

DISEÑO DE UN GASIFICADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE
COMBUSTIBLES A PARTIR DE BIOMASA

DIEGO ALEJANDRO BOHORQUEZ NIÑO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2022

DISEÑO DE UN GASIFICADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE
COMBUSTIBLES A PARTIR DE BIOMASA

DIEGO ALEJANDRO BOHORQUEZ NIÑO

Proyecto de Trabajo de Grado en la modalidad de solución a un problema de
ingeniería para optar al título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR
ING. ANDRÉS JOSÉ ZAPATA SAAD

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2022

DEDICATORIA

Este proyecto de grado se lo quiero dedicar especialmente a mis padres y mi hermana por sus enseñanzas, por su apoyo en todo momento, por su motivación, por su apoyo incondicional y por nunca dejarme decaer en ningún momento, por enseñarme que uno siempre lo que comienza lo debe terminar.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres:

Al esfuerzo y apoyo incondicional que me permitieron estudiar la carrera que deseaba, iniciándola y culminándola con un buen desempeño, por su apoyo en cada momento de mi vida y por no dejarme decaer en ningún momento.

A mis profesores:

Por su gran motivación de enseñarme de la mejor manera y por los conocimientos que me brindaron para lograr el desarrollo de este trabajo.

A el Ingeniero Dionisio Malagón:

Por su apoyo, asesoría y motivación para realizar este proyecto.

A el director Ingeniero Andrés Zapata Saad:

Por su apoyo incondicional y la excelente orientación para este proyecto, debido a que con su experiencia y conocimientos se lograron los objetivos planteados, y por creer desde el comienzo en mí.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE ILUSTRACIONES	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. OBJETIVOS	13
3.1 OBJETIVO GENERAL	13
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	13
4. MARCO REFERENCIAL	14
4.1 MARCO CONCEPTUAL:.....	14
4.1.1 Biomasa:.....	14
4.1.2 Clasificación de biomasa:	14
4.1.3 Combustible:.....	17
4.1.3 Gasificación:	17
4.1.4 Proceso de la gasificación:	17
4.1.5 Tipos de gasificadores:	18
4.1.6 Reacciones de la gasificación:	23
4.1.5 Antecedentes:.....	24
5 DISEÑO CONCEPTUAL.....	26
5.1 Requerimientos del cliente:	26
5.2 Selección del tipo de gasificador:	26
5.5 Selección del tipo de biomasa a gasificar:	30
5.6 Determinación del flujo de masa para los residuos de Bagazo de caña de azúcar:	34
5.7 Propiedades químicas de los residuos de Bagazo de caña de azúcar:	34
5.8 Propiedades físicas de los residuos de Bagazo de caña de azúcar:	35
5.8.1 Análisis Próximo:	35
5.8.2 Caracterización físico química:	35
5.9 Sistema de gasificación escogido:.....	36
6. DISEÑO EN DETALLE	38
6.1 Balance de masa:.....	38
6.1.1 Potencia de salida del gasificador:	40
6.1.2 Flujo volumétrico de gas producido:.....	42
6.1.3 Flujo de aire:	42

6.2 Balance de energía:	47
6.2.1 Temperatura de gasificación Downdraft:.....	47
6.3 Dimensionamiento del gasificador:.....	48
6.3.1 Sección interna:	48
6.3.2 Sección externa:	52
6.3.3 Selección de pernos de sujeción:.....	56
6.3.4 Parte superior de la cubierta:	61
6.3.5 Parte inferior rejilla de las cenizas:.....	61
6.3.6 Materiales del gasificador:	63
6.3.7 Características de los materiales utilizados:.....	65
6.4 Resistencias y controlador de temperatura:.....	66
6.5 Equipos necesarios para el acondicionamiento del gas:.....	66
6.5.1 Diseño del ciclón:	68
6.6 Sistema de control:.....	78
6.7 Sistema de alimentación:	79
6.7.1 Diámetro y Paso del tornillo:	81
6.7.2 Capacidad de transporte:.....	82
6.7.3 Grupo motriz:	86
6.8 Estructura del gasificador:	87
6.8.1 Ruedas de la estructura:	100
7. PRESUPUESTO ESTIMADO DE FABRICACIÓN	102
7.1 Presupuesto del gasificador:	102
7.2 Presupuesto del ciclón:	103
7.3 Presupuesto de la fuente de alimentación:.....	105
7.4 Presupuesto de la estructura del gasificador:	106
7.5 Presupuesto de los materiales extras del gasificador:	107
7.6 Presupuesto total del gasificador:.....	108
8. CONCLUSIONES.....	110
9. RECOMENDACIONES.....	112
REFERENCIAS	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferencia entre gasificadores de lecho fluidizado y lecho fijo.	26
Tabla 2. Ventajas y Desventajas de los gasificadores de lecho fijo.	28
Tabla 3. Evaluación y selección del gasificador de lecho fijo.	29
Tabla 4. Condiciones de operación del gasificador tipo Downdraft.	30
Tabla 5. Potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia.	31
Tabla 6. Características sobre los residuos de biomasa escogidos.	32
Tabla 7. Evaluación y selección del tipo de biomasa residual.	33
Tabla 8. Análisis Último del Bagazo de caña de azúcar en base seca.	35
Tabla 9. Análisis próximo de los residuos de Bagazo de caña de azúcar.	35
Tabla 10. Caracterización fisio química de los residuos de bagazo de caña de azúcar.	36
Tabla 11. Moles de cada elemento de los residuos de bagazo de caña de azúcar.	40
Tabla 12. Parametros necesarios para el balance de masa.	40
Tabla 13. Oxígeno estequiométrico consumido.	43
Tabla 14. Cantidad de aire estequiométrico en el proceso de gasificación.	44
Tabla 15. Resumen de datos flujo de aire para el proceso de gasificación.	47
Tabla 16. Temperaturas de gasificación Downdraft.	47
Tabla 17. Diámetros y medidas de la garganta en la zona de oxidación.	49
Tabla 18. Aceros inoxidables austeníticos.	63
Tabla 19. Propiedades físicas Acero inoxidable 310S.	65
Tabla 20. Propiedades físicas de la fibra cerámica.	65
Tabla 21. Distribución de tamaño de partículas en el gas de síntesis.	68
Tabla 22. Características del ciclón Stairmand.	68
Tabla 23. Datos para el diseño del ciclón.	70
Tabla 24. Dimensiones del ciclón.	72
Tabla 25. Parámetros para calcular la eficiencia del ciclón.	77
Tabla 26. Eficiencia del ciclón.	78
Tabla 27. Tipos de Hélices.	80
Tabla 28. Valores de coeficiente de relleno.	83
Tabla 29. Valor de coeficiente de resistencia de material.	85
Tabla 30. Costo de materiales para el gasificador.	102
Tabla 31. Costo de mano de obra del gasificador.	103
Tabla 32. Costo de materiales para el ciclón.	104
Tabla 33. Costo de mano de obra del ciclón.	104
Tabla 34. Costo de materiales para la fuente de alimentación.	105
Tabla 35. Costo de mano de obra para la fuente de alimentación.	106
Tabla 36. Costo de materiales para la estructura del gasificador.	106
Tabla 37. Costo de mano de obra para la estructura del gasificador.	107
Tabla 38. Costo de materiales para la estructura del gasificador.	108
Tabla 39. Costo total de los materiales para la fabricación del gasificador.	108
Tabla 40. Costo total de la mano de obra para la fabricación del gasificador.	109
Tabla 41. Presupuesto total de fabricación del gasificador.	109

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Balance de CO ₂ de la biomasa.	14
Ilustración 2. Biomasa natural.	15
Ilustración 3. Biomasa Residual.	16
Ilustración 4. Biomasa Energética.	16
Ilustración 5. Etapas de la gasificación.	18
Ilustración 6. Tipos de gasificadores.	18
Ilustración 7. Esquema de un gasificador Cross draft.	19
Ilustración 8. Esquema de un gasificador Downdraft.	20
Ilustración 9. Esquema de un gasificador Updraft.	20
Ilustración 10. Esquema de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante.	21
Ilustración 11. Esquema de un gasificador de lecho fluidizado Circulante.	22
Ilustración 12. Gasificador de lecho fluidizado dual.	23
Ilustración 13. Ejemplo de gasificador downdraft.	36
Ilustración 14. Diagrama de flujo de procesos.	37
Ilustración 15. Temperaturas de gasificación Downdraft.	48
Ilustración 16. Sección interna del gasificador.	49
Ilustración 17. Esquema de medidas de la garganta en la zona de oxidación.	50
Ilustración 18. Compresor DeWalt.	51
Ilustración 19. Manguera de alta presión.	52
Ilustración 20. Sección externa del gasificador.	53
Ilustración 21. Tolla piramidal cuadrada.	56
Ilustración 22. Medidas del perno.	57
Ilustración 23. Cubierta del gasificador.	61
Ilustración 24. Rejilla de cenizas.	61
Ilustración 25. Recipiente de recolección de cenizas.	62
Ilustración 26. Equipo de gasificación completo.	62
Ilustración 27. Distribución de materia en la sección interna.	64
Ilustración 28. Distribución de materia en la sección externa.	64
Ilustración 29. Resistencias Kanthal.	66
Ilustración 30. Controlador MC 5438.	66
Ilustración 31. Vórtices en el ciclón.	67
Ilustración 32. Dimensiones del ciclón.	69
Ilustración 33. Transportadores de Tornillo Sin Fin.	79
Ilustración 34. Longitud y paso del tornillo sin fin.	82
Ilustración 35. Motorreductor helicoidal sinfín - corona.	87
Ilustración 36. Geometría de la estructura.	87
Ilustración 37. Diagrama de cuerpo libre inicial.	88
Ilustración 38. Diagrama de cuerpo libre con valores.	89
Ilustración 39. Condiciones de contorno.	90
Ilustración 40. Diagrama de cuerpo libre final.	92
Ilustración 41. Primer tramo.	93
Ilustración 42. Segundo tramo.	94
Ilustración 43. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector.	95

Ilustración 44. Tabla de perfiles cuadrados huecos.	97
Ilustración 45. Dimensiones del perfil # 45.3.....	97
Ilustración 46. Diagrama tensión normal máxima.....	98
Ilustración 47. Ruedas industriales.	101

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En los últimos años la sociedad se ha dado de la necesidad de obtener alternativas para la generación de combustible, teniendo en cuenta que estos combustibles se obtendrán de otras fuentes diferentes al petróleo [1]. Estos combustibles alternativos permiten reducir el nivel de contaminación y se podría entregar el mismo poder calorífico o incluso uno mayor, disminuyendo una gran cantidad de material particulado generado [2], como por ejemplo el Biodiésel es un combustible alternativo que se obtiene del aceite de colza, aceite de cocina o alguna variedad de plantas, a diferencia del estándar reduce el CO₂ en un 66%. También se puede ver el Biogás que se puede obtener de varias maneras, pero la más usual es usar el material orgánico en descomposición y reduce hasta un 20% las emisiones de CO₂ respecto al diésel [3]. A comienzos del siglo XXI, la energía a nivel mundial contiene un 85% por parte de los combustibles fósiles y se distribuye de la siguiente manera según su fuente de origen: 21% a partir del carbón, 23% de gas natural, 40% del petróleo y 1% para otra clase de combustibles [4]. A partir de estas cifras, se observa que el porcentaje de otras alternativas de combustible es de un rango bajo y es una alternativa que puede llegar a generar un alto impacto, debido a que estas nos ayudan reduciendo las emisiones de carbono en gran porcentaje y un bajo nivel de contaminación, dicho esto es bueno generar una incrementación en su porcentaje.

La biomasa se considera una materia orgánica que proviene de origen animal o vegetal, también de desechos orgánicos y residuos. Es una fuente que es renovable y neutra en el balance de CO₂ [5]. Existen dos tipos principales de biomasa entre las cuales se encuentra la Biomasa natural: es la que se genera por medio de ecosistemas naturales, por ejemplo: frondosas, leñas, ramas, restos de plantaciones, etc. La biomasa residual: es la que se produce por medio de actividades humanas que utilicen materias orgánicas, y se divide en algunos tipos tales como: residuos agrícolas, residuos forestales, residuos de industrias forestales, residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias, residuos urbanos y residuos ganaderos[6]. Por medio de esto para la obtención de combustibles a partir de biomasa se ha encontrado que la residual es la más apropiada en Colombia porque se genera en un nivel muy alto[7]. Entre los diferentes cultivos residuales los más indicados para la obtención de combustible teniendo en cuenta el potencial energético que generan son: raquis de banano con un potencial energético de 806.31 TJ/año, el bagazo de caña de azúcar con un potencial energético de 62 305,56 TJ/año, tallos de café con un potencial energético de 38 561,52 TJ/año, entre otros [8].

La Biomasa se puede convertir en combustible con diferentes procesos, los cuales son: Procesos físicos en el cual se deben utilizar tipos de biomazas que generen una humedad mayor al 60% [9], Están también los procesos Bioquímicos donde también manejan biomazas con alto contenido de humedad y se ve involucrada la fermentación en el proceso donde existen los dos tipos anaeróbica y aeróbica [10]. Por último, están los procesos termoquímicos que

este tipo es destacado por las reacciones químicas que se ven al momento de tener energía calórica, existen 4 tipos los cuales son: Licuefacción en donde se hace la combinación con bajos niveles de calor, expansión y compresión para que los gases generen líquidos combustibles [9]. Esta la combustión directa donde se queme la biomasa sin obstrucción de oxígeno, también está la pirolisis donde la biomasa se desintegra por medio del cambio de temperatura en ausencia de oxígeno y por último esta la gasificación se considera una combustión que está en la atmósfera con muy poco volumen de oxígeno, por esto se genera una corriente gaseosa y un residuo sólido con características combustibles donde se pueden manejar biomásas con bajo contenido de humedad [11]. Es por ello que en este proyecto se decide utilizar la gasificación debido a que es utilizada para cualquier tipo de biomasa, genera poco impacto ambiental y es uno de los procesos para generación de combustibles alternativos más utilizados en la actualidad.

La gasificación es un proceso que en el futuro su uso aumentará exponencialmente debido a que es una de las alternativas para la generación de productos químicos como el metano y también su combustible obtenido se puede utilizar en hornos, turbinas, calderas, entre otros [12]. La implementación de los gasificadores en algunas partes del mundo ha demostrado que es una excelente alternativa tanto en lo ambiental como en lo económico [13]. En la universidad Santo Tomás en el área de termo fluidos dirigida por el ingeniero Dionisio Malagón se han generado proyectos tales como el diseño y fabricación de un pirolizador que es una de las alternativas para la generación de combustible y mediante este pirolizador se han podido realizar estudios, experimentos y trabajos de grado. Es por ello, que se busca implementar nuevas alternativas en este caso el diseño de un gasificador para la Universidad Santo Tomás, ya que con esto se podrán evaluar distintas fuentes de biomasa que hay en el país [7].

2. JUSTIFICACIÓN

A lo largo del tiempo se ha venido tratando el tema de la gasificación que es una forma de obtener combustibles gaseosos por medio de cualquier tipo de biomasa, según estudios en Colombia la más apropiada para este caso es la biomasa residual[13]. Dicho esto, lo que se busca con este proyecto es incentivar la implementación de fuentes alternas de energía, en consideración con el medio ambiente en Colombia[14]. También se entiende que por medio de las biomásas se podrían usar para generar combustibles utilizando un proceso de gasificación como mecanismo de reaprovechamiento de material orgánico para no tener que desecharlas y con esto poder obtener un aprovechamiento de dicha biomasa que se vea convertida en combustible. Con esto se podría lograr que los combustibles no solo sean generados por medio del petróleo, sino también promoverlos por otras alternativas como lo es la gasificación de biomasa que esta nos permite la disminución de las emisiones de CO₂, poco impacto ambiental, una reducción de gases de efecto invernadero y así poder evitar la contaminación que se genera por medio de los combustibles fósiles [15].

Este gasificador que será implementado en la Universidad Santo Tomás servirá para generar nuevas investigaciones y prácticas que tengan que ver con estudios referentes a la gasificación, pensando en todos los estudiantes de las facultades de ingeniería que tengan áreas afines con este proceso, tales como Ingeniería Mecánica, Ambiental, Industrial o Electrónica. Sin dejar atrás que este proyecto no solo se puede ver aplicado en la parte universitaria sino también a nivel industrial para poder generar energías y empleo en zonas rurales y así poder generar combustibles.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un gasificador para la producción de combustible a partir de biomásas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Desarrollar el diseño conceptual del gasificador teniendo en cuenta los requerimientos y necesidades.
- Realizar el diseño en detalle del gasificador para poder determinar el costeo.
- Determinar el costo de fabricación del gasificador.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO CONCEPTUAL:

4.1.1 Biomasa:

La biomasa se define, como la división biodegradable de residuos y desechos orgánicos, producida directa o indirectamente por organismos vivos[16]. Es considerada como energía renovable o materia orgánica, producida por el proceso de la fotosíntesis y es un sistema ecológico que ayuda a mejorar el medio ambiente[17].

La biomasa también la podemos ver como una alternativa energética que se utiliza para la generación de calor, combustible y electricidad [16]. Es probablemente una de las fuentes de energía más antiguas, debido a que la biomasa obtiene su energía del sol [18]. También se define como una fuente de energía renovable debido a que sus suministros no son limitados [18]. Dicho esto surge la importancia de cultivar todo tipo de árboles para que se pueda aprovechar todo tipo de desechos para la generación de biomasas [18].

Existen varios tipos de biomasa en los cuales se encuentra la biomasa natural que es la que abarca los bosques, árboles, plantas de cultivo y matorrales, entre otros[19]. La biomasa residual que corresponde a los residuos de paja, aserrín, estiércol, basuras urbanas, entre otros[19].

Ilustración 1. Balance de CO₂ de la biomasa.



Fuente: Tomado de [20].

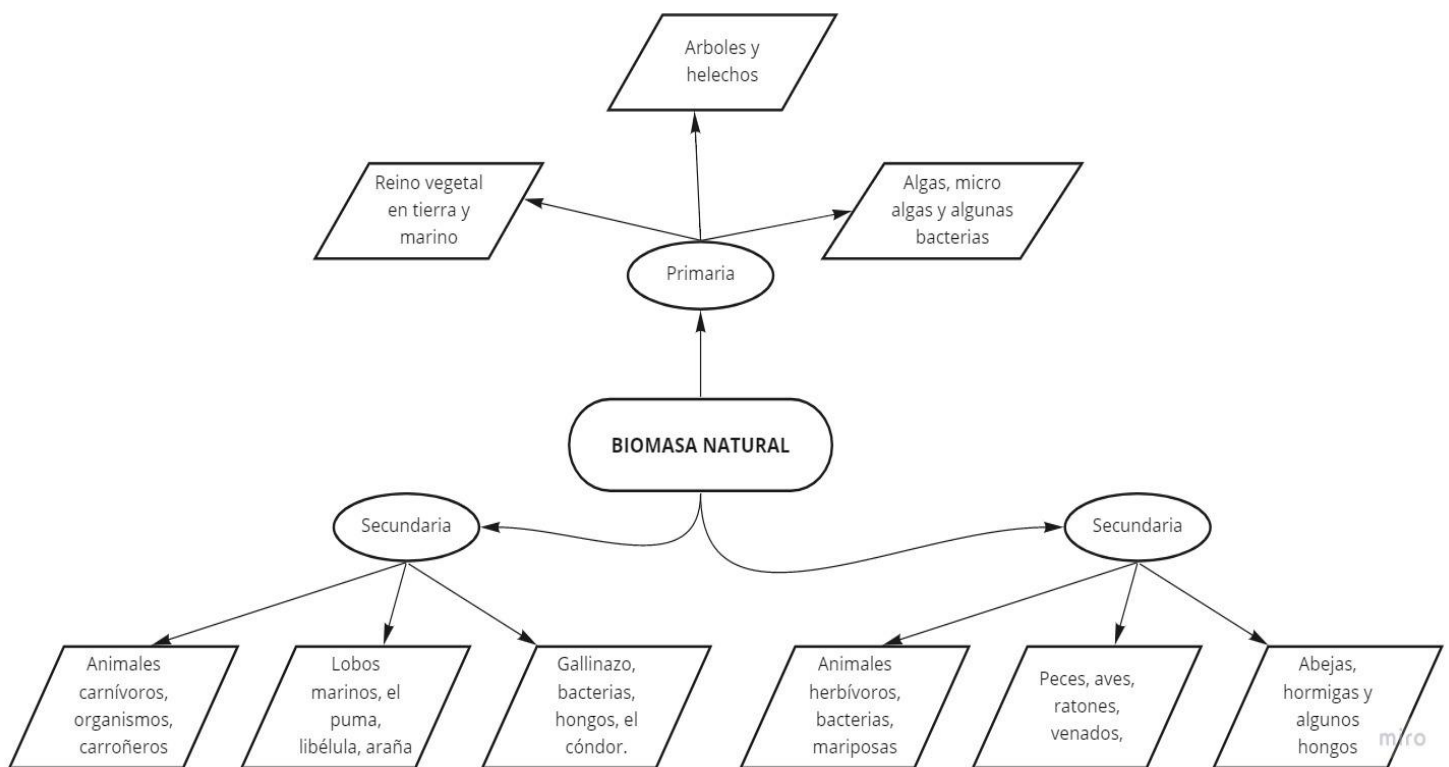
4.1.2 Clasificación de biomasa:

La clasificación de la biomasa se encuentra dividida en 3 grupos principales, que son la biomasa natural, residual y energética. En Colombia se ve una mayor parte de biomasa residual agrícola, dado que Colombia es un país productor.

- **Biomasa natural:** En este tipo de biomasa se encuentra todo ser que adquiera y utilice la energía radiante del sol directa o indirectamente para lograr la subsistencia en el planeta[21]. Se puede dividir en:

- **Biomasa Primaria:** En este grupo se conforma por la vegetación, es decir los seres autótrofos.
- **Biomasa Secundaria:** Este grupo está de la mano con las especies consumidoras de primer orden, que manipulan los seres del primer grupo para la supervivencia, dado esto se necesita de materia orgánica ya hecha.
- **Biomasa terciaria:** Este grupo se conforma por los animales en estado de putrefacción y de animales que su medio de alimentación es ellos mismos.

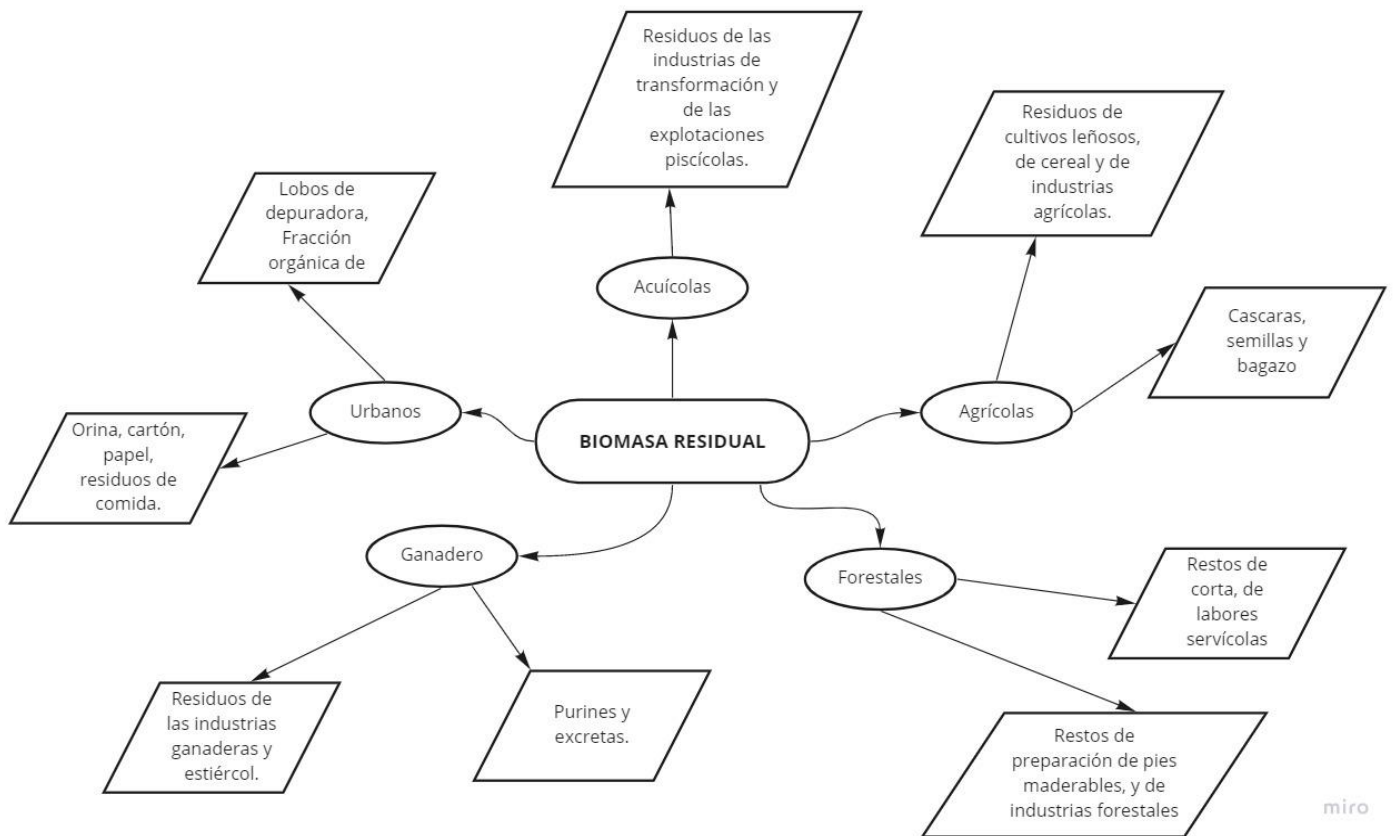
Ilustración 2. Biomasa natural.



Fuente: Autor.

- **Biomasa residual:** Esta conformado por todos los desechos degradables que produce la Biomasa natural[21]. Los desechos pueden provenir de origen urbano, forestal, agrícola entre otros.

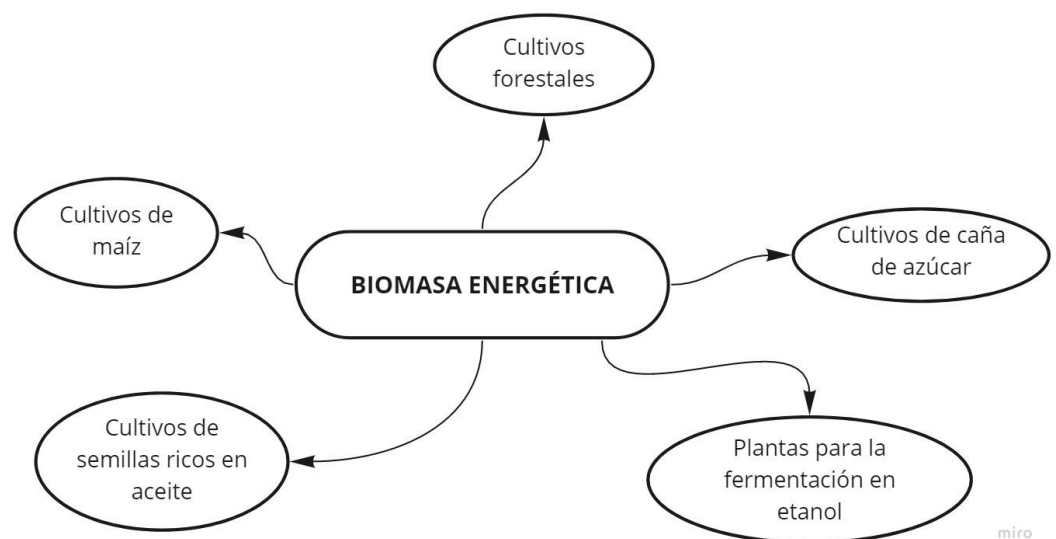
Ilustración 3. Biomasa Residual.



Fuente: Autor.

- **Biomasa energética:** Este grupo se basa en siembras que son únicamente ejecutadas para la generación de combustible, no son para el consumo humano y se conocen como cultivos energéticos[21].

Ilustración 4. Biomasa Energética.



Fuente: Autor.

4.1.3 Combustible:

Es toda sustancia que se puede quemar, es decir que reaccione tan rápidamente con oxígeno que el calor y la luz se emitan en forma de llama sostenida, generando calor y energía [22]. El combustible redime energía potencial a un estado aprovechable, sin tener en cuenta si se trata de una manera mecánica o directa, entregando como residuo el calor [22].

Los combustibles se pueden clasificar en dos tipos: Combustibles naturales o primarios: Son los que se encuentran en la naturaleza; Combustibles artificiales o secundarios: Son los derivados de los combustibles primarios y se pueden dividir en tres clases, combustibles sólidos, líquidos y gaseosos [23].

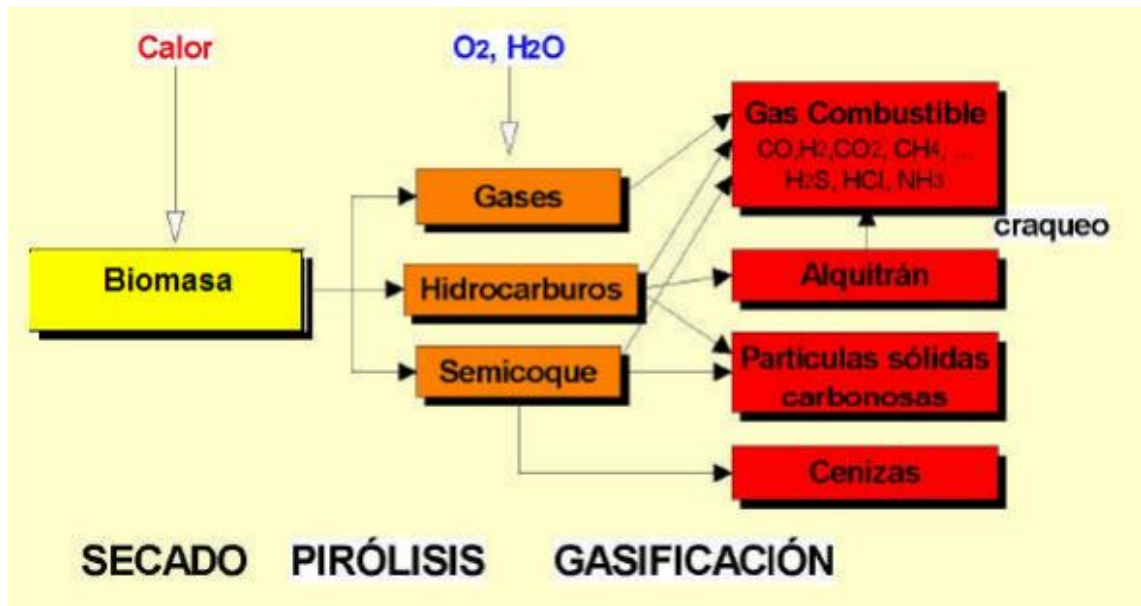
4.1.3 Gasificación:

La gasificación se considera una combustión que está en la atmósfera con muy poco volumen de oxígeno, por esto se genera una corriente gaseosa y un residuo sólido con características combustibles[24]. La gasificación de biomasa se realiza desde hace más de cien años [25]; a lo largo del tiempo se ha identificado como una de las alternativas para poder generar combustibles[26]. Este proceso consta de un proceso térmico en el cual combustibles sólidos tales como raquis de banano, café, residuos agrícolas, desechos y cualquier otro tipo de biomasa secas son transformadas a un gas combustible que puede entrar en combustión en turbinas, motores de combustión, entre otros[27].

4.1.4 Proceso de la gasificación:

- **Secado:** Debido a que los combustibles de biomasa usualmente contienen entre 10% y 35% de humedad. Se debe calentar a aproximadamente unos 200°C para que la humedad se convierta en vapor[28].
- **Pirólisis:** Posterior al secado se sigue calentando la biomasa para generar la pirólisis que es quemar la biomasa completamente sin que se pueda abastecer oxígeno, para lograr que la biomasa se descomponga o se separe en sólidos, líquidos y gaseosos. Sabiendo que los gases de combustión hacen parte de la zona gaseosa, el carbón de la parte sólida y el alquitrán de la líquida[29].
- **Oxidación:** Después de la pirólisis se introduce aire al gasificador y se mantiene entre 1000°C y 1400°C con esto el carbón o el combustible sólido reaccionan con el oxígeno para generar dióxido de carbono y calor[30].
- **Reducción:** En este paso se deja el gasificador a temperaturas más altas y en circunstancias reductoras, es decir cuando no se tiene bastante oxígeno disponible y estas reacciones tienen lugar generando dióxido de carbono, hidrógeno y metano[31].

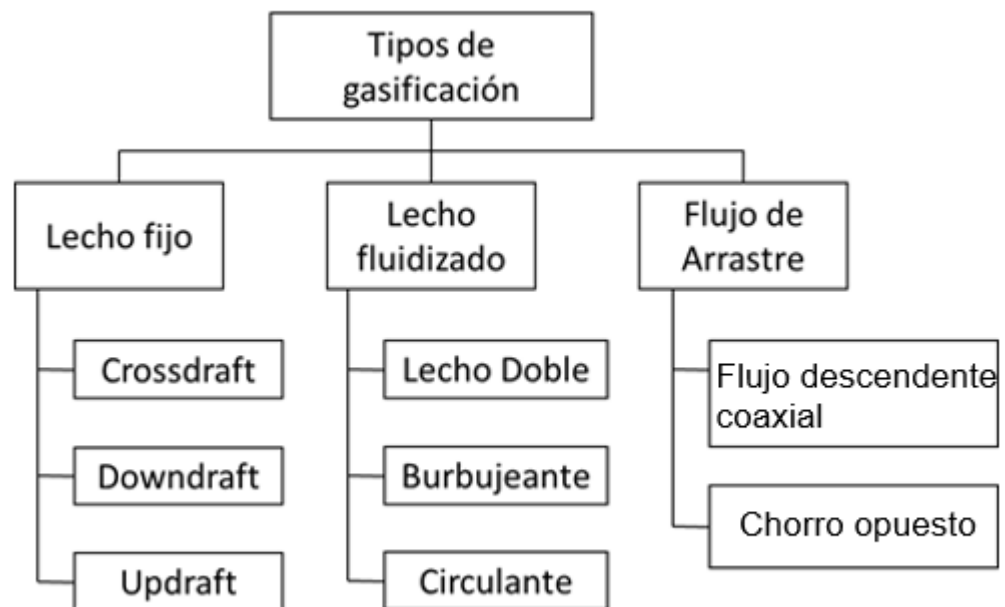
Ilustración 5. Etapas de la gasificación.



Fuente: Tomado de [32].

4.1.5 Tipos de gasificadores:

Ilustración 6. Tipos de gasificadores.



Fuente: Autor.

4.1.5.1 Lecho fijo:

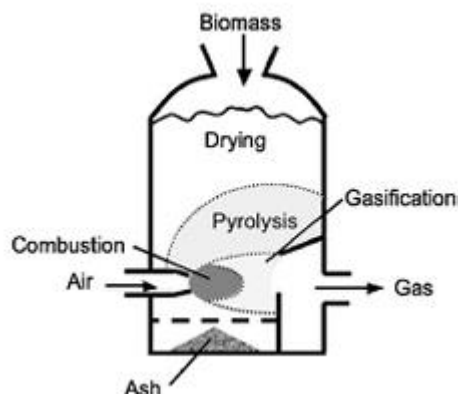
Este tipo de gasificadores tiene una tecnología fácil al momento de operar, su alimentación se logra de forma continua o por lotes. Para esta categoría existen tres tipos de gasificadores que se clasifican según la dirección del flujo, están conformados por: Cross draft (corriente cruzada), Downdraft (corriente paralela) y Updraft (contracorriente).

- **Cross draft (corriente cruzada):**

Este tipo de gasificadores está conformado por un reactor de lecho móvil en paralelo, en el que el combustible se ve alimentado desde la parte más alta y el aire es ingresado por medio de una boquilla desde una de sus partes laterales como se puede observar en la ilustración 7 [11].

Se ve utilizado primordialmente para la gasificación de carbón vegetal con un contenido de cenizas demasiado bajo. Este a comparación de los otros libera el producto de su pared lateral de una forma opuesta al punto de entrada del aire para la gasificación, por este motivo también se le conoce como corriente lateral.

Ilustración 7. Esquema de un gasificador Cross draft.



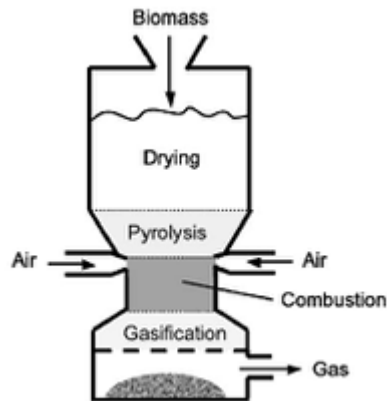
Fuente: Tomado de [11].

- **Downdraft (corriente paralela):**

Este tipo de gasificador está conformado por un reactor de corriente donde el aire ingresa al gasificador a una debida altura que este por debajo de la parte superior [33]. El gas incorporado en este fluye hacia abajo y sale por medio de un lecho de ceniza caliente como se puede observar en la ilustración 8.

Este tipo de gasificador de corrientes descendientes, tiene la tasa de alquitrán más baja debido a que pasa por medio de la zona de temperatura de ceniza caliente y esto genera que el alquitrán en el gas producto encuentre condiciones favorables para el agrietamiento[11].

Ilustración 8. Esquema de un gasificador Downdraft.



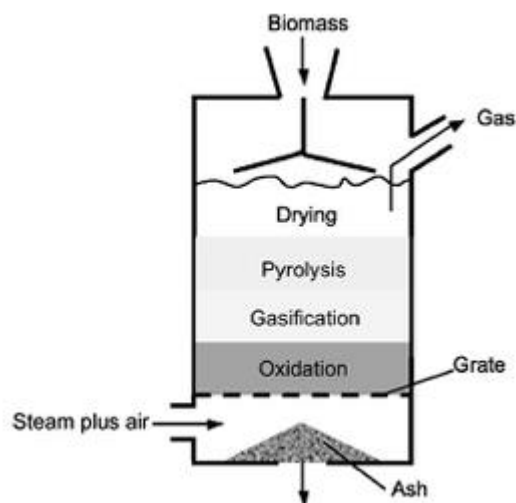
Fuente: Tomado de [11].

- **Updraft (contracorriente):**

Este tipo de gasificador también conocido como de corriente ascendente es uno de los diseños más antiguos y simples, en este gasificador el aire se transporta de abajo hacia arriba, mientras que el lecho de combustible se mueve hacia abajo, por este motivo, el gas y los sólidos están en modo contra corriente [34].

El gas producto tiene la salida en la parte superior como se observa en la ilustración 9, el medio gasificante entra al lecho por medio de una rejilla y allí se encuentra con el lecho caliente de cenizas.

Ilustración 9. Esquema de un gasificador Updraft.



Fuente: Tomado de [11].

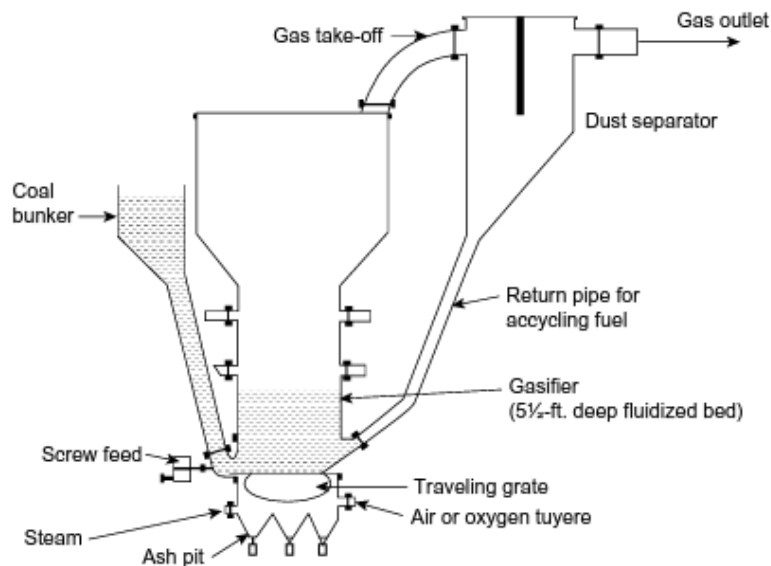
4.1.5.2 Lecho fluidizado:

Este tipo de gasificadores se destaca principalmente por su excelente homogeneidad de mezcla y temperatura. Un lecho fluidizado está hecho de sólidos granulares, que están nombrados como materiales de lecho y se mantiene en una condición seme- suspendida. Este tipo de gasificadores se pueden dividir en tres: Burbujeante, Circulante y Lecho doble.

- **Burbujeante:**

Este tipo de gasificador es uno de los más antiguos de lechos fluidizados, se ha utilizado comercialmente durante varios años. Para la gasificación de biomazas es uno de los más utilizados. Este tipo se pueden clasificar en tipos de baja temperatura y de alta temperatura. También se pueden operar a presiones atmosféricas o presiones muy altas [35].

Ilustración 10. Esquema de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante.

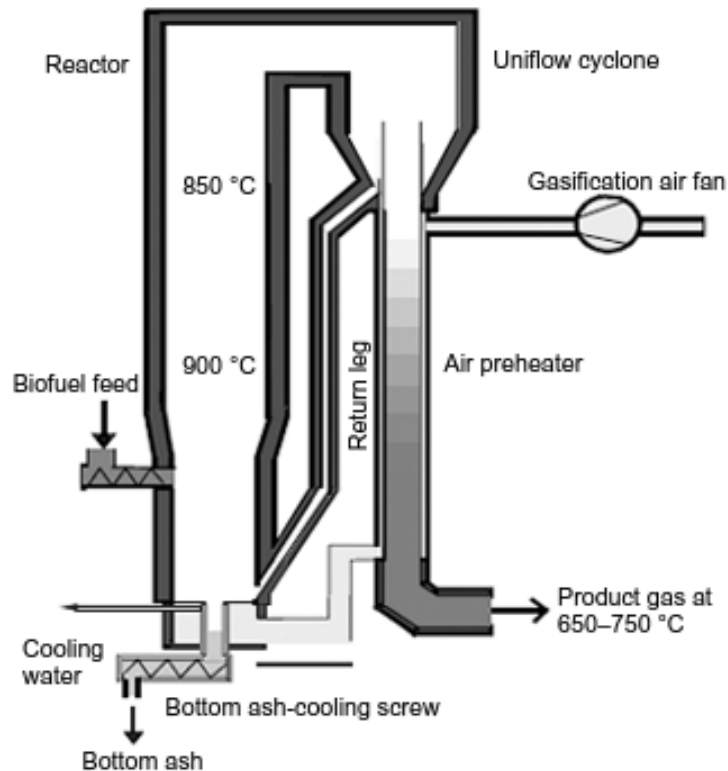


Fuente: Tomado de [11].

- **Circulante:**

Este tipo de gasificadores es una buena opción para la gasificación de biomazas, debido a que tiene un tiempo extenso de residencia del gas que proporciona. Está diseñado especialmente para combustibles con alto contenido de volátiles. Manejan una temperatura en el tubo ascendente de 800 a 1000°C [36].

Ilustración 11. Esquema de un gasificador de lecho fluidizado Circulante.



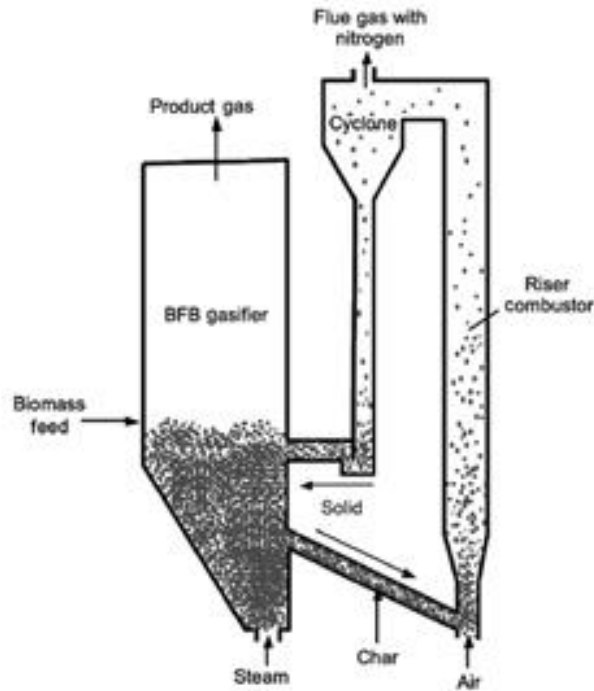
Fuente: Tomado de [11].

- **Lecho doble:**

El gasificador de lecho doble se utiliza comúnmente para poder separar el reactor de combustión del reactor de gasificación para que el nitrógeno que se ve liberado en la combustión del aire no afecte ni diluya el gas producto, estos sistemas se ven inferidos para la utilización de productos como el carbón y la biomasa. El calor generado por la combustión puede llegar a elevar la temperatura del material del lecho inerte alrededor de 900°C.

A continuación, en la ilustración 12 se observará un sistema que este compuesto por una cámara de combustión de lecho fluidizado circulante y un gasificador de lecho fluidizado burbujeante, esto lo hacer ser un gasificador de lecho doble.

Ilustración 12. Gasificador de lecho fluidizado dual.

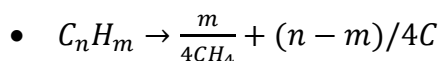


Fuente: Tomado de [11].

4.1.6 Reacciones de la gasificación:

Por medio de las reacciones que otorga la gasificación de biomasa se obtiene un gas resultante de las composiciones variables [37]. Este depende de los tipos de biomasa, temperatura, tipos de reactor, agentes gasificantes, presión, tipo de residencia en el gasificador, entre otros. Las reacciones más destacadas en la gasificación se obtienen a continuación [37]:

- $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$ $\Delta H^\circ_{298K} = -49,2 \text{ Kcal/mol}$
- $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ $\Delta H^\circ_{298K} = -57,8 \text{ Kcal/mol}$
- $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ $\Delta H^\circ_{298K} = -20,9 \text{ Kcal/mol}$
- $C + O_2 \rightarrow CO_2$ $\Delta H^\circ_{298K} = -94,1 \text{ Kcal/mol}$
- $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ $\Delta H^\circ_{298K} = -9,8 \text{ Kcal/mol}$
- $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ $\Delta H^\circ_{298K} = +41,2 \text{ Kcal/mol}$
- $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ $\Delta H^\circ_{298K} = +31,4 \text{ Kcal/mol}$
- $C_nH_m + 2(n - m)/2H_2 \rightarrow nCH_4$



4.1.5 Antecedentes:

El proceso de la gasificación es un proceso demasiado amplio, dado que se puede realizar con diferentes tipos de biomásas, ya sean residuales, agrícolas, forestales, entre otros [38]. En la mayoría de países desarrollados ya se encuentran empleando este tipo de procesos dado que con esto se puede disminuir la dependencia energética de los combustibles fósiles y poder acortar las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera [38].

Una muestra de ello es la patente generada por Sánchez[39], en la Universidad Politécnica de Cataluña (España), en donde se realizó el Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa. En este proyecto escogieron realizar un gasificador de tiro invertido o downdraft, dado que respecto a las necesidades del cliente es la que más se ajusta dándoles una efectividad en aplicaciones de baja potencia y una facilidad en su mantenimiento[39]. Para el proceso de la gasificación se escogió como biomasa mazorcas de maíz, un residuo que es muy abundante en la zona donde se encuentran[39]. Para la elaboración del gasificador se escogieron distintos tipos de materiales en las diferentes partes que lo componen: para la garganta o punto crítico se empleó un acero AISI 310, este es un acero inoxidable y puede resistir altas temperaturas; para el reactor interior se utilizó también un acero AISI 310, Para el reactor exterior se utilizó un acero AISI 304 debido a que en esa parte no se va a someter a altas temperatura, la cubierta exterior también se realizó con un acero AISI 304, la parrilla utilizó un acero AISI 310, en el sistema de canalización de la biomasa se utilizó un acero AISI 304; las partes restantes fueron construidas con Acero inoxidable[39]. Para el caudal de gas de síntesis se utilizó uno de $0.0638857 \frac{m^3}{s}$ [39]. Para la parte del filtro cilíndrico lo diseñaron con un volumen de 47.2 Litros y el diámetro que debe tener el filtro es de 348.52mm. Para el grupo motor-generator escogieron el PERFORM 6500 GAZ, de la marca KOHLER, este motor es capaz de operar consumiendo gasolina o gas combustible, con una potencia de 5.8 kW[39]. En cuanto al costeo detallado del proyecto se generó un total de 7349.78 E (Euros)[39].

Por otro lado, también se realizó el diseño de un gasificar personal de biomasa para la producción de SynGas Generado por Ryan Ott, Dan Childress, Doug Koch, Michael Koch de la facultad de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de la Universidad de Missouri[40]. En este proyecto decidieron diseñar el gasificador a una escala pequeña en donde decidieron que la biomasa a quemar serán troncos para poder producir gas de síntesis[40]. En sus especificaciones sobresale la temperatura que debe soportar, superior a 500°C, con una presión de 30psi[40]. El material a usar para la cámara y los diferentes elementos es

acero AISI 309 debido a que soporta altas temperaturas y es un acero inoxidable recocido. Su costo de fabricación es de 797 Dólares[40].

Visto desde otro lado el Departamento de Bioenergía del instituto internacional de energía renovable ubicado en India, Diseño y desarrollo un gasificador de corriente ascendente utilizando biomasa sólida[41]. Para este caso para determinar el rendimiento del modelo usaron biomasa tales como: Astillas de madera, cáscaras de coco y azúcar prensado cada una con un peso de 30kg[41]. También se determina que el diámetro del reactor es de 0.6m que el rango de temperatura que debe estar es entre 900°C y 1150°C, que el flujo de aire debe ser de $0.03 \frac{m^3}{s}$. Los materiales a usar son aceros inoxidables tales como el, AISI 309 Y EL AISI 304[41].

5 DISEÑO CONCEPTUAL

5.1 Requerimientos del cliente:

En este caso el cliente es la Universidad Santo Tomás, se definen unos requerimientos del gasificador teniendo en cuenta que va a ser para un gasificador a nivel laboratorio.

Estos requerimientos se proporcionan mediante una entrevista donde se pide una descripción de los requerimientos dados por el ingeniero Dionisio Malagón encargado del área de termo fluidos, Ingeniero Andrés Zapata director de tesis y laboratorista encargado, estos requerimientos se tienen en cuenta debido a que este gasificador será diseñado para la universidad.

- **Dimensiones:** El espacio establecido para el gasificador va a ser de máximo $4m^2$ de base y de altura que no supere los $3m$
- **Escala del gasificador:** Que sea a nivel laboratorio.
- **Potencia del gasificador:** Que no supere los 100 kW.
- **Gasto energético:** Bajo o medio costo energético.
- **Tipo de Biomasa:** Seleccionar la biomasa con propiedades más críticas para que con esto se pueda tener un gasificador que funcione con cualquier tipo de biomasa.
- **Porcentaje de humedad:** Bajo
- **Mantenimiento:** Facilidad de mantenimiento y bajo costo.
- **Costos y fabricación:** costo de fabricación bajo y facilidad de fabricación
- **Cenizas:** Facilidad para el retiro de cenizas.

5.2 Selección del tipo de gasificador:

- **Diferencias generales entre configuraciones de gasificadores**

Una vez especificado el concepto de todos los tipos de gasificadores existentes, se simplifican en la Tabla 1. Las diferencias generales entre el gasificador de lecho fijo y de lecho fluidizado.

Tabla 1. Diferencia entre gasificadores de lecho fluidizado y lecho fijo.

Conceptos a comparar	Lecho Fluidizado	Lecho Fijo
Inversión inicial	Costo por KW más nivelado	Alto costo por KW instalado
Alcance Potencial	Preferiblemente potencias mayores a 500KW	Preferiblemente potencias menores a 500KW

Tiempo de encendida	Encendido rápido	Encendido entre 15 y 30 minutos
Emisiones	Controlables	No controlables
Materia prima	Biomasa heterogénea	Biomasa homogénea
Dimensionamiento de partículas de biomasa	Menores a 50mm	Menores a 100mm
Gas resultante	Gas de síntesis sucio	Gas de síntesis limpio
Formación de escorias	Las cenizas no llegan a fundirse	Presencia en estado líquido

Fuente: Tomado de [42].

Una vez definida la tabla y estableciendo que los requerimientos del cliente son obtener el diseño de un gasificador a nivel laboratorio, se ve pertinente seleccionar el gasificador de lecho fijo debido a que cumple básicamente con todo lo requerido por la Universidad Santo Tomás.

Se selecciona los gasificadores de lecho fijo debido a su efectividad en aplicaciones de baja potencia y la facilidad al momento de realizar su debido mantenimiento, su construcción es más económica respecto a los gasificadores de lecho fluidizado y presenta un gas de síntesis con pequeñas cantidades de alquitranes, es por esto que se considera la opción más optima.

Posterior a esto, se definirá que tipo de gasificador de lecho fijo se va a escoger, debido a que existen tres tipos que ya han sido definidos anteriormente.

- **Diferencias entre gasificadores de lecho fijo:**

Una vez definido el gasificador de lecho fijo, se procederá a presentar las ventajas y desventajas principales entre el gasificador de lecho fijo Cross draft, Downdraft y Updraft.

Tabla 2. Ventajas y Desventajas de los gasificadores de lecho fijo.

Tipo de Gasificador	Ventajas	Desventajas
Cross draft (Flujos Cruzados)	*Logra el alcance de temperaturas hasta 1500°C *Soporta cargas pesadas y a su vez es flexible a variaciones de carga.	*Exigente con materiales por altas temperaturas *Maneja una alta formación de escorias *Altas pérdidas de presión
Updraft (Tiro directo)	*Genera muy poca contaminación con respecto a los otros. *Bajo contenido de cenizas	*No es factible para biomásas con dimensiones pequeñas.
Downdraft (Tiro invertido)	*Mínima temperatura de salida *Bajas pérdidas de presión. *Maneja una alta eficiencia térmica. *Poca generación de escorias.	*Poca tolerancia a variaciones de carga *Es necesario una etapa de limpieza de gas. *Sensible a humedad excesiva. *Sensible a cenizas

Fuente: Tomado de [39].

- **Evaluación de los tipos de gasificadores de lecho fijo:**

Después de definir más específicamente los tres tipos de gasificadores de lecho fijo se procederá a seleccionar alguno de ellos, teniendo en cuenta los siguientes criterios [43]:

1. Tamaño de partículas
2. Eficiencia y Costos
3. Cantidad de alquitranes
4. Mantenimiento
5. Mayor potencia
6. Mayor capacidad
7. Fabricación y construcción
8. Retiro de cenizas

Cada uno tendrá un porcentaje el cual indicará su nivel de importancia según las necesidades del cliente. De igual manera a cada criterio se le asigna un valor

numérico del 1 a 5, que indicará el nivel de cumplimiento dentro de cada alternativa, donde 1 es deficiente y 5 es excelente. A continuación, se presenta la tabla de evaluación (Tabla 3)

Dichos valores que se proporcionan a cada tipo de gasificador surgen de la búsqueda de bibliografías de gasificadores de estos tipos donde se determina si cumplen o no con estos criterios que se establecieron y luego de generar la búsqueda se llega a una determinación del valor numérico que tiene cada criterio con el ingeniero Dionisio Malagón y el ingeniero Andrés Zapata para así dar el valor indicado a cada tipo de gasificador, así mismo la importancia que tiene cada criterio surge de la investigación de gasificadores ya diseñados donde le dan importancia a dichos criterios y se llega a un consenso con los ingenieros debido a que esto va sujeto a los requerimientos y necesidades que determina el cliente.

Tabla 3. Evaluación y selección del gasificador de lecho fijo.

Criterio	Importancia (%)	Cross draft	Updraft	Downdraft
Tamaño de partículas	10	4	5	4
Eficiencia y costos	25	3	3	3
Cantidad de alquitranes	10	4	3	5
Mantenimiento	15	4	4	4
Mayor capacidad	15	2	3	5
Fabricación y construcción	15	4	4	5
Retiro de cenizas	10	3	3	3
Total	100	3.35	3.5	4.05

Fuente: Autor.

Como se puede observar en la Tabla 3, la alternativa más factible que cumple con los requerimientos y los criterios establecidos es el gasificador de lecho fijo Downdraft, debido a que obtuvo la mayor puntuación teniendo un 4.09/5.

Este equipo es el indicado para este proyecto, debido a que es un equipo que se va a utilizar a nivel laboratorio, esto quiere decir que debe ser a pequeña escala y con este gasificador Downdraft se tendrá bajo costo en la construcción y se tendrán baja cantidad de alquitranes en el gas de síntesis.

A continuación, se mencionará según bibliografía ya establecida en el libro “Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory” donde

establecen las condiciones de operación que tiene el gasificador de lecho fijo Downdraft [11]:

Tabla 4. Condiciones de operación del gasificador tipo Downdraft.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Capacidad máxima	350kW
Contenido de cenizas	5%
Humedad	Máximo 35 %
Temperatura de salida del gas	Baja
Tamaño de partícula	2 – 20cm
Demanda de oxígeno	Baja
Demanda de vapor	Baja
Temperatura	1000 – 1200°C
Presión operacional	Atmosférica
Presión de alimentación	35 – 1050 kPa

Fuente: Tomado de [24] [11].

5.5 Selección del tipo de biomasa a gasificar:

Para el proceso de gasificación se utiliza cualquier tipo de biomasa, en el caso de este proyecto se realiza una selección en específico de la biomasa para poder realizar los cálculos pertinentes para el gasificador y con esta biomasa poder realizar el análisis elemental para poder conocer la composición del combustible.

Para la selección del tipo de biomasa que se va a gasificar, primero se hace una breve investigación y se define según la UPME, que en Colombia la biomasa que más abunda según los atlas de potencial energético, es la biomasa residual [44].

De acuerdo con lo anterior y con el propósito de determinar la biomasa residual adecuada se realiza una investigación de los atlas de potencial energético y se llega a la conclusión que Colombia tiene un gran abastecimiento de la biomasa residual agrícola, por el motivo que en todo Colombia se presenta una gran cosecha de variedades de cultivos [44].

A continuación, en la tabla se observan los cultivos de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia, donde nos muestran la producción que de biomasa que se genera según toneladas año (t/año) y el potencial energético según Tera julio/año (TJ/año).

Tabla 5. Potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia.

Cultivo	Producción [t/año]	Tipo de residuo	Origen del residuo	Factor de residuo [t residuo/t producto principal]	Masa de residuo	Potencial energético
					[t / año]	[TJ / año]
Palma de Aceite	872.117	Cuesco	RAI	0,22	180.074	2.627,44
		Fibra		0,63	546.381	6.778,89
		Raquis de Palma		1,06	924.618	6.607,31
Caña de Azúcar	2.615.251	Hojas - Cogollo	RAC	3,26	8.525.718	41.707,22
		Bagazo	RAI	2,68	7.008.873	76.871,65
Caña Panelera	1.514.878	Bagazo	RAC	2,53	5.680.790	62.305,56
		Hojas - Cogollo	RAI	3,75	3.832.640	18.749,01
Café	942.327	Pulpa	RAI	2,13	2.008.192	7.206,79
		Cisco		0,21	193.46	3.338,57
		Tallos	RAC	3,02	2.849.596	38.561,52
Maíz	1.368.996	Rastrojo	RAC	0,93	1.278.642	12.573,18
		Tusa		0,27	369.629	3.845,88
		Capacho		0,21	288.858	4.383,73
Arroz	2.463.689	Tamo	RAC	2,35	5.4789.669	20.699,41
		Cascarilla	RAI	0,2	492.738	7.136,53
Banano	1.878.194	Raquis de banano	RAC	1	1.878.194	806,31
		Vástago de banano		5	9.390.968	5.294,27
		Banano de rechazo	RAI	0,15	281.729	485,34
Plátano	3.319.357	Raquis de plátano	RAC	1	3.319.357	1.425,00
		Vástago de plátano		5	16.596.783	9.356,64
		Plátano de rechazo	RAI	0,15	497.903	875,43
TOTAL	14.974.807				71.943.813	331.645,71

Fuente: Tomado de [44].

Luego de analizar la tabla, se seleccionan los 5 tipos de cultivos con más producción de biomasa y así mismo se selecciona el tipo de residuo del cultivo

que se va a manejar teniendo en cuenta que cumplan con una producción y un potencial energético alto para que con esto se pueda realizar un análisis más profundo para la selección apropiada de la biomasa a gasificar.

Se puede observar en la tabla que los tipos de cultivos con mayor producción y potencial energético resaltados con amarillo son la caña de azúcar, la caña de panela, el plátano, el Arroz y el Café seleccionando así los tipos de residuos de cada uno respectivamente como el Bagazo, Hojas – cogollo, Vástago de plátano, Tamo y Tallos.

A continuación, en la tabla 6 se identificarán algunas características principales de cada tipo de biomasa, con estas características se tendrá en cuenta la selección buscando la que tenga menor cantidad de cenizas y humedad y mayor poder calorífico:

Tabla 6. Características sobre los residuos de biomasa escogidos.

Cultivo	Ceniza [%]	Poder calorífico superior [kJ/kg]	Humedad [%]
Bagazo de caña de azúcar	9	19 469	7.57
Hojas cogollos de caña panelera	12.38	15 413.856	7.72
Vástago de plátano	11.53	8 501.89	8.3
Tamo de arroz	13	13 900	9
Tallos de café	10	17 521.313	11.44

Fuente: Tomado de [45] [21] [46] [47] [48] [49] [50] [51].

- **Evaluación de los tipos de biomasa residuales seleccionados:**

Después de definir más específicamente los cinco tipos de biomasa residual seleccionados se procederá a seleccionar alguno de ellos, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

1. Poder calorífico
2. Potencial energético
3. Cantidad de residuos
4. Humedad
5. Ceniza

Cada uno tendrá un porcentaje el cual indicará su nivel de importancia según la importancia que tengan al momento de la gasificación. De igual manera a cada criterio se le asigna un valor numérico del 1 a 5, que indicará el nivel de cumplimiento dentro de cada alternativa, donde 1 es deficiente y 5 es excelente. A continuación, se presenta la tabla de evaluación (Tabla 7)

Dichos valores que se proporcionan a cada tipo de biomasa surgen de la búsqueda de las propiedades o características principales de estos tipos de biomasa donde se determina si cumplen o no con estos criterios que se establecieron y luego de generar la búsqueda se llega a una determinación del valor numérico que tiene cada criterio con el ingeniero Dionisio Malagón y el ingeniero Andrés Zapata para así dar el valor indicado a cada tipo de biomasa, así mismo la importancia que tiene cada criterio se determina con un consenso con los ingenieros determinando que tanto va a verse influido este criterio en el diseño del gasificador debido a que esto va sujeto a los requerimientos y necesidades que determina el cliente.

Tabla 7. Evaluación y selección del tipo de biomasa residual.

Criterio	Importancia (%)	Bagazo de caña de azúcar	Hojas cogollos de caña panelera	Vástago de plátano	Tamo de arroz	Tallos de café
Poder Calorífico	15	5	4	3	3	4
Potencial energético	15	5	4	3	4	4
Cantidad de residuos	20	4	3	5	3	3
Humedad	30	4	4	4	4	4
Cenizas	20	4	4	4	4	4
Total		4.3	3.8	3.9	3.65	6.8
100						

Fuente: Autor.

Como se puede observar en la Tabla 6, la alternativa más factible que cumple con los criterios establecidos por las características que tiene el gasificador de lecho fijo Downdraft es la biomasa residual del Bagazo de caña de azúcar, debido a que obtuvo la mayor puntuación teniendo un 4.3/5.

Cabe resaltar que la Biomasa seleccionada no quiere decir que el gasificador a diseñar solo se pondrá en funcionamiento con dicha Biomasa, Esta selección de la biomasa se realiza para poder realizar el debido Balance de masa, para que con esto se pueda encontrar las variables de salida de los residuos, el flujo de aire que tendrá el gasificador y el flujo volumétrico de gas.

Si se desea realizar la gasificación con otro tipo de biomasa en lo único que se verá afectado es en el balance de masa y en el gas combustible que arroje el gasificador luego de realizar el proceso.

5.6 Determinación del flujo de masa para los residuos de Bagazo de caña de azúcar:

En Colombia existen variedades de Biomasa residual del sector agrícola, en el caso de la caña de azúcar tiene una producción de 2 615 251 [T / año] [7]. Esta caña de azúcar genera dos residuos los cuales son las Hojas – Cogollo y el Bagazo.

En el caso del Bagazo de caña de azúcar genera un factor de residuo del 2,680 con respecto a las toneladas de producción de caña de azúcar. El Bagazo de caña de azúcar tiene una masa de residuo de 7 008 873 [T / año].

En diseños y patentes ya establecidas de gasificadores downdraft a nivel laboratorio manejan una producción de biomasa entre 15 y 35 kg/hora [43] [39] m. Es por esto que como primer diseño se establece que para este proyecto se tomara el equivalente de 30 kg (residuo) / h, que es un dato que se encuentra en el rango establecido, al momento de realizar los cálculos de la potencia del gasificador nos da un dimensionamiento del gasificador demasiado alto.

Por medio de iteraciones del flujo masico se determina que debe ser de 15 kg (residuo) / h, para que cálculos y el dimensionamiento este acorde con los requerimientos establecidos.

5.7 Propiedades químicas de los residuos de Bagazo de caña de azúcar:

Las propiedades químicas de los residuos de caña de azúcar son importantes en este proyecto debido a que con estos datos podemos realizar el respectivo balance de masa y así poder determinar cuál es el flujo de aire real, estas propiedades se pueden determinar por medio de un análisis elemental en este se puede observar las fracciones de masa de los compuestos en los residuos los cuales son: Oxígeno, Nitrógeno, Azufre, Carbono e Hidrógeno.

Estas fracciones de residuos de caña de azúcar, son elementales para poder realizar el debido balance de masa porque son las propiedades que se ven involucradas en dicho balance, por el motivo de que influyen en la proporción de agente gasificante / combustible. Estos porcentajes se tomaron de un proyecto donde analizan el bagazo de caña de azúcar [52].

Tabla 8. Análisis Último del Bagazo de caña de azúcar en base seca.

Muestra	Bagazo de caña
%C	48.3
%H	8.32
%O	42.87
%N	0.43
%S	0.11

Fuente: [52].

5.8 Propiedades físicas de los residuos de Bagazo de caña de azúcar:

5.8.1 Análisis Próximo:

El Análisis próximo se realiza para poder observar la fracción en peso del contenido de carbón fijo, cenizas y material volátil. El material volátil hace referencia al material que abandona el material solido en el momento de realizar la pirólisis y en cuanto a las cenizas y el carbón fijo hacen referencia al sólido residual, lo que es desechado en el proceso.

En la tabla 8 se muestra las fracciones en peso, el material volátil, el carbón fijo y el porcentaje de cenizas. Estas muestras fueron realizadas con los residuos de bagazo de caña de azúcar en base seca.

Tabla 9. Análisis próximo de los residuos de Bagazo de caña de azúcar.

Muestra	Bagazo de caña
% Materia volátil	77.9
% Carbón fijo	13.1
% Cenizas	9

Fuente: [52].

5.8.2 Caracterización físico química:

La caracterización físico química son parámetros que se tienen en cuenta debido a que con estos se podrá determinar cuál es la potencia que va a necesitar el gasificador.

El poder calorífico superior es definido como la energía de una forma de calor producida por la combustión completa de una sustancia a un volumen constante a condiciones estándares.

En la tabla 9 se muestra la cantidad de contenido de humedad que tiene el bagazo de caña de azúcar, el poder calorífico superior y la densidad bulk que es

también conocida como la densidad aparente, es la magnitud que relaciona la masa de un cuerpo con el volumen que presenta.

Tabla 10. Caracterización físico química de los residuos de bagazo de caña de azúcar.

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor
Contenido de humedad (Base húmeda)	M	%	7.57
Poder calorífico superior	PCS	$\frac{kJ}{kg}$	19 469
Densidad Bulk	$\rho_{residuos}$	$\frac{kg}{m^3}$	188

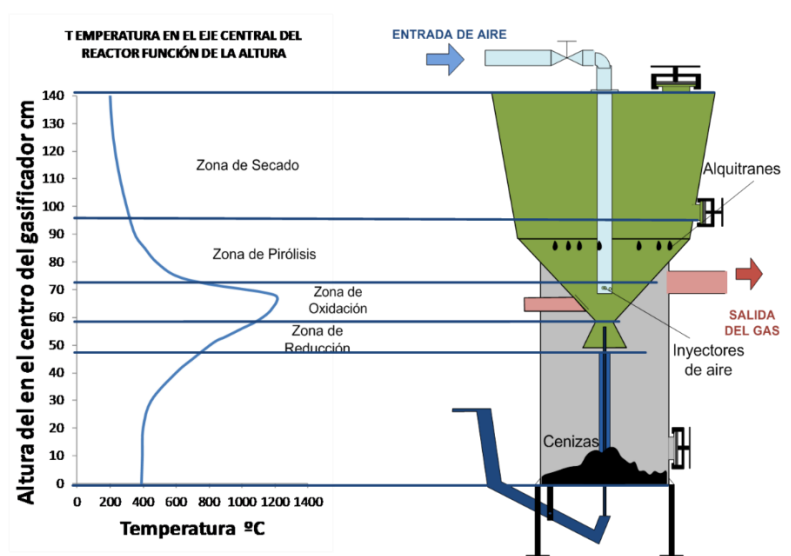
Fuente: [52] [53].

Para la densidad bulk o densidad aparente se consultó un artículo que establece cuales son las características del bagazo de la caña de azúcar y en el estudio que realizan establecen que esta densidad varía dependiendo el diámetro de partícula que sea estudiada, en promedio la densidad bulk del bagazo es de 188 kg/m³ en base seca, siendo esta densidad bulk alta, es satisfactorio para nuestro proceso debido a que en la gasificación a mayor densidad bulk y aparente del combustible mayor será la cantidad de energía generada por volumen.

5.9 Sistema de gasificación escogido:

Por último, se muestra en la siguiente ilustración un ejemplo de un gasificador downdraft ya seleccionado y con esto se busca tener una idea más clara del desarrollo del gasificador a diseñar en este proyecto.

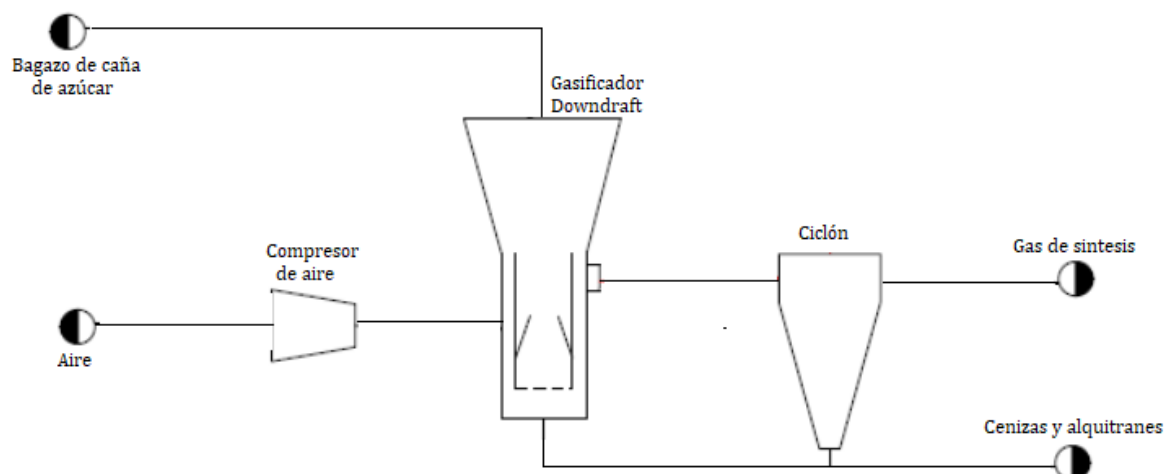
Ilustración 13. Ejemplo de gasificador downdraft.



Fuente: [54].

Se muestra el diagrama de flujo del proceso que se realizara en la gasificación:

Ilustración 14. Diagrama de flujo de procesos.



Fuente: Autor.

6. DISEÑO EN DETALLE

En el diseño en detalle se realizarán los cálculos pertinentes para poder determinar cuál es el flujo volumétrico de gas, el flujo de aire y se realizaran los respectivos cálculos para determinar el dimensionamiento que va a tener el gasificador.

6.1 Balance de masa:

Teniendo en cuenta los datos de entrada los cuales son el flujo de residuos de bagazo de caña de azúcar y la composición físico química, se realizan los balances de masa para poder determinar el flujo de aire real, el flujo volumétrico de gas y el flujo de aire real.

Para el cálculo del número de moles de cada elemento, es necesario saber la masa molar de cada elemento, que se muestra a continuación:

$$M_H = 1 \text{ kg/kmol}$$

$$M_O = 16 \text{ kg/kmol}$$

$$M_C = 12 \text{ kg/kmol}$$

$$M_N = 14 \text{ kg/kmol}$$

$$M_S = 32 \text{ kg/kmol}$$

A continuación, se realiza el cálculo de los moles de cada elemento:

Hidrógeno:

$$N_H = \frac{m_H}{M_H} = \frac{8.32 \text{ kg}}{1 \text{ kg/kmol}} = 8.32 \text{ kmol}$$

Donde:

N_H = Número de moles del hidrogeno

m_H = Masa del hidrogeno en el bagazo de caña de azúcar

M_H = Masa molar del hidrogeno

Oxígeno:

$$N_O = \frac{m_O}{M_O} = \frac{42.87 \text{ kg}}{16 \text{ kg/kmol}} = 2.68 \text{ kmol}$$

Donde:

N_O = Número de moles del oxígeno

m_O = Masa del oxígeno en el bagazo de caña de azúcar

M_O = Masa molar del oxígeno

Carbono:

$$N_C = \frac{m_C}{M_C} = \frac{48.3 \text{ kg}}{12 \text{ kg/kmol}} = 4.025 \text{ kmol}$$

Donde:

N_C = Número de moles del carbono

m_C = Masa del carbono en el bagazo de caña de azúcar

M_C = Masa molar del carbono

Nitrógeno:

$$N_N = \frac{m_N}{M_N} = \frac{0.43 \text{ kg}}{14 \text{ kg/kmol}} = 0.03 \text{ kmol}$$

Donde:

N_N = Número de moles del nitrógeno

m_N = Masa del nitrógeno en el bagazo de caña de azúcar

M_N = Masa molar del nitrógeno

Azufre:

$$N_S = \frac{m_S}{M_S} = \frac{0.11 \text{ kg}}{32 \text{ kg/kmol}} = 0.00343 \text{ kmol}$$

Donde:

N_S = Número de moles del azufre

m_S = Masa del azufre en el bagazo de caña de azúcar

M_S = Masa molar del azufre

A continuación, en la tabla 10 se especifica el porcentaje másico que se encuentran en base seca y libres de cenizas y los moles de cada elemento que conforman los residuos.

Tabla 11. Moles de cada elemento de los residuos de bagazo de caña de azúcar.

Elemento	% Másico	Moles
Hidrógeno	8.32	8.32
Oxígeno	42.87	2.68
Carbono	48.3	4.025
Nitrógeno	0.43	0.03
Azufre	0.11	0.00343
Total	100	15.058

Fuente: [52].

Para los parámetros necesarios en el balance de masa se tiene el flujo de combustible que es el flujo ya establecido donde se define que para el gasificador a diseñar en este proyecto se manejarán 15 kg (residuos) por hora. Se establece que el poder calorífico superior de los residuos de bagazo de caña de azúcar es de 19 469 kJ / kg , que es un dato necesario para poder realizar el debido balance de masa y poder hallar la potencia del gasificador [52].

La eficiencia de la gasificación según el libro, “El gas de madera como combustible para motores”, puede variar dependiendo el tipo de diseño que tenga el gasificador y las características del combustible, es por esto que el rango de la eficiencia debe estar entre 60% a 75 %. Dicho esto, se establece la eficiencia más alta del 75% [55]. Para el poder calorífico inferior del gas se toma el dato de un artículo donde realizaron una caracterización del gas a partir de Algarrobo y bagazo de caña, obteniendo así un poder calorífico de 4.69 MJ/Nm³, [56].

Tabla 12. Parámetros necesarios para el balance de masa.

Nombre	Símbolo	Unidad	Valor
Flujo de combustible	Mf	kg/h	15
Poder calorífico superior de la biomasa	PCS bm	kJ/kg	19 469
Eficiencia de la gasificación	η_g	%	60
Poder calorífico inferior del gas	LHVg	MJ/Nm ³	4.69

Fuente: [52] [55] [57].

6.1.1 Potencia de salida del gasificador:

Para determinar la potencia de salida del gasificador se tiene en cuenta la ecuación 1: [11].

$$M_f = \frac{Q}{PCI_{bm} * \eta_g} \quad (1)$$

Donde:

M_f = Flujo de combustible (kg/h)

Q = Potencia de salida del gasificador (Kw)

PCI_{bm} = Poder calorífico inferior de la biomasa (kJ/kg)

η_g = Eficiencia del gasificador (%)

Como en la ecuación 1 de potencia de salida se ve involucrado el poder calorífico inferior de la biomasa y solo se cuenta con el dato de poder calorífico superior de la biomasa, se emplea la ecuación 2 para hallarlo, donde se ven incluidos el poder calorífico superior pero libre de cenizas, H_{SC} : la fracción másica de hidrogeno libre de cenizas y el porcentaje de humedad de los residuos utilizados.

$$PCI_{bm} = PCS_{SC} - 20.3 * H_{SC} - 2.26 * M \quad (2)$$

Donde:

PCI_{bm} = Poder calorífico inferior de la biomasa (kJ/kg)

PCS_{SC} = Poder calorífico superior libre de cenizas (kJ/kg)

H_{SC} : Fracción másica de hidrogeno libre de cenizas (%)

M = Porcentaje de humedad de los residuos utilizados (%)

Como en la ecuación 2 que es el poder calorífico inferior de la biomasa se ve involucrado el poder calorífico superior libre de cenizas, se utiliza la ecuación 3 para hallarlo, donde se ven involucrados el PCS: poder calorífico en base seca, M : la humedad libre de cenizas y el porcentaje de cenizas de la biomasa.

$$PCS_{SC} = PCS * \left(\frac{1-M}{1 - \% \text{ Cenizas} - M} \right) \quad (3)$$

Utilizando la ecuación 3 podemos hallar el poder calorífico superior libre de cenizas:

$$PCS_{SC} = 19\,469 * \left(\frac{1 - 0.0757}{1 - 0.016 - 0.0757} \right)$$

$$PCS_{SC} = 19\,811 \frac{kJ}{kg}$$

Obteniendo el valor del poder calorífico superior libre de cenizas se puede hallar el poder calorífico inferior de la biomasa con la ecuación 3:

$$PCI_{bm} = 19\,811 \text{ kJ/kg} - 20.3 * 0.0832 - 2.26 * 0.0757$$

$$PCI_{bm} = 19\,809 \frac{kJ}{kg}$$

Obteniendo el poder calorífico inferior de la biomasa se puede hallar la potencia del gasificador despejándola de la ecuación 1:

$$Q = PCI_{bm} * \eta_g * M_f \quad (4)$$

$$Q = 19\,809 \frac{kJ}{kg} * 0.6 * 15 \frac{kg}{h}$$

$$Q = 178\,281 \frac{kJ}{h}$$

$$Q = 50 \text{ kW}$$

6.1.2 Flujo volumétrico de gas producido:

El flujo volumétrico de gas producido es un parámetro de entrada importante en el diseño del gasificador, porque con este valor se logra obtener la cantidad requerida de combustible a alimentar para obtener el volumen de gas estimado y también para obtener la cantidad de agentes gasificantes que se requieran.

$$V_g = \frac{Q}{PCI_g} \quad (5)$$

Teniendo el valor de la potencia obtenida con la ecuación 4 y teniendo el poder calorífico inferior del gas en la tabla 12 podemos saber el flujo volumétrico de la ecuación 5:

$$V_g = \frac{178.28 \text{ MJ/h}}{4.69 \text{ MJ/Nm}^3} = 38 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

6.1.3 Flujo de aire:

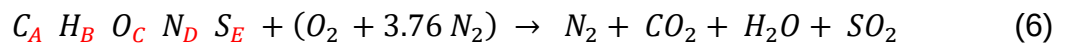
Para hallar el flujo de aire que se debe ingresar a el proceso de la gasificación se debe primero encontrar la cantidad de oxígeno estequiométrico que se consume teniendo en cuenta una combustión completa, esto lo podemos observar en la tabla 12.

Tabla 13. Oxígeno estequiométrico consumido.

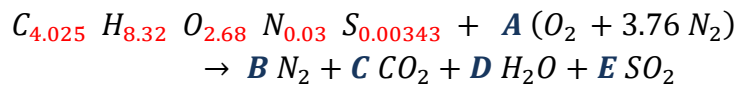
Reacciones	Moles Totales de O
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	0.00343
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	4.025
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	2.125
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	4.16
$N + O_2 \rightarrow NO_2$	0.03
O	2.68
Total	13.023

Fuente: Autor.

Luego de determinar la cantidad de oxígeno de la combustión, se realiza el balance de masa para una combustión completa, para así poder determinar la masa de aire estequiométrica, teniendo en cuenta que el aire tiene 21% de O_2 y 79% de N_2 [11].



Las letras que se encuentran en rojo en la ecuación 6 son los Moles de cada elemento de los residuos de bagazo de caña de azúcar que ya fueron determinados anteriormente y se encuentran en la tabla 11.

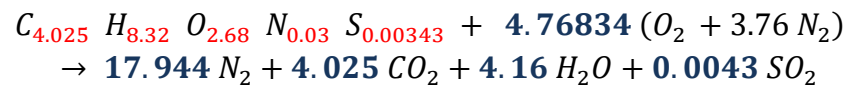


Las letras que se encuentran en color azul son las incógnitas que se tienen en la ecuación para realizar el debido balance de masa, para despejarlas se realizara el balance de masa a continuación en orden:

- $C \rightarrow 4.025 = C$
- $H \rightarrow 8.32 = 2D$
 $D = 4.16$
- $O \rightarrow 2.68 + 2A = 2C + D + 2E$
 $2.68 + 2A = 8.05 + 4.16 + 0.00686$
 $2A = 8.05 + 4.16 + 0.00686 - 2.68$
 $A = 4.76843$

- $N \rightarrow 0.03 + 7.52A = 2B$
 $0.03 + 35.858 = 2B$
 $B = 17.944$
- $S \rightarrow 0.00343 = E$

Luego de realizar el balance de masas, la ecuación nos quede de la siguiente forma:



Para hallar los moles de aire que estequiométricos se utiliza la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Moles de aire estequiométrico} &= \text{Moles de aire} * 4.76 \\ \text{Moles de aire estequiométrico} &= 4.76834 * 4.76 \\ \text{Moles de aire estequiométrico} &= 22.7 \text{ Kmoles} \end{aligned} \quad (7)$$

Para hallar la Masa de aire estequiométrica se utiliza la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Masa de aire estequiométrico} &= \text{Moles de aire} * 4.76 * 29 \\ \text{Masa de aire estequiométrico} &= 4.76834 * 4.76 * 29 \\ \text{Masa de aire estequiométrico} &= 658 \text{ kg} \end{aligned} \quad (8)$$

A continuación, se mostrará la tabla 13 con la cantidad de aire estequiométrico en el proceso de la gasificación que son los cálculos que se realizaron anteriormente:

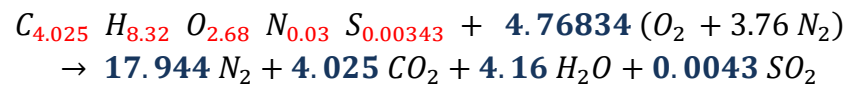
Tabla 14. Cantidad de aire estequiométrico en el proceso de gasificación.

Parámetro	Unidad	Valor
Moles de O estequiométrico	kmoles	13.023
Moles de O ₂ estequiométrico	kmoles	6.5115
Moles de aire estequiométrico	kmoles	22.7
Masa de aire estequiométrico	kg	658

Fuente: Autor.

La relación de equivalencia ER es uno de los parámetros principales que se tienen en cuenta en el diseño de gasificadores. Donde se ven involucrados la relación entre la relación de aire - combustible real y la relación estequiométrica de aire – combustible. Este término de ER se utiliza generalmente cuando se encuentran deficiencias de aire, como se ve en este caso en la gasificación [11].

En primer lugar, se va a hallar la relación estequiométrica aire – combustible, teniendo en cuenta que anteriormente ya se halló la masa del aire, se procede a continuación a hallar la masa del combustible teniendo en cuenta la ecuación ya balanceada:



$$C \rightarrow 12 * 4.025 = 48.3 \text{ kg } C$$

$$H \rightarrow 1 * 8.32 = 8.32 \text{ kg } H$$

$$O \rightarrow 16 * 2.68 = 42.88 \text{ kg } O$$

$$N \rightarrow 14 * 0.03 = 0.42 \text{ kg } N$$

$$S \rightarrow 32 * 0.00343 = 0.10976 \text{ kg } S$$

$$\text{Masa del combustible} = 100 \text{ kg } CHONS$$

Teniendo ya la masa del aire y del combustible respectivamente se procede a calcular la relación estequiométrica de aire – combustible:

$$r_{e \text{ mas}} = \frac{\text{masa aire}}{\text{masa combustible}} \quad (9)$$

$$r_{e \text{ mas}} = \frac{658 \text{ kg aire}}{100 \text{ kg comb}} = 6.58 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}}$$

La relación de equivalencia ER, dicta el rendimiento del gasificador y la calidad del gas obtenido del gasificador dependen de gran medida del valor ER. Este valor debe estar por debajo de 1 para garantizar que el combustible se gasifique en lugar de quemarse. Se conoce que para la gasificación el valor ER debe estar entre 0,2 y 0.4. En estudios ya realizados y en consulta de bibliografías se da a

entender que para gasificadores Downdraft el mejor rendimiento para ER es de 0.25 [11].

Asumiendo para este proyecto el ER como 0.25 y teniendo ya la relación estequiométrica de aire – combustible, se puede despejar de la ecuación 10 cual es el valor de la relación aire – combustible real:

$$ER = \frac{r_{(aire - comb (real))}}{r_{(aire - comb (estequiométrica))}} \quad (10)$$

$$r_{(aire - comb (real))} = ER * r_{(aire - comb (estequiométrica))} \quad (11)$$

$$r_{(aire - comb (real))} = 0.25 * 6.58 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}}$$

$$r_{(aire - comb (real))} = 1.645 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}}$$

Una vez determinado los datos anteriormente se puede proceder a realizar el cálculo de flujo de aire estequiométrico y real teniendo en cuenta el flujo de combustible en el gasificador que ya fue determinado en la tabla 12, como 15 kg (biomasa) / h:

$$Flujo \text{ de aire estequiométrico} = r_{(aire - comb (estequiométrica))} * Mf \quad (12)$$

$$Flujo \text{ de aire estequiométrico} = 6.58 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}} * 15 \frac{kg \text{ comb}}{h}$$

$$Flujo \text{ de aire estequiométrico} = 98.7 \frac{kg \text{ aire}}{h}$$

Así mismo se puede determinar cuánto es el flujo de aire real:

$$Flujo \text{ de aire real} = r_{(aire - comb (real))} * Mf \quad (13)$$

$$Flujo \text{ de aire real} = 1.645 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}} * 15 \frac{kg \text{ comb}}{h}$$

$$Flujo \text{ de aire real} = 24.675 \frac{kg \text{ aire}}{h}$$

Obteniendo todos los resultados para hallar el flujo de aire, en la tabla 14 se muestran los datos resumidos de flujo de aire para el proceso de gasificación:

Tabla 15. Resumen de datos flujo de aire para el proceso de gasificación.

Parámetro	Unidad	Valor
Relación equivalente ER	-	0.25
$r_{(aire - comb (estequiométrica))}$	$\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}}$	6.58
$r_{(aire - comb (real))}$	$\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}}$	1.645
Flujo de aire estequiométrico	$\frac{kg \text{ aire}}{h}$	98.7
Flujo de aire real	$\frac{kg \text{ aire}}{h}$	24.675

Fuente: Autor.

6.2 Balance de energía:

6.2.1 Temperatura de gasificación Downdraft:

Uno de los parámetros más relevantes en la gasificación es las temperaturas que se manejan durante el proceso, es por esto que se debe tener un control de temperaturas efectivo, debido a que el mal control puede ocasionar una disminución de la eficiencia del proceso generando así una gran cantidad de alquitranes en el gas de síntesis. En el caso de la gasificación las temperaturas de cada proceso ya se encuentran establecidas según bibliografía [11], dicho esto se muestra en la tabla 15 las temperaturas del gasificador:

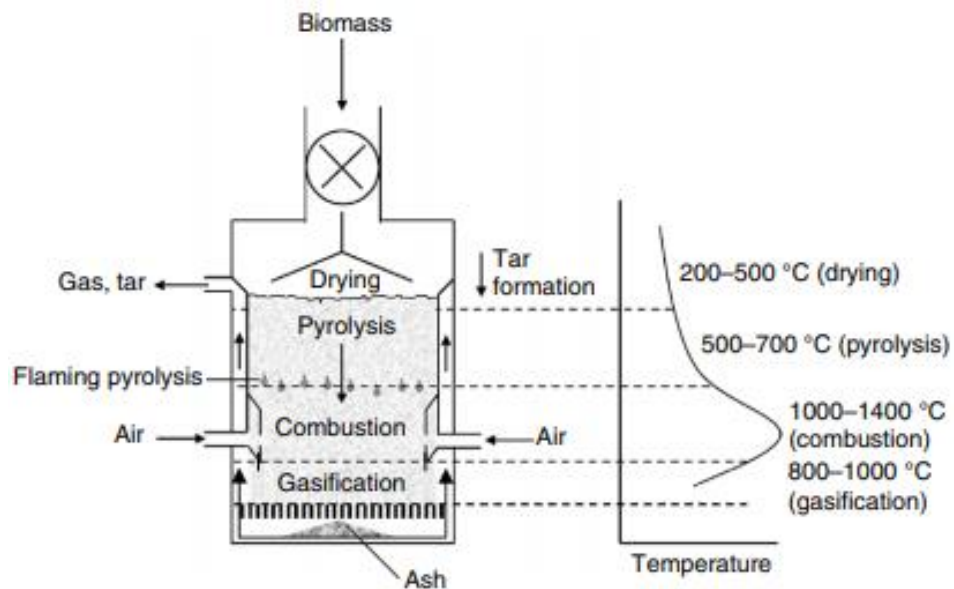
Tabla 16. Temperaturas de gasificación Downdraft.

Proceso	Temperatura (°C)
Secado	200
Pirólisis	500
Oxidación	1000
Reducción	700

Fuente:[11].

A continuación, en la ilustración 15 se presentan las zonas que se ven en la gasificación y el rango de temperaturas que debe manejar cada una:

Ilustración 15. Temperaturas de gasificación Downdraft.



Fuente:[11].

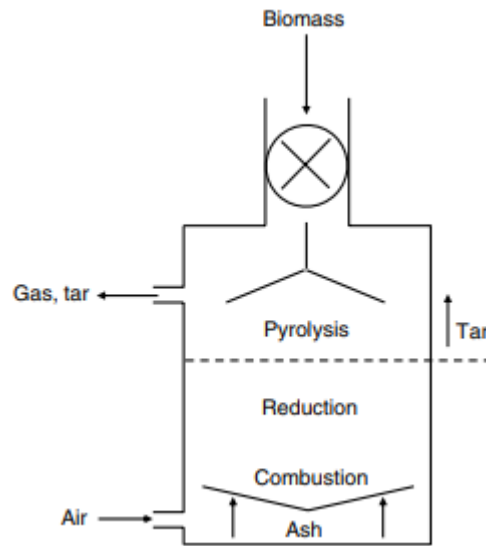
6.3 Dimensionamiento del gasificador:

El dimensionamiento que maneja el gasificador va dividido en las partes que conforman el proceso de gasificación, que está establecido por el sistema de alimentación y la parte de recolección de cenizas. Para el diseño de cada subdivisión del gasificador se tiene que tener en cuenta los materiales que se van a utilizar, debido a que estas partes van a estar sometidos a temperaturas y presiones demasiado altas. Según la bibliografía de gasificación el Downdraft está dividido en 4 partes principales que son la sección interna, externa, parte superior que se ve involucrada la cubierta y la parte inferior que es donde permanecen las cenizas [11].

6.3.1 Sección interna:

Esta parte del gasificador está establecida por un tubo interno en el que se ve presente las reacciones de pirólisis, oxidación y reducción como lo podemos observar en la ilustración

Ilustración 16. Sección interna del gasificador.



Fuente:[11].

Para determinar las dimensiones de la garganta en la zona de oxidación se tiene en cuenta el flujo volumétrico del gas de salida calculado en la página 40 en el prólogo 6.1.2, debido a que con este flujo se puede determinar los valores dimensionales ya establecidos en el Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, como se puede evidenciar en la tabla 16:

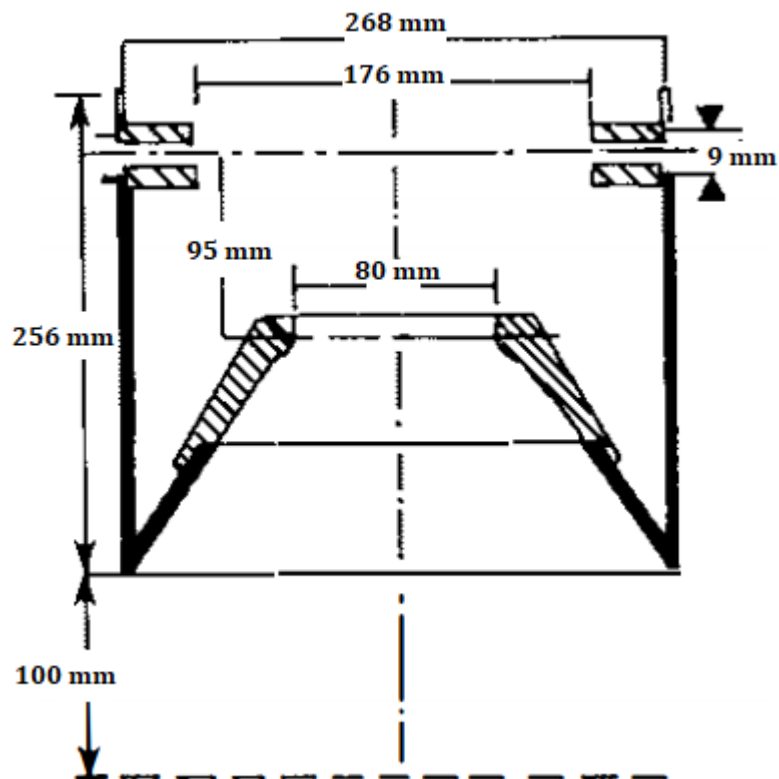
Tabla 17. Diámetros y medidas de la garganta en la zona de oxidación.

d_f/d_h	d_h mm	d_f mm	d_f' mm	h mm	H mm	R mm	A No.	d_m mm	$\frac{A_m \times 100}{A_h}$	$\frac{d_f}{d_h}$	$\frac{h}{d_h}$	Range of Gas Output		Maximum Wood Consumption kg/h	Air Blast Velocity Vm m/s
												max. Nm ³ /h	min. Nm ³ /h		
268/60	60	268	150	80	256	100	5	7.5	7.8	4.5	1.33	30	4	14	22.4
268/80	80	268	176	95	256	100	5	9.0	6.4	3.3	1.19	44	5	21	23.0
268/100	100	268	202	100	256	100	5	10.5	5.5	2.7	1.00	63	8	30	24.2
268/120	120	268	216	110	256	100	5	12.0	5.0	2.2	0.92	90	12	42	26.0

Fuente: [57].

Debido a que nuestro flujo volumétrico del gas de salida es de $38 \text{ Nm}^3/\text{h}$ y en la tabla nos dan la selección entre rangos de gas de salida, se selecciona el rango entre $5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ y $44 \text{ Nm}^3/\text{h}$, dicho esto se muestran el esquema con las medidas ya determinadas en la ilustración 17:

Ilustración 17. Esquema de medidas de la garganta en la zona de oxidación.



Fuente: [57].

La altura de la zona de reducción que es la de abajo es de 100 mm y la altura de la zona de pirolisis se tiene establecida según bibliografía que es aproximadamente de 150mm [11].

6.3.1.1 Inyectores de aire:

El aire precalentado es inyectado en la parte de la zona de oxidación que es transportado por unas boquillas que están entre el rango del 4 al 7% del área de la garganta. El número de boquillas que se debe establecer deber ser impar para que al momento de ingresar el aire no golpee con el aire que está ingresando por medio de la boquilla del lado opuesto [11].

Para el caso de nuestro gasificador para un flujo volumétrico de gas que se encuentre en el rango de $5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ y $44 \text{ Nm}^3/\text{h}$, el número de boquillas establecido en la tabla 18 es de 5 boquillas, las cuales deben estar ubicadas a una altura de 95mm por encima de la garganta y con un diámetro de 9 mm [57].

Este aire es inyectado en el gasificador por medio de unas mangueras que se encuentran en la parte exterior del tubo interno, por lo general rodean alrededor de un 75% del área del reactor [58]. Así mismo estas mangueras logran transmitir el calor que tiene el gas de síntesis al aire para así realizarle un precalentamiento antes de que sea ingresado a la zona de oxidación.

La velocidad de aire que se recomienda para tuberías esta entre 9 - 30 m/s [59], se fija un diámetro de tubería de $\frac{3}{4}$ pulgadas y según la tabla 16 se requiere una velocidad de 23 m/s para el rango de flujo volumétrico de gas que tenemos.

Para realizar esta inyección de aire, se necesita un compresor para poder suministrar el aire necesario para la combustión del gas de síntesis, según los datos obtenidos y gasificadores downdraft a nivel laboratorio ya diseñados, la presión sugerida que se debe tener es de un compresor con capacidad de 200 psi [43] [39].

Dicho esto, se selecciona un compresor DeWalt DXCM201 20 Gal. De 200 Psi aceite LUBED con correa impulsión, el cual cuenta con regulador de aire y de presión. [60].

Ilustración 18. Compresor DeWalt.



Fuente: [60].

6.3.1.2 Mangueras de aire:

Para este sistema a diseñar se requiere de una manguera para el transporte de aire, el cual es el encargado de suministrarle aire al reactor por medio del compresor.

Para esta aplicación se escogió una manguera tipo R2 de $\frac{3}{4}$ de pulgada, esta es capaz de resistir hasta una presión de 388 psi y es resistente a temperaturas altas [61].

Ilustración 19. Manguera de alta presión.



Fuente: [61].

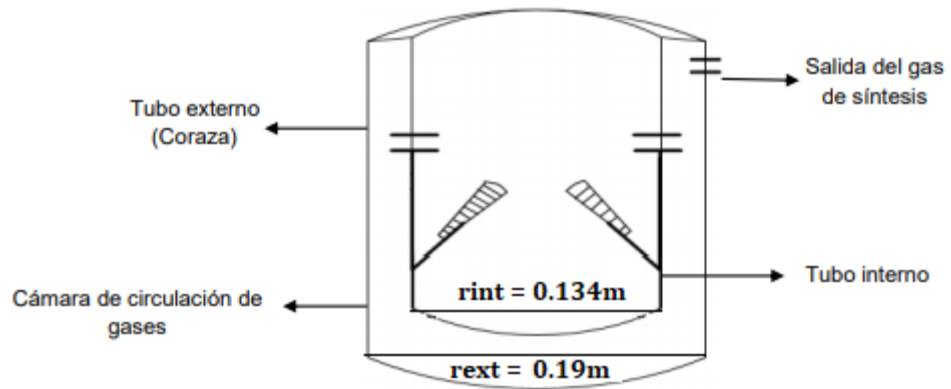
6.3.2 Sección externa:

6.3.2.1 Tubo exterior:

Esta parte del gasificador está establecida por un tubo exterior que se encuentra alrededor de la sección interna, generando así una cámara por donde pueden transportarse los gases hacia el exterior del reactor.

A continuación, en la ilustración 20 se muestra la sección externa del gasificador con sus respectivos radios:

Ilustración 20. Sección externa del gasificador.



Fuente: [43].

El diámetro de este tubo exterior se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$Velocidad\ del\ gas = \frac{Flujo\ volumétrico\ del\ gas}{Área\ del\ tubo\ exterior} \quad (14)$$

$$Área\ del\ tubo\ exterior = \pi * (r_{ext} - r_{int})^2 \quad (15)$$

Sabiendo que el flujo volumétrico de gas producido es de $38\ m^3/h$, la velocidad establecida del gas según bibliografía debe ser aproximadamente de $0.9\ m^3/s$ [62]. Y el radio interior es de $0.134\ m$. Es por eso que si se sustituye la ecuación 15 en la 14 se obtiene:

$$Velocidad\ del\ gas = \frac{Flujo\ volumétrico\ del\ gas}{\pi * (r_{ext} - r_{int})^2} \quad (16)$$

$$r_{ext} = \sqrt{\frac{Flujo\ volumétrico\ del\ gas}{Velocidad\ del\ gas * \pi}} + r_{int}$$

$$r_{ext} = \sqrt{\frac{0.01\ m^3/s}{0.9\ m^3/s * \pi}} + 0.134m$$

$$r_{ext} = 0.19\ m$$

6.3.2.2 Espesor del gasificador:

Para determinar el espesor del gasificador, es decir el ancho que va a tener la lámina de acero escogida, se utiliza la siguiente ecuación que se utiliza para recipientes cilíndricos a presión [63]:

$$t_{cilindro} = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} \quad (17)$$

Donde:

P = Presión de diseño

R = Radio interno del cilindro

S = Esfuerzo último a tensión

E = Eficiencia de las soldaduras

En primer lugar, se calcula cual es la presión de diseño que se calcula con la siguiente ecuación [63]:

$$P = P_t + P_h + 30 \text{ psi} \quad (18)$$

Donde:

P_t = Presión de trabajo

P_h = Presión hidrostática

La densidad del agua es de 1000 kg/m^3 , la gravedad es de 9.81 m/s^2 , la presión de trabajo es de 200 psi y el esfuerzo último a tensión en el caso de este gasificador se usará acero inoxidable SAE 310S es de 25500 psi que es 175 MPa [64].

Dicho esto, la presión de diseño es:

$$P = 200 \text{ psi} + \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1.106 \text{m}}{6894.75 \text{ Pa}} + 30 \text{ psi} = 231.57 \text{ psi} = 1596 \text{ KPa}$$

Utilizando la ecuación 17 sabemos el espesor del cilindro:

$$t_{cilindro} = \frac{231.57 \text{ psi} * 134 \text{ mm}}{25500 \text{ psi} * 0.75 - 0.6 * 231.57} = 1.5 \text{ mm}$$

El espesor permisible es igual al factor de seguridad por el espesor de diseño, al espesor del cilindro se le adiciona 1mm debido a que puede tener margen de

pérdida de masa por ocurrencia de la corrosión es decir el espesor es de 2.5mm y seleccionando un factor de seguridad de 4 que es el seleccionado según bibliografía [65], el espesor final del diseño es de 10mm.

6.3.2.3 Tolva:

La tolva se encuentra ubicada en la primera zona, que es la del secado y se encuentra en la parte superior del gasificador, esta cumple con dos condiciones que es el secado y el almacenamiento de la biomasa.

Para calcular las dimensiones requeridas por la tolva se toma el flujo másico de combustible que es 15 kg/h y se determina un tiempo de operación con un mutuo acuerdo con las especificaciones del cliente, determinando que diariamente se realizara con el grupo de investigación pruebas de 2 horas con el gasificador debido a que es un gasificador a nivel laboratorio y su utilidad va a ser de tipo experimental, ya con esto se puede hallar la cantidad de combustible que puede contener el gasificador desde la zona de alimentación hasta la de pirolisis.

$$15 \frac{kg}{h} * 2h = 30 kg$$

Luego se haya cual es el volumen que ocupa este combustible en el gasificador:

$$V_{comb} = \frac{30 kg}{198 kg/m^3} = 0.15m^3 \quad (19)$$

Posterior a esto se determina cual es el volumen que ocupa desde el inicio de la pirolisis hasta el comienzo de la garganta:

$$V_{pir-gar} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h \quad (20)$$

$$V_{pir-gar} = \frac{\pi}{4} * 0.268^2 * 0.256 = 0.0144 m^3$$

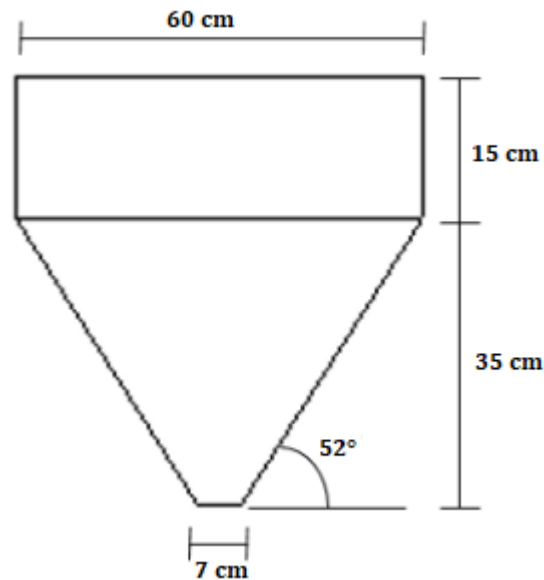
Una vez hallado anteriormente el volumen que ocupa el combustible y el volumen que ocupa desde la zona de pirolisis hasta el comienzo de la garganta, se procede a hallar cual es el volumen de la tolva:

$$V_{Tolva} = V_{comb} - V_{pir-gar} \quad (21)$$

$$V_{Tolva} = 0.15m^3 - 0.0144 m^3 = 0.13 m^3$$

Teniendo el volumen de la tolva es importante diseñar dicha tolva que supla el volumen necesario para alimentar el reactor, dicho esto se decide escoger una tolva piramidal cuadrada, donde asignamos las medidas requeridas para luego comprobar si cumplen las medidas con el volumen de la tolva requerido. El ángulo de dicha tolva varía normalmente entre 45° a 65° dependiendo de las medidas que se adapten [66].

Ilustración 21. Tolva piramidal cuadrada.



Fuente: [66].

Para verificar que las medidas seleccionadas son las apropiadas se calcula el volumen de la tolva dependiendo las medidas como se muestra a continuación:

$$V_{Tolva} = \frac{\pi * D^2 * h}{4} \quad (22)$$

$$V_{Tolva} = \frac{\pi * 0.6^2 * 0.5}{4} = 0.14 \, m^3$$

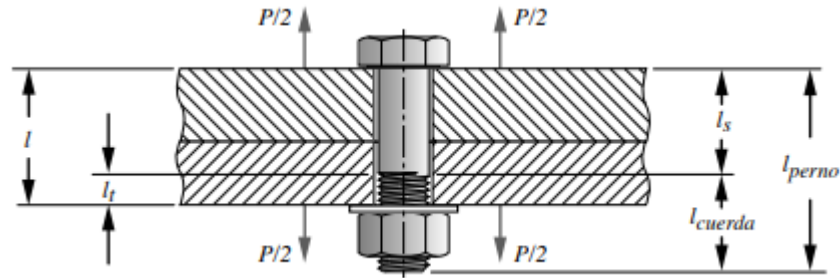
6.3.3 Selección de pernos de sujeción:

Para la selección de los pernos de sujeción que se usaran en la parte superior del gasificador, debido a que el espesor de pared del gasificador es de 10 mm y se van a sujetar tres laminas la longitud es de 30 mm es decir $L = 1.18$ in como se debe dejar una protuberancia para la tuerca el perno, la longitud que debe

tener el perno es de $L_{perno} = 1.5$ in y el diámetro de la junta $D = 1$ in, la carga que va a resistir es la carga de la biomasa que es de 30 Kg, de la tolva con la parte de alimentación que es 47 Kg y el motor que es de 26 Kg, entonces en total la carga aplicada es de 103 Kg es decir $P = 227$ Lb.

En primer lugar, se selecciona un perno de acero 5/16 - 18 UNC - 2A de la clase SAE 5.2 y se verifica el cumplimiento de este perno una vez cumpla con los factores de seguridad contra la fluencia y la separación [67].

Ilustración 22. Medidas del perno.



Fuente: [67].

Según el libro de Nordson este perno muestra que la resistencia de prueba es de 85 kpsi, para poder determinar la precarga primero se debe hallar el área de esfuerzo por tensión con la siguiente ecuación [67]:

$$A_t = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad (23)$$

Donde:

$$d_p = d - 0.649519/N$$

$$d_r = d - 1.299038/N$$

d_p = Diámetro de paso

d_r = Diámetro menor

d = Diámetro exterior

N = número de cuerdas por pulgada

Entonces:

$$d_p = \frac{5}{16} \text{ in} - \frac{0.649519}{18} = 0.2764 \text{ in}$$

$$d_r = \frac{5}{16} \text{ in} - \frac{1.299038}{18} = 0.2403 \text{ in}$$

Sustituyendo en la ecuación 25 el área de esfuerzo por tensión es:

$$A_t = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{0.2764 + 0.2403}{2} \right)^2 = 0.052431 \text{ in}^2$$

Para calcular la precarga se utiliza la siguiente ecuación:

$$F_i = 0.9 * S_p * A_t \quad (24)$$

Donde:

F_i = Precarga

S_p = Resistencia de prueba

A_t = Area de esfuerzo por tensión

Entonces:

$$F_i = 0.9 * 85000 * 0.052431 = 4011 \text{ lb}$$

Luego de esto se determina la longitud de cuerda L_{cuerda} y vastago L_s :

$$L_{cuerda} = 2d + 0.25 \quad (25)$$

$$L_{cuerda} = 2 * \left(\frac{5}{16} \right) + 0.25 = 0.875 \text{ in}$$

$$L_s = L_{perno} - L_{cuerda} \quad (26)$$

$$L_s = 1.5 - 0.875 = 0.625 \text{ in}$$

Se calcula la longitud de la cuerda L_t en la zona de sujeción:

$$L_t = L - L_s \quad (27)$$

$$L_t = 1.18 - 0.625 = 0.555 \text{ in}$$

Se calcula la rigidez del perno sabiendo que el módulo de elasticidad es de 30Mpsi, con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{L_t}{A_t * E} + \frac{L_t}{A_b * E} \quad (28)$$

$$\frac{1}{k_b} = \frac{0.555}{0.05243 * (30E6)} + \frac{0.625 * 4}{\pi * \left(\frac{5}{16}\right)^2 * (30E6)}$$

$$k_b = 1.6E6 \text{ lb/in}$$

Luego de esto se calcula la rigidez del material con la siguiente ecuación:

$$K_m = \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{4} * \frac{E_m}{L} \quad (29)$$

$$K_m = \frac{\pi * (1^2 - \left(\frac{5}{16}\right)^2)}{4} * \frac{30E6}{1.18} = 1.8E7 \text{ lb/in}$$

El factor de rigidez de la junta es:

$$C = \frac{K_b}{K_m + K_b} \quad (30)$$

$$C = \frac{1.6E6}{1.8E7 + 1.6E6} = 0.081$$

La carga aplicada que se va a ver en el perno P_b y el material P_m se determina con la siguiente ecuación:

$$P_b = C * P \quad (31)$$

$$P_b = 0.081 * 227 = 18.38 \text{ lb}$$

$$P_m = (1 - C) * P \quad (32)$$

$$P_m = (1 - 0.081) * 227 = 208.613 \text{ lb}$$

Se calculan las cargas resultantes en el perno F_b y en el material F_m a continuación:

$$F_b = F_i + P_b \quad (33)$$

$$F_b = 4011 + 18.38 = 4029.38 \text{ lb}$$

$$F_m = F_i - P_m \quad (34)$$

$$F_m = 4011 - 208.613 = 3802.4 \text{ lb}$$

El esfuerzo de tensión máximo que se le ocasiona al perno es:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t} \quad (35)$$

$$\sigma_b = \frac{4029.38}{0.052431} = 76851 \text{ psi}$$

Se calcula el factor de seguridad contra la fluencia, sabiendo que la resistencia a la fluencia mínima para ese tipo de perno SAE es de $S_y = 92000 \text{ psi}$ [67]:

$$N_y = \frac{S_y}{\sigma_b} \quad (36)$$

$$N_y = \frac{92000}{76851} = 1.2$$

Se calcula la carga requerida para separar la junta:

$$P_0 = \frac{F_i}{(1-c)} \quad (37)$$

$$P_0 = \frac{4011}{(1 - 0.081)} = 4364 \text{ lb}$$

Luego de esto se calcula el factor de seguridad contra la separación de la junta:

$$N_{\text{separación}} = \frac{P_0}{P} \quad (38)$$

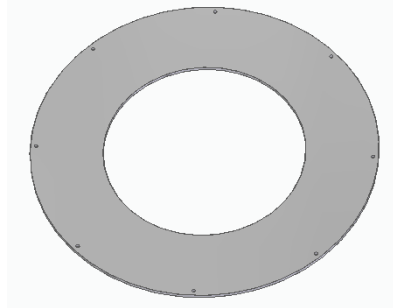
$$N_{\text{separación}} = \frac{4364}{227} = 19$$

Debido a que el factor de seguridad contra la separación y el de la fluencia superan el 1, quiere decir que el perno de sujeción de acero 5/16 - 18 UNC - 2A de la clase SAE 5.2 es el indicado.

6.3.4 Parte superior de la cubierta:

En la parte superior del reactor se encuentra la tapa, la cual es utilizada para que por medio del agujero central se alimente el gasificador de la biomasa, esta cubierta es ajustada por medio de pernos de sujeción que están seleccionados en el numeral 6.3.3, Estos van sujetos a la parte externa del gasificador y a la base de la tolva y el diámetro de esta cubierta es igual al diámetro exterior del reactor.

Ilustración 23. Cubierta del gasificador.

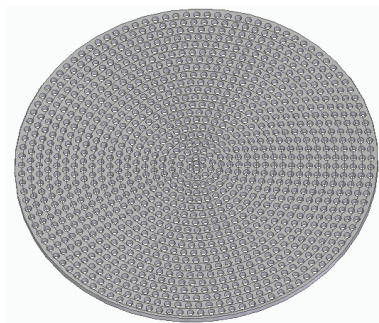


Fuente: Autor.

6.3.5 Parte inferior rejilla de las cenizas:

La parte inferior del gasificador está establecida por dos partes las cuales son la malla que debe tener orificios de máximo 5mm para que esta pueda retener todas las partículas que sean mayor a esta longitud y así dejar que pasen las partículas menores que en este caso serían las cenizas, se realizó la búsqueda en la bibliografía para generar el patrón que usan entre agujeros y establecen un patrón estándar que es que el espacio entre agujeros sea máximo de 1mm, es por esto que se estableció un patrón en el cual el diámetro más grande de la rejilla es de 268 mm y se comienza a disminuir de 13 mm sucesivamente para generar los círculos donde estarán ubicados los agujeros de la rejilla en círculos concéntricos [38].

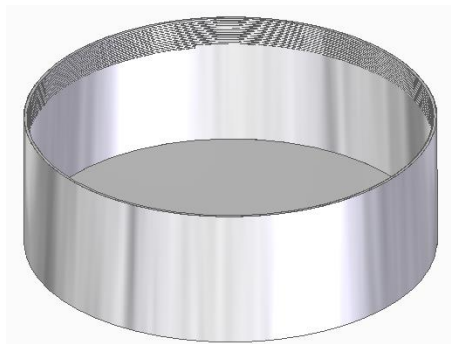
Ilustración 24. Rejilla de cenizas.



Fuente: Autor.

Por otro lado, se encuentra el sistema de recolección de cenizas que es un recipiente con altura de 0.1 m y diámetro de 0.19m , esta altura comienza a contar después de la malla en la zona de reducción, dicho esto su volumen es de 0.00283 m^3 que es igual a 2.83 kg es por esto que esta altura cumple con el volumen de cenizas debido a que es 9% de la biomasa que se vaya a gasificar, es decir que si gasificamos 15kg/h de biomasa tendremos una cantidad de 1.35 kg/h, por este motivo cada dos horas que será el funcionamiento del gasificador se debe extraer las cenizas recogidas. Esta extracción de las cenizas se realizará por medio del recipiente debido a que es roscado y se tendrá una facilidad para soltarlo y así poder vaciar el recipiente de cenizas.}

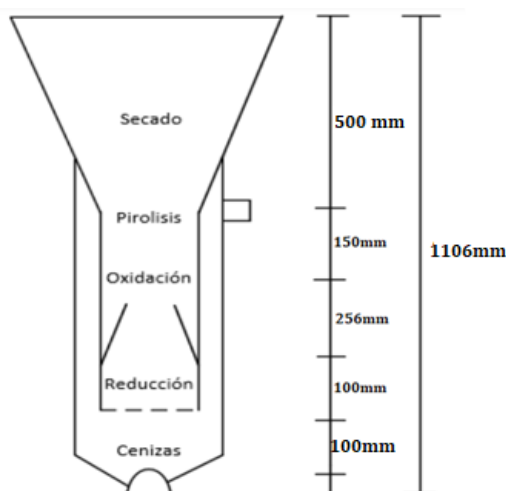
Ilustración 25. Recipiente de recolección de cenizas.



Fuente: Autor.

A continuación, en la ilustración 25 se muestran las alturas ya definidas para todo el reactor completo con el objetivo de tener ya establecida la altura general del gasificador:

Ilustración 26. Equipo de gasificación completo.



Fuente: Autor [43].

6.3.6 Materiales del gasificador:

Los gasificadores Downdraft manejan temperaturas demasiado altas y se ven involucradas sustancias químicas como el ácido sulfhídrico, amoníaco y ácido clorhídrico. Es por esto que para la selección de los materiales se tiene que tener en cuenta que estos sean resistentes a las condiciones que se ven en el proceso.

Como nombramos en los puntos anteriormente el gasificador se compone de dos partes que son la sección interna y la externa. Para la interna que es donde se ven involucradas las temperaturas más altas del proceso, por esto es necesario buscar materiales que sean resistentes a altas temperaturas, Resistencia a la corrosión y a la fatiga. Para esto se selecciona el acero inoxidable austenítico, teniendo en cuenta 3 tipos que se muestran a continuación:

Tabla 18. Aceros inoxidables austeníticos.

Grado	Temperatura máxima (°C)	Límite de fluencia (Mpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)
304	925	205	515
310	1150	205	515
316	325	205	515

Fuente: [66].

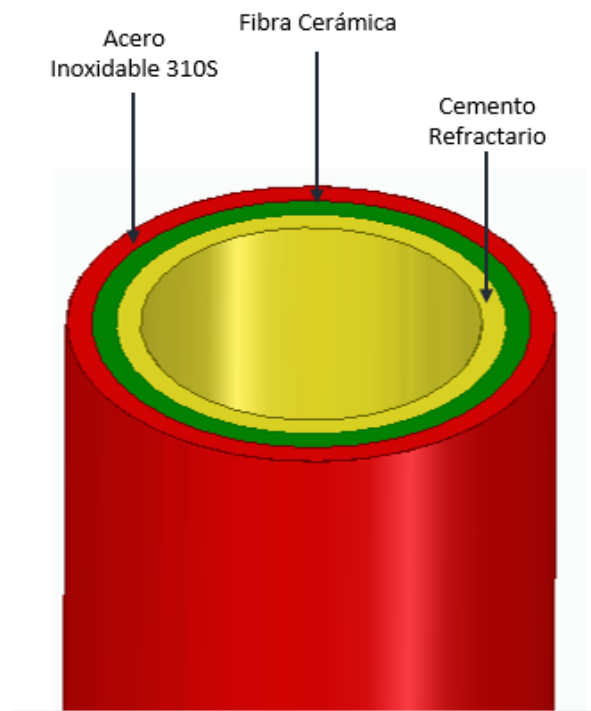
Los materiales mencionados anteriormente están entre los requerimientos establecidos, pero se selecciona el acero inoxidable AISI – SAE 310, debido a su alta resistencia a temperaturas y que su costo no es tan elevado como el resto.

Por otro lado, los materiales cerámicos para poder cubrir el reactor y así dar garantía del aislamiento térmico, se usara el cemento refractario y la fibra cerámica, debido a su alta resistencia a temperaturas y su bajo costo [39].

Para la sección externa se ve afectada por temperaturas un poco más bajas, pero también se manejará como material el acero inoxidable 310S y se establecen dos capas que van por fuera del acero la primera será de fibra cerámica y la siguiente de foil de aluminio.

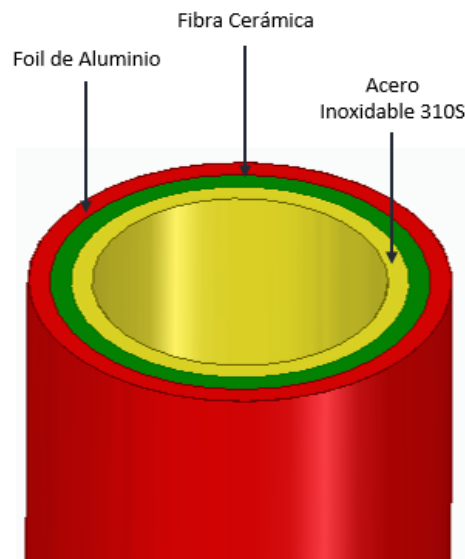
A continuación, en la ilustración 26 y 27 se muestra un bosquejo de como seria la distribución de los materiales tanto en el tubo interior como en el exterior:

Ilustración 27. Distribución de materia en la sección interna.



Fuente: Autor.

Ilustración 28. Distribución de materia en la sección externa.



Fuente: Autor.

Las otras partes que conforman el gasificador como lo son la tolva, la cubierta, la rejilla y el recipiente de cenizas están establecidos con acero inoxidable 310S.

6.3.7 Características de los materiales utilizados:

- **Acero inoxidable 310S**

Acero típicamente usado para aplicaciones de temperaturas altas manejando hasta 1100°C. Está conformado por una alta cantidad de níquel y cromo, proporcionando así una resistencia a la corrosión comparable y una resistencia mayor a la oxidación [68].

Tabla 19. Propiedades físicas Acero inoxidable 310S.

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	$\frac{kg}{m^3}$	7.76
Conductividad térmica	$\frac{W}{m * K}$	15.6

Fuente:[68].

- **Cemento refractario:**

El cemento refractario contiene 70% de alúmina, maneja una densidad alta y una alta resistencia mecánica tanto en caliente como en frío, así mismo tiene una baja porosidad, resiste temperaturas de hasta 1650°C [69].

- **Foil de aluminio:**

Es una lámina de aluminio sólida, tiene una alta impermeabilidad al vapor de agua y fases y se utiliza usualmente para temperaturas altas [70].

- **Fibra cerámica:**

Es un material flexible y liviano, es conocido por tener una estabilidad a altas temperaturas y una baja conductividad térmica, teniendo también una alta resistencia a la corrosión [71].

Tabla 20. Propiedades físicas de la fibra cerámica.

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	$\frac{kg}{m^3}$	160
Conductividad térmica	$\frac{W}{m * K}$	2.49

Fuente:[71].

6.4 Resistencias y controlador de temperatura:

Para el pre calentamiento y calentamiento del gasificador se utilizarán resistencias Kanthal, que son las que se utilizan para los hornos industriales, debido a su que las aleaciones Kanthal cubren el rango de temperaturas hasta un límite de 1500°C [72]. Estas resistencias estarán incorporadas en medio del material de cemento refractario, para que realice el debido recubrimiento de las resistencias y así pueda transferir el calor al gasificador.

Ilustración 29. Resistencias Kanthal.



Fuente: [72].

Para el controlador de temperatura se selecciona el controlador comercial Maxthermo serie MC 5438, que nos permite programar hasta 8 rampas de calentamiento diferente [73].

Ilustración 30. Controlador MC 5438.



Fuente: [73].

6.5 Equipos necesarios para el acondicionamiento del gas:

Una vez se obtiene el gas de síntesis en el proceso de gasificación este debe ser sometido a una etapa de limpieza, donde se busca eliminar la cantidad más alta de polvo y de alquitranes.

Los equipos que se necesitan para realizar la limpieza y la generación de energía son:

- **Ciclón:**

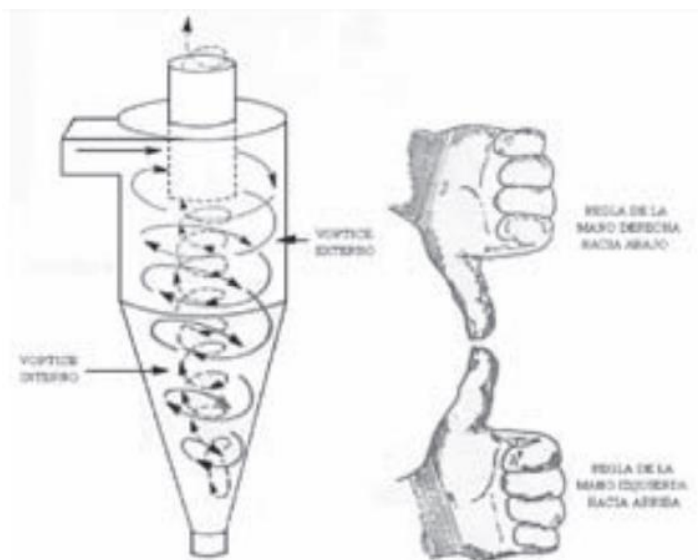
El ciclón hace parte del conjunto de dispositivos que ejercen su función por medio de un sistema de separación inercial. Este sistema ejerce una aceleración en la masa de gas para que esta logre separar los materiales sólidos del gas ligero [39].

La relación que se tiene entre el gasificador y el ciclón es que al momento de que la biomasa ya paso por el proceso de la gasificación los gases resultantes aún tienen un porcentaje bajo de partículas sólidas, es por esto que se implementa un ciclón para que al momento de que el gas resultante entre en el ciclón este pueda realizarle una limpieza de alquitranes y cenizas que aún se encuentran en el gas [74] .

La temperatura a la que trabajan estos ciclones es proporcional al material con el cual se elabore, es decir depende de las propiedades del material, por ejemplo en acero inoxidable alcanza temperaturas de 100°C [74].

En un ciclón, la trayectoria del gas está definida por dos vórtices, en donde el gas muestra una espiral descendente en el lado externo y ascendente en el lado interno como se muestra a continuación:

Ilustración 31. Vórtices en el ciclón.



Fuente: [75].

6.5.1 Diseño del ciclón:

6.5.1.1 Dimensionamiento del ciclón:

Para el diseño del ciclón se utilizará en este proyecto los ciclones de alta eficiencia Stairmad debido a que son los más convencionales en esta familia y estos ciclones están diseñados para alcanzar una mayor remoción de partículas, así mismo pueden remover de $5\ \mu m$ alcanzando una eficiencia de hasta el 90% pudiendo alcanzar eficiencias más altas con partículas mayores.

En la tabla 20 se observa cual es la distribución de partículas que se ve en el gas de síntesis y se observa que el 30.3% del tamaño de diámetro de las partículas contenidas en el gas son menores a $60\ \mu m$ lo que nos reitera que el ciclón Stairmad es el indicado:

Tabla 21. Distribución de tamaño de partículas en el gas de síntesis.

Tamaño	% Másico
Mayores a $1000\ \mu m$	1.7
$1000 - 250\ \mu m$	24.7
$250 - 102\ \mu m$	23.7
$102 - 75\ \mu m$	7.1
$75 - 60\ \mu m$	8.3
Menores a $60\ \mu m$	30.3
Perdidas	4.2

Fuente: [43].

Para el ciclón Stairmand de alta eficiencia según bibliografía ya se encuentran definidas algunas características que encontramos en la tabla 21:

Tabla 22. Características del ciclón Stairmand.

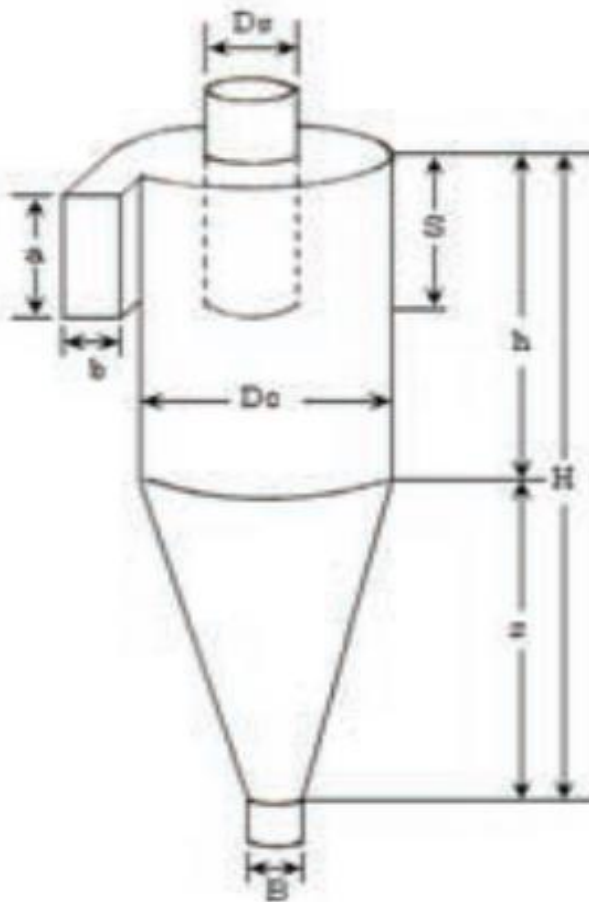
Dimensión	Nomenclatura	Ciclón Stairmand
Diámetro del ciclón	D_c / D_c	1.0
Altura de entrada	a / D_c	0.5
Ancho de entrada	b / D_c	0.2
Altura de salida	S / D_c	0.5

Diámetro de salida	D_s / D_c	0.5
Altura parte cilíndrica	h / D_c	1.5
Altura parte cónica	z / D_c	2.5
Altura total del ciclón	H / D_c	4.0
Diámetro salida partículas	B / D_c	0.375
Número cabezas de velocidad	NH	6.4
Número de vórtices	N	5.5

Fuente:[75].

En la ilustración 31 se muestran las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial. El diámetro del ciclón es la dimensión principal del diseño debido a que todas las demás dimensiones son una proporción a esta.

Ilustración 32. Dimensiones del ciclón.



Fuente: [75].

Para el diseño del ciclón de este proyecto se tomarán datos ya calculados anteriormente y otros datos encontrados en la bibliografía que se observan en la tabla 22:

Tabla 23. Datos para el diseño del ciclón.

Parámetro	Unidad	Valor	Fuente
Velocidad de entrada V	$\frac{m}{s}$	22	[75]
Densidad de partícula ρ_p	$\frac{kg}{m^3}$	2000	[43]
Flujo volumétrico del gas V_g	$\frac{m^3}{s}$	0.0105	Pag 35
Densidad del gas ρ_g	$\frac{kg}{m^3}$	0.35	[43]
Viscosidad del gas μ_g	$\frac{kg}{m * s}$	2.55E-05	[43]

Fuente: Autor.

Para hallar el diámetro de corte del ciclón en primer lugar se debe calcular cual es el área del ducto de entrada con la ecuación 23:

$$A = \frac{V_g}{V} \quad (39)$$

$$A = \frac{0.0105 \text{ m}^3/s}{22 \text{ m/s}} = 0.000477 \text{ m}^2$$

La ecuación 24 pertenece a el área del ducto de entrada en cuanto a la altura y el ancho de entrada del ciclón y con la tabla 21 se puede despejar cual es el diámetro de corte del ciclón:

$$A = a * b \quad (40)$$

Sabiendo que la altura de la entrada del ciclón es:

$$a = 0.5 * D_c$$

Sabiendo que el ancho de la entrada del ciclón es:

$$b = 0.2 * D_c$$

Sustituyendo lo anterior en la ecuación 24 podemos despejar cual es el diámetro de corte del ciclón como se muestra a continuación:

$$A = (0.5 * Dc) * (0.2 * Dc)$$

$$Dc = \sqrt{\frac{A}{0.5 * 0.2}} \quad (41)$$

$$Dc = \sqrt{\frac{0.000477 \text{ m}^2}{0.5 * 0.2}} = 0.069 \text{ m}$$

Una vez obtenido el diámetro de corte se pueden despejar los valores restantes que se encuentran en la tabla 21:

- Altura de la entrada del ciclón:

$$a = 0.5 * Dc$$

$$a = 0.5 * 0.069 = 0.0345 \text{ m}$$

- Ancho de la entrada del ciclón:

$$b = 0.2 * Dc$$

$$b = 0.2 * 0.069 = 0.0138 \text{ m}$$

- Altura de salida del ciclón:

$$S = 0.5 * Dc$$

$$S = 0.5 * 0.069 = 0.0345 \text{ m}$$

- Diámetro de salida del ciclón:

$$Ds = 0.5 * Dc$$

$$Ds = 0.5 * 0.069 = 0.0345 \text{ m}$$

- Altura parte cilíndrica del ciclón:

$$h = 1.5 * Dc$$

$$h = 1.5 * 0.069 = 0.1035 \text{ m}$$

- Altura parte cónica del ciclón:

$$z = 2.5 * D_c$$

$$z = 2.5 * 0.069 = 0.1725 \text{ m}$$

- Altura total del ciclón del ciclón:

$$H = 4 * D_c$$

$$H = 4 * 0.069 = 0.276 \text{ m}$$

- Diámetro salida partículas:

$$B = 0.375 * D_c$$

$$B = 0.375 * 0.069 = 0.0259 \text{ m}$$

En la tabla 23 se muestran las dimensiones del gasificador resumidas:

Tabla 24. Dimensiones del ciclón.

Dimensión	Nomenclatura	Ciclón Stairmand
Diámetro del ciclón	Dc	0.069
Altura de entrada	a	0.0345
Ancho de entrada	b	0.0138
Altura de salida	S	0.0345
Diámetro de salida	Ds	0.0345
Altura parte cilíndrica	h	0.1035
Altura parte cónica	z	0.1725
Altura total del ciclón	H	0.276
Diámetro salida partículas	B	0.0259

Fuente: Autor.

6.5.1.2 Eficiencia del ciclón:

La eficiencia del ciclón esta creada para alcanzar mayor control de las partículas, lo que se busca con el ciclón es poder remover las partículas lo más mínimo

posible en muchos casos que sea de $5 \mu m$, entre más alta sea la eficiencia mejor sera el proceso que realice el ciclón para la disminución de partículas.

Dicha eficiencia se calcula teniendo en cuenta la eficiencia de cada intervalo de tamaño de partícula como se muestra a continuación [75]:

$$\eta T = \sum \eta i * \%M \quad (42)$$

Donde:

ηT = Eficiencia total

ηi = Eficiencia fraccional

$\%M$ = Porcentaje másico

La eficiencia fraccional se calcula con la siguiente ecuación [75]:

$$\eta i = 1 - e \left[-2 * \left(\frac{G * Ti * Q * (n+1)}{Dc^3} \right)^{\left\{ \frac{0.5}{n+1} \right\}} \right] \quad (43)$$

Donde:

ηi = Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.

G = Factor de configuración del ciclón.

Ti = Tiempo de relajación para cada partícula en s.

Q = Caudal de gas en m^3/s .

Dc = Diámetro del ciclón en m.

n = Exponente del vórtice del ciclón.

En primer lugar, se realiza el cálculo del factor de configuración que se halla con la siguiente ecuación [75]:

$$G = \frac{8 Kc}{(Ka*Kb)^2} \quad (44)$$

Donde:

Kc = Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón.

Ka = Relación entre la altura de la entrada y el diámetro del ciclón (a/Dc).

Kb = Relación entre al ancho de la entrada y el diámetro del ciclón (b/Dc).

Para hallar Ka se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ka = \frac{a}{Dc} = \frac{0.0345}{0.069} = 0.5$$

Para hallar Kb se calcula con la siguiente ecuación:

$$Kb = \frac{b}{Dc} = \frac{0.0138}{0.069} = 0.2$$

Para hallar Kc se calcula con la siguiente ecuación [75]:

$$Kc = \frac{V_{sc} + \frac{V_R}{2}}{Dc^3} \quad (45)$$

Donde:

V_{sc} = Volumen de salida del ciclón.

V_R = Volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón.

El volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón funciona si se cumple la siguiente condición:

$$L < H - S$$

$$0.17 < 0.276 - 0.0345$$

$$0.17 < 0.2415$$

Donde:

L = Longitud natural del ciclón

H = Altura total del ciclón

S = Altura de la salida

La longitud natural del ciclón se calcula con la siguiente ecuación [75]:

$$L = 2.3 * Ds * \sqrt[3]{\frac{Dc^2}{a*b}} \quad (46)$$

$$L = 2.3 * 0.0345 * \sqrt[3]{\frac{0.069^2}{0.0345 * 0.0138}} = 0.17 \text{ m}$$

El volumen evaluado sobre la salida del ciclón se calcula con la siguiente ecuación [75]:

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} * \left(s - \frac{a}{2}\right) * (Dc^2 - Ds^2) \quad (47)$$

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} * \left(0.0345 - \frac{0.0345}{2}\right) * (0.069^2 - 0.0345^2) = 0.0000483 \text{ m}^3$$

El volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón se calcula con la siguiente ecuación [75]:

$$V_R = \frac{\pi}{4} * Dc^2 * (h - S) + \frac{\pi}{12} * Dc^2 * (L + S - h) * \left[1 + \frac{K_L}{Dc} + \left(\frac{K_L}{Dc}\right)^2\right] - \frac{\pi}{4} * Ds^2 * L \quad (48)$$

Donde K_L es el factor de dimensiones lineales y se calcula con la siguiente ecuación [75]:

$$K_L = Dc - (Dc - B) * \left[\frac{S+L-h}{z}\right] \quad (49)$$

Para hallar el exponente del vórtice “n” se utiliza la siguiente ecuación teniendo en cuenta que la temperatura de salida del gas es de 700°C es decir 973.15 K:

$$n = 1 - (1 - 0.67 * Dc^{0.14}) * \left[\frac{T}{283}\right]^{0.3} \quad (50)$$

$$n = 1 - (1 - 0.67 * 0.069^{0.14}) \left[\frac{973.15}{283} \right]^{0.3}$$

$$n = 0.22$$

Una vez hallado el exponente del vórtice “n” se utiliza la ecuación 33 para hallar el factor de dimensiones lineales:

$$K_L = 0.069 - (0.069 - 0.0259) * \left[\frac{0.0345 + 0.17 - 0.1035}{0.1725} \right]$$

$$K_L = 0.0437$$

Una vez hallado el factor de dimensiones lineales se utiliza la ecuación 32 para poder hallar el volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón:

$$V_R = \frac{\pi}{4} * 0.069^2 * (0.1035 - 0.0345) + \frac{\pi}{12} * 0.069^2 * (0.17 + 0.0345 - 0.1035) * \left[1 + \frac{0.0437}{0.069} + \left(\frac{0.0437}{0.069} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} * 0.0345^2 * 0.17$$

$$V_R = 0.00035 \text{ m}^3$$

Una vez hallado el volumen evaluado sobre la salida del ciclón y el volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón se utiliza la ecuación 29 para hallar el Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón:

$$K_C = \frac{0.0000483 + \frac{0.00035}{2}}{0.069^3} = 0.689 \text{ m}^3$$

Una vez hallado el factor Ka, Kb y Kc se utiliza la ecuación 28 para hallar el factor de configuración:

$$G = \frac{8 * 0.689}{(0.5 * 0.2)^2} = 551.293$$

Una vez obtenidos los valores anteriormente se procede a resumirlos en la tabla 25:

Tabla 25. Parámetros para calcular la eficiencia del ciclón.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Longitud natural del ciclón	L	m	0.17
Volumen del ciclón sobre la salida	V_{SC}	m^3	0.0000483
Factor de dimensiones lineales	K_L	m	0.0437
Volumen del ciclón sobre la longitud natural	V_R	m^3	0.00035
Factor dimensional proporciones volumétricas ciclón K	K_C	m^3	0.689
Relación altura de entrada y diámetro del ciclón	K_a	-	0.5
Relación base de entrada y diámetro del ciclón	K_b	-	0.2
Factor de configuración	G	-	551.293
Exponente de vórtice	n	-	0.22

Fuente: Autor.

Luego de tener los parámetros principales del ciclón se procede a calcular el tiempo de relajación T_i con la siguiente ecuación [75]:

$$T_i = \frac{\rho_p * D_{pi}^2}{18 * \mu} \quad (51)$$

Donde:

ρ_p = Densidad de la partícula en kg/m^3

D_{pi} = Diámetro de la partícula en m

μ = Viscosidad del gas kg/ms

Debido a que los siguientes cálculos son el cálculo de la eficiencia y esta se calcula para cada tamaño de partícula se utilizara la ecuación 26, 27 y 35 para completar la tabla 26:

Tabla 26.Eficiencia del ciclón.

Tamaño (μm)	% Másico	Dp (μm)	Dp (m)	Ti (s)	ni	ni x %M
Mayores a 1000	1.7	1000	1×10^{-3}	0.043573	1	1.7
1000 – 250	24.7	625	6.25×10^{-4}	0.0170207	1	24.7
250 – 102	23.7	176	1.76×10^{-4}	0.0013497	1	23.7
102 – 75	7.1	88.5	8.85×10^{-5}	0.0003413	1	7.1
75 – 60	8.3	67.5	6.75×10^{-5}	0.0001985	1	8.3
Menores a 60	30.3	60	6×10^{-5}	0.0001569	1	30.3
EFICIENCIA TOTAL DEL CICLÓN						95.8

Fuente: Autor.

6.6 Sistema de control:

En los sistemas de control de la gasificación se tienen en cuenta dos factores importantes los cuales son: la presión y la temperatura que se manejan mientras operando el gasificador.

- **Presión:**

La presión que se maneja en el gasificador es un parámetro primordial que se debe medir para que con esto se logre evitar caídas de presión, logrando con esto evitar que se pueda perjudicar la limpieza del gas de síntesis y el proceso de producción.

Para controlar este parámetro se medirá la presión por medio de un manómetro que se adaptará en dos partes del gasificador: uno en la tapa del gasificador para determinar presión inicial y otro en la salida del gasificador para medir la presión con la que sale el gas. Los datos que se obtengan del manómetro serán emitidos a un PLC.

Los manómetros que se van a utilizar en este proyecto son los manómetros digitales, debido a que son los más utilizados y manejan una exactitud del 0.25% del valor final de escala en siete rangos de medida de presión.

- **Temperaturas:**

Para controlar la temperatura se contará con dos termocuplas las cuales se van a adaptar en la zona de oxidación y en la salida del gas de síntesis. Los datos que arrojen las termocuplas serán enviados a un PLC, el cual mostrará los cambios de temperatura que hay en el sistema.

Las termocuplas que se van a utilizar son el tipo k debido a que el rango de temperatura que utilizan estas son de 0°C a 1260°C, que cumplen con el rango de temperaturas que se utilizan en la gasificación.

En dicha temperatura se tiene que tener en cuenta que debe estar acorde con la temperatura de entrada que se digita en el controlador, debido a que este dato de entrada es el dato que se espera obtener.

6.7 Sistema de alimentación:

