua, aceite y gas, vapor sobrecalentado hasta 399°C (750°F), vapor saturado, hidrocarburos ligeros tales como gasolina ligera, propano, butano, metano, hexano, etétera y vapores de hidrocarburos ligeros hasta 399°C (750°F).
A	9	MONEL	MONEL	MONEL	Manejo de fluidos corrosivos como ácido sulfúrico diluido, ácido clorhídrico diluido, ácido fluorhídrico, álcalis sustancias orgánicas, soluciones no oxidantes, soluciones salinas, salmuera, agua de mar, productos alimenticios servicio en donde no se requiere la prevención de contaminación de cobre, procesos de alquienización para producción de numerosas mezclas de alto octanaje para gasolinas de aviación y combustibles de motores.
HC	-	HASTELLOY C	HASTELLOY C	HASTELLOY C	Manejo de fluidos corrosivos como: ácido sulfúrico, ácido acético ácido nítrico diluido y concentrado ácido hidroclohídrico, ácido láctico diluido, ácido hidrobromhídrico diluido, agua con sales oxidantes, acetidohidos hidróxido de amonio mercurio, soluciones con nitrato de plata, hipoclorito de calcio, hipoclorito de sodio, soluciones con sulfato de cobre, soluciones salinas, salmuera y agua de mar.

Fuente: WALWORTH, Since 1842. Válvulas de acero fundido al carbono, Aleado e Inoxidable. [En línea] <http://es.slideshare.net/oscral2000/valvulas-acero-fundido-walworth>.

# RELACIÓN PRESIÓN-TEMPERATURA CLASE ESTÁNDAR

## FUNDICIÓN ASTM A-351 GR CF8M

PRESIONES DE TRABAJO POR CLASE, PSI.G.								
°F TEMPERATURA °C		150	300	400	600	900	1500	2500
-20 A 100	-29 A 38	275	720	960	1,440	2,160	3,600	6,000
200	93	235	620	825	1,240	1,860	3,095	5,160
300	149	215	560	745	1,120	1,680	2,795	4,660
400	204	195	515	685	1,025	1,540	2,570	4,280
500	260	170	480	635	955	1,435	2,390	3,980
600	316	140	450	600	900	1,355	2,255	3,760
650	343	125	440	590	885	1,325	2,210	3,680
700	371	110	435	580	870	1,305	2,170	3,620
750	399	95	425	570	855	1,280	2,135	3,560
800	427	80	420	565	845	1,265	2,110	3,520
850	454	65	420	555	835	1,255	2,090	3,480
900	482	50	415	555	830	1,245	2,075	3,460
950	510	35	385	515	775	1,160	1,930	3,220
1000	538	20	365	465	725	1,090	1,820	3,030
1050 (*)	566	20	345	460	720	1,080	1,800	3,000
1100 (*)	593	20	305	405	610	915	1,525	2,545
1150 (*)	621	20	235	315	475	710	1,185	1,970
1200 (*)	649	20	185	245	370	555	925	1,545
1250 (*)	677	20	145	195	295	440	735	1,230
1300(*)	704	20	115	155	235	350	585	970
1350(*)	732	20	95	130	190	290	480	800
1400(*)	760	20	75	100	150	225	380	630
1450(*)	788	20	60	80	115	175	290	485
1500(*)	816	15	40	55	85	125	205	345

(\*) PARA EXTREMOS SOLDADABLES ÚNICAMENTE, PARA EXTREMOS BRIDADOS LOS RANGOS SON HASTA 538°C (1000°F)

Fuente: WALWORTH, Since 1842. Válvulas de acero fundido al carbono, Aleado e Inoxidable. [En línea]  
<http://es.slideshare.net/oscral2000/valvulas-acero-fundido-walworth>.

## ANEXO E. LINEALIZACIÓN DEL CIRCUITO INTEGRADO AD595

Thermocouple Temperature °C	Type J	AD594		Type K	AD595
	Voltage mV	Output mV	mV	Voltage mV	Output mV
-200	-7.890	-1523		-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428		-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316		-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188		-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046		-4.138	-1021
-100	-4.632	-893		-3.553	-876
-80	-3.785	-729		-2.920	-719
-60	-2.892	-556		-2.243	-552
-40	-1.960	-376		-1.527	-375
-20	-995	-189		-777	-189
-10	-501	-94		-392	-94
0	0	3.1		0	2.7
10	.507	101		.397	101
20	1.019	200		.798	200
25	1.277	250		1.000	250
30	1.536	300		1.203	300
40	2.058	401		1.611	401
50	2.585	503		2.022	503
60	3.115	606		2.436	605
80	4.186	813		3.266	810
100	5.268	1022		4.095	1015
120	6.359	1233		4.919	1219
140	7.457	1445		5.733	1420
160	8.560	1659		6.539	1620
180	9.667	1873		7.338	1817
200	10.777	2087		8.137	2015
220	11.887	2302		8.938	2213
240	12.998	2517		9.745	2413
260	14.108	2732		10.560	2614
280	15.217	2946		11.381	2817
300	16.325	3160		12.207	3022
320	17.432	3374		13.039	3227
340	18.537	3588		13.874	3434
360	19.640	3801		14.712	3641
380	20.743	4015		15.552	3849
400	21.846	4228		16.395	4057
420	22.949	4441		17.241	4266
440	24.054	4655		18.088	4476
460	25.161	4869		18.938	4686
480	26.272	5084		19.788	4896

Thermocouple Temperature °C	Type J	AD594	Type K	AD595
	Voltage mV	Output mV	Voltage mV	Output mV
500	27.388	5300	20.640	5107
520	28.511	5517	21.493	5318
540	29.642	5736	22.346	5529
560	30.782	5956	23.198	5740
580	31.933	6179	24.050	5950
600	33.096	6404	24.902	6161
620	34.273	6632	25.751	6371
640	35.464	6862	26.599	6581
660	36.671	7095	27.445	6790
680	37.893	7332	28.288	6998
700	39.130	7571	29.128	7206
720	40.382	7813	29.965	7413
740	41.647	8058	30.799	7619
750	42.283	8181	31.214	7722
760	-	-	31.629	7825
780	-	-	32.455	8029
800	-	-	33.277	8232
820	-	-	34.095	8434
840	-	-	34.909	8636
860	-	-	35.718	8836
880	-	-	36.524	9035
900	-	-	37.325	9233
920	-	-	38.122	9430
940	-	-	38.915	9626
960	-	-	39.703	9821
980	-	-	40.488	10015
1000	-	-	41.269	10209
1020	-	-	42.045	10400
1040	-	-	42.817	10591
1060	-	-	43.585	10781
1080	-	-	44.359	10970
1100	-	-	45.128	11158
1120	-	-	45.893	11345
1140	-	-	46.652	11530
1160	-	-	47.406	11714
1180	-	-	48.155	11897
1200	-	-	48.898	12078
1220	-	-	49.635	12258
1240	-	-	50.276	12436
1250	-	-	50.633	12524

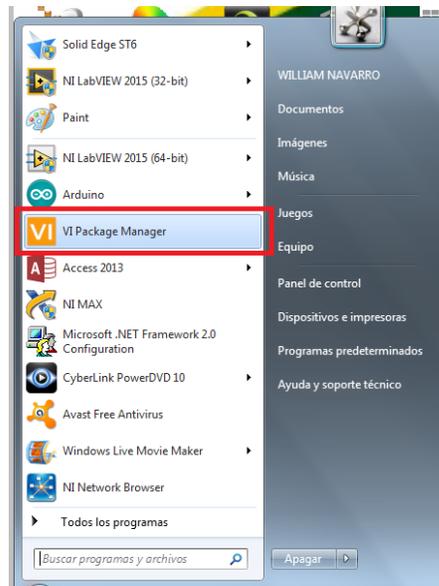
Fuente: ALLDATASHEET.ES. AD595 Datasheet, Analog Devices. [En línea] <http://html.alldatasheet.es/html-pdf/48077/AD/AD595/19/1/AD595.html>.

**ANEXO F.**  
DIAGRAMA DEL CIRCUITO PARA MEDIR TEMPERATURA Y DIAGRAMA DE  
ELEMENTOS ELECTRÓNICOS PARA EL CIRCUITO IMPRESO

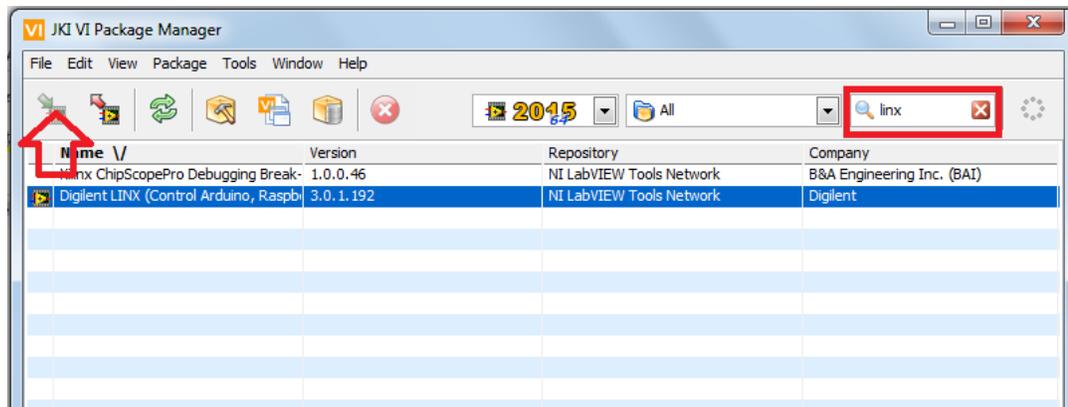
**ANEXO G.**  
DIAGRAMA DE CONEXIÓN UNITARIA Y DIAGRAMA TOTAL DE LOS  
ELEMENTOS PARA MEDIR TEMPERATURA

## ANEXO H. INSTRUCCIONES PARA ESTABLECER CONEXIÓN ENTRE LA TARJETA ARDUINO Y LABVIEW

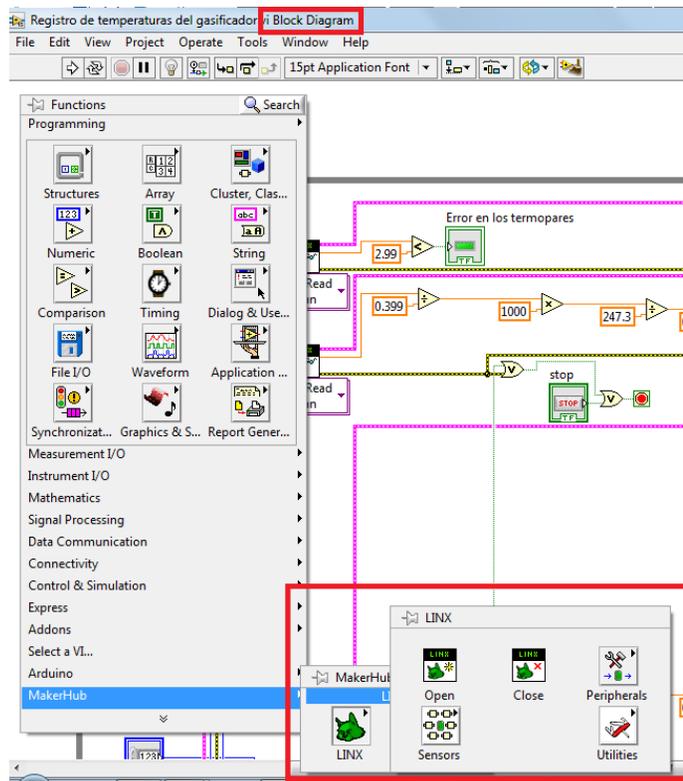
Antes de establecer conexión entre la tarjeta Arduino y LabVIEW hay que instalar el LINX para ello se debe abrir el VI Package Manager que viene en conjunto con el software LabVIEW



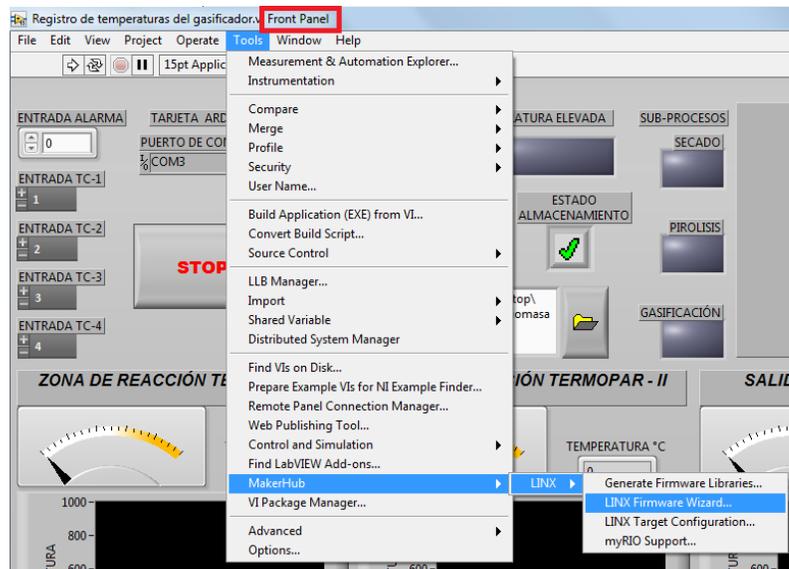
Luego de abrir el Package Manager en el buscador colocamos LINX, se selecciona el Diligent LINX y damos clic en instalar.

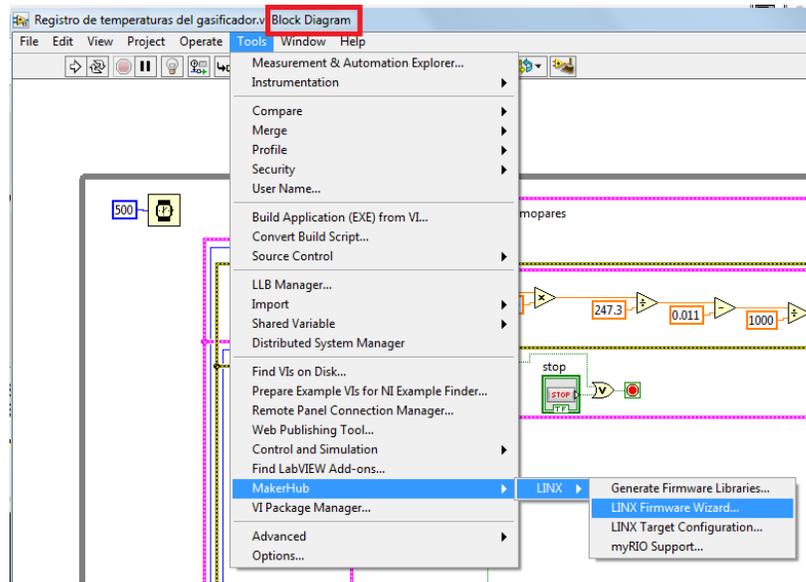


Este complemento de LabVIEW permitirá realizar el diagrama gráfico y la conexión entre la tarjeta Arduino y LabVIEW, para comprobar de que quedo instalado se abre LabVIEW en la ventana de Block Diagram dar clic izquierdo se abrirá la ventana de funciones luego buscar MakeHub y enseguida se puede observar la herramienta de LINX



Instalada la herramienta de LINX se procede a establecer la conexión para ello se abre el software de LabVIEW y se busca el botón Tools luego MakerHub se abre LINX y se selecciona LINX Firmware Wizard. En cualquier ventana se puede realizar este proceso (Front Panel o en el Block Diagram). Antes de abrir el software se recomienda conectar la tarjeta Arduino con la computadora.





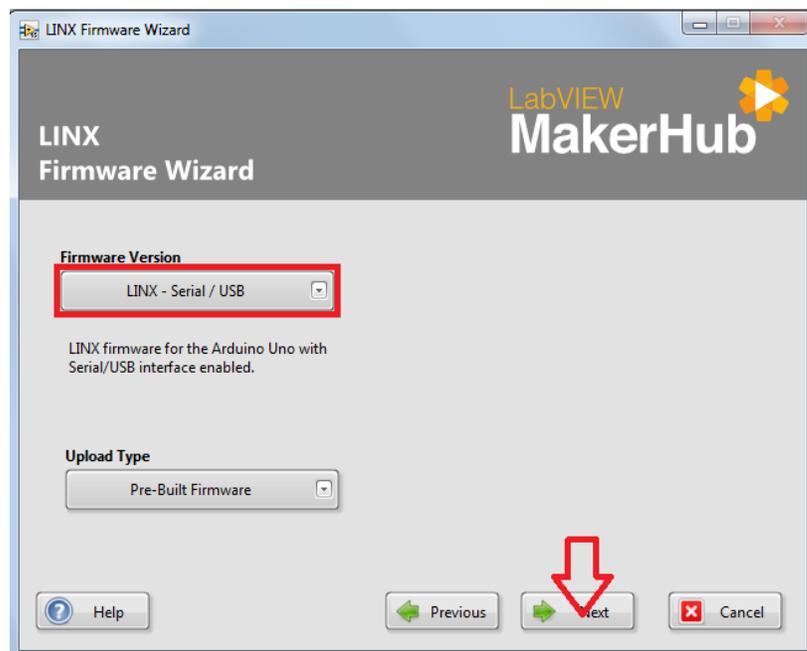
Se abre la ventana de LINX Firmware Wizard, en Device Type se selecciona el tipo de tarjeta con el que se va a trabajar para este caso es una Arduino UNO y dar clic en siguiente



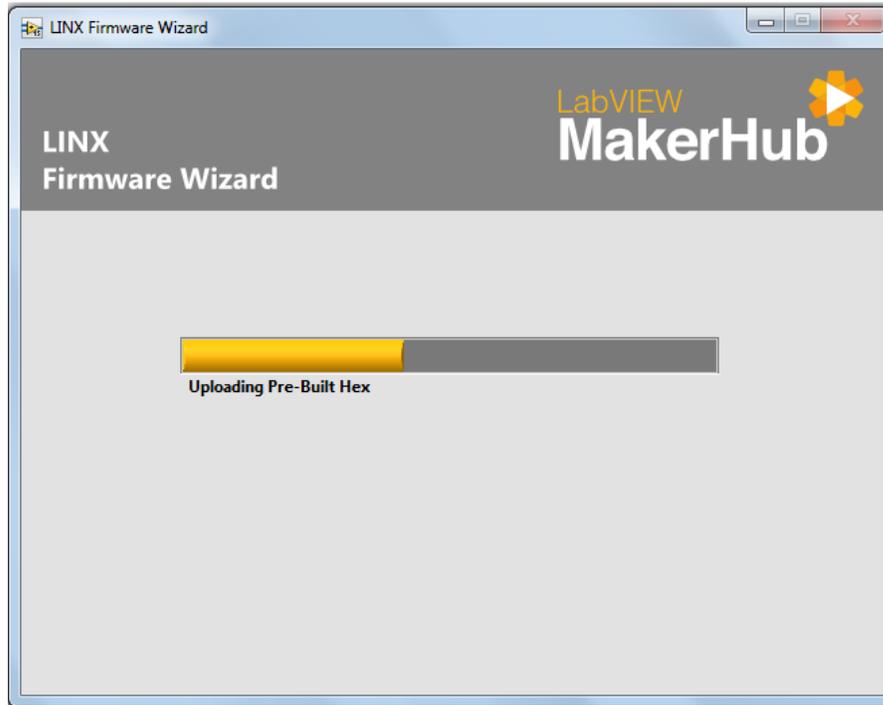
Luego se selecciona el puerto USB en el que está conectada la tarjeta Arduino y dar clic en siguiente



Después se verifica que la interface se realice por medio de serial y USB dar clic en siguiente



Cargara las especificaciones de interconexión



Cuando termine de cargar dar clic en finalizar y exitosamente se obtiene conexión entre la tarjeta Arduino y el software de LabVIEW.



**ANEXO I.**  
DIAGRAMA GRAFICO PARA LA LECTURA DE TEMPERATURA

## ANEXO J. PROPIEDADES DE MATERIALES

### Acero estructural ASTM A500 grado C.

ASTM A500 Steel, grade C, shaped structural tubing

#### ASTM A500 Steel, grade C, shaped structural tubing

**Categories:** [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [ASTM Steel](#); [Carbon Steel](#); [Low Carbon Steel](#)

**Material Notes:** The Cu content of 0.18% is a minimum content when copper steel is specified.

**Key Words:** copper steels, copper-steels, UNS K02705

**Vendors:** [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	Typical of ASTM Steel
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	425 MPa	61600 psi	
Tensile Strength, Yield	345 MPa	50000 psi	
Elongation at Break	21.0 %	21.0 %	
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel
Material Components Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	<= 0.270 %	<= 0.270 %	
Copper, Cu	<= 0.18 %	<= 0.18 %	
Iron, Fe	98.0 %	98.0 %	
Manganese, Mn	<= 1.40 %	<= 1.40 %	
Phosphorous, P	<= 0.050 %	<= 0.050 %	
Sulfur, S	<= 0.0630 %	<= 0.0630 %	

#### References for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.](#)

MS500F / 13954

## Acero inoxidable AISI 310S

### Nominal Mechanical Properties (annealed condition)

Tensile Strength ksi[MPa]	Yield Strength ksi[MPa]	% Elongation 4d	% Reduction in Area
95[655]	45[310]	50	60

### NOMINAL PROPERTIES AT ELEVATED TEMPERATURES

The properties quoted below are typical of annealed 310S and 314 SS. These values are given as a guideline only, and should not be used for design purposes.

#### SHORT TIME ELEVATED TEMPERATURE TENSILE PROPERTIES

	Temperature (°C)									
	100	300	500	600	700	800	900	1 000	1 100	
Tensile Strength (MPa)	600	530	475	420	315	215	135	85	45	
0.2% Proof Stress (MPa)	265	225	175	155	130	110				
Elongation (% in 50mm)	41	35	35	38	31	30	45	54	57	

#### REPRESENTATIVE CREEP & RUPTURE PROPERTIES

Temperature (°C)	Stress (MPa) to Produce 1% Strain		Stress (MPa) to Produce Rupture	
	10 000 hours	100 000 hours	1 000 hours	10 000 hours
450	180	115		
500	145	95		
550	115	75	240	205
600	85	60	150	130
650	55	40	90	75
700	35	25	60	50
750	20	15	45	35
800	10	10	35	25
850	5	5	25	20

### NOMINAL PHYSICAL PROPERTIES

The values given below are for 20°C, unless otherwise specified.

Density	7 900kg/m <sup>3</sup>
Modulus of Elasticity in Tension	200GPa
Modulus of Elasticity in Torsion	70GPa
Poisson's Ratio	0.30
Specific Heat Capacity	500J/kgK
Thermal Conductivity: @ 100°C	14.2W/mK
@ 500°C	18.5W/mK
Electrical Resistivity	780n $\Omega$ m
Mean Co-efficient of Thermal Expansion: 0 - 100°C	15.9 $\mu$ m/mK
0 - 315°C	16.2 $\mu$ m/mK
0 - 540°C	17.0 $\mu$ m/mK
0 - 700°C	17.8 $\mu$ m/mK
0 - 1 000°C	18.9 $\mu$ m/mK
Melting Range	1 400-1 450°C
Relative Permeability	1.02
<b>(Note: this grade remains non-magnetic even after cold working)</b>	

## Acero inoxidable AISI 316

### Nominal Mechanical Properties (annealed condition)

Tensile Strength ksi[MPa]	Yield Strength ksi[MPa]	%Elongation 4d	% Reduction in Area	Hardness HB
80[550]	30[200]	45	55	140

### PROPERTIES AT ELEVATED TEMPERATURES

The properties quoted below are typical of annealed 316 only, as strength values for 316L fall rapidly at temperatures above 800°F. These values are given as a guideline only, and should not be used for design purposes.

#### SHORT TIME ELEVATED TEMPERATURE TENSILE PROPERTIES

Temperature (°C)	100	300	500	600	700	800	900	1 000	1 100
Tensile Strength (MPa)	540	500	480	450	350	205	100	50	25
0.2% Proof Stress (MPa)	235	165	145	140	130	115			
Elongation (% in 50mm)	52	48	47	44	43	42	63	62	76

#### MAXIMUM RECOMMENDED SERVICE TEMPERATURE

(In oxidising conditions)

Operating Conditions	Temperature (°C)
Continuous	920
Intermittent	870

#### REPRESENTATIVE CREEP & RUPTURE PROPERTIES

Temperature (°C)	Stress (MPa) to Produce 1% Strain		Stress (MPa) to Produce Rupture	
	10 000 hours	100 000 hours	1 000 hours	10 000 hours
550	225	125	320	270
600	145	80	220	170
650	95	55	160	110
700	65	35	110	70
750	40	20	75	45
800	30	15	55	30
850	20	10	35	20

#### PROPERTIES AT SUB-ZERO TEMPERATURES

The properties quoted below are typical of annealed CS316 only

Temperature (°C)	20	0	-10	-50	-140	-196
Tensile Strength (MPa)	584	680	832	1 105	1 136	1 360
0.2% Proof Stress (MPa)	235	260	336	380	417	444
Elongation (%)	61	70	69	65	61	58
Impact Energy (J)	170	191	186	183	155	166

#### PHYSICAL PROPERTIES

The values given below are for 20°C, unless otherwise specified.

Density	8 000kg/m <sup>3</sup>
Modulus of Elasticity in Tension	193GPa
Modulus of Elasticity in Torsion	70GPa
Poisson's Ratio	0.25
Specific Heat Capacity	500J/kgK
Thermal Conductivity: @ 100°C	16.2W/mK
@ 500°C	21.5W/mK
Electrical Resistivity	740n m
Mean Co-efficient of Thermal Expansion: 0 - 100°C	15.9µm/mK
0 - 315°C	16.2µm/mK
0 - 540°C	17.5µm/mK
0 - 700°C	18.5µm/mK
Melting Range	1 390-1 430°C
Relative Permeability	1.02
<b>(Note: this grade is non-magnetic becoming slightly magnetic after cold working)</b>	

## Manta cerámica

### DESCRIPCION

- Disponibles para entrega inmediata con diversas combinaciones de dimensiones y densidades.
- Baja conductividad térmica y energía térmica almacenada.
- Elevada resistencia a los choques térmicos y ataques químicos.
- Buenas características acústicas y de protección contra-fuego.
- Alta flexibilidad, facilitando cortes e instalación.

La manta es producida a partir de sílice y alúmina de alto grado de pureza. Resultando fibras refractarias totalmente inorgánicas, densificadas y entrelazadas para garantizar buena resistencia mecánica al manipuleo durante la instalación.



### PROPIEDADES FISICAS

Color .....	Blanco
Densidad(kg/m <sup>3</sup> ).....	64-192
Espesor .....	3-51
Temperatura Máxima de Uso (°C).....	1100
Uso Límite .....	1260
Punto de Fusión (°C) .....	1760
Diámetro de las Fibras (μ,medio) .....	2,8
Largo de Fibras (cm,medio).....	10-25

### COMPOSICION QUIMICA TIPICA

(% peso, después de quemado)

Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	47
Sílice (SiO <sub>2</sub> ) .....	53
Otros .....	trazos

### PROPIEDADES QUIMICAS

Los productos de fibra cerámica poseen excelente resistencia a los ataques químicos,exceptuando los ácidos fluorhídrico y fosfórico y los álcalis fuertes (ej. Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O). La manta no es afectada por el aceite o el agua. Sus propiedades térmicas y físicas son restauradas al secarse.

### RESISTIVIDAD TERMICA (R)

El valor de la resistividad térmica de la fibra cerámica es definido como la inversa de la conductividad térmica multiplicada por el espesor (mm). El valor de R a 21°C según la norma ASTM C518-76 para 25mm y 96kg/m<sup>3</sup> es 0,163/mm.

## PROPIEDADES TERMICAS

(CONDUCTIVIDAD TERMICA (Btu.in/ft<sup>2</sup>.h.°F)  
X TEMPERATURA MÉDIA(°F)) ASTM C 201

Temperatura media, 8 pcf	BTU.in/ft <sup>2</sup> . h.°F	W/mK	Temperatura media, 4 pcf	BTU.in/ft <sup>2</sup> . h.°F	W/mK
500°F (260°C)	0.44	0.06	500°F (260°C)	0.54	0.08
1000°F (538°C)	0.87	0.12	1000°F (538°C)	1.29	0.19
1500°F (816°C)	1.45	0.21	1500°F (816°C)	2.30	0.33
1800°F (982°C)	1.83	0.26	1800°F (982°C)	2.96	0.43
2000°F (1093°C)	2.09	0.30	2000°F (1093°C)	--	--
<b>Temperatura media, 6 pcf</b>					
500°F (260°C)	0.47	0.07			
1000°F (538°C)	1.01	0.15			
1500°F (816°C)	1.73	0.25			
1800°F (982°C)	2.19	0.32			
2000°F (1093°C)	--	--			

### APLICACIONES TÍPICAS

- Revestimientos de hornos
- Intercambiadores de calor
- Turbinas a gas
- Estufas y hornos de laboratorio
- Craqueadores catalíticos
- Reparación de hornos
- Sellado y revestimientos de puertas de hornos
- Filtros para altas temperaturas
- Sellado de hornos de recocido de bobinas
- Sellado de tapa de horno pozo y calentadores
- Tratamientos Térmicos

### PROTECCION CONTRA-FUEGO

(UL723/ASTM E-84)

Desarrollo de humo.....	0
Contribución como combustible.....	0
Propagación de llama.....	0

### DIMENSIONES PATRONES

La manta cerámica es fabricada en los siguientes espesores y dimensiones:

Rollo patrón.....7620 x 610mm

Espesores.....6, 13, 25, 38 y 51 mm

Densidades (kg/m<sup>3</sup>)....64, 96, 128, 160 y 192

Observaciones: Existen otras combinaciones de densidades y espesores. Consulte por otras opciones

### ORIENTACION PARA APLICACIÓN EN CAPAS

Aplicación en techo (anclajes/m<sup>2</sup>).....19

Aplicación en paredes (anclajes/m<sup>2</sup>).....12

## Fibra de vidrio

Tipo de Fibra	Tensión de rotura (MPa) <sup>8</sup>	Esfuerzo de Compresión (MPa)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Dilatación térmica µm/(m°C)	T de ablandamiento (°C)
Vidrio clase E	3445	1080	2.58	5.4	846
Vidrio clase S-2	4890	1600	2.46	2.9	1056

## Aluminio

Property	Value
Atomic Number	13
Atomic Weight (g/mol)	26.98
Valency	3
Crystal Structure	FCC
Melting Point (°C)	660.2
Boiling Point (°C)	2480
Mean Specific Heat (0-100°C) (cal/g.°C)	0.219
Thermal Conductivity (0-100°C) (cal/cms. °C)	0.57
Co-Efficient of Linear Expansion (0-100°C) (x10 <sup>-6</sup> /°C)	23.5
Electrical Resistivity at 20°C (Ω.cm)	2.69
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.6898
Modulus of Elasticity (GPa)	68.3
Poissons Ratio	0.34

**ANEXO K.**  
PLANOS DEL GASIFICADOR DUAL PARA BIOMASA RESIDUAL  
AGROPECUARIA A NIVEL LABORATORIO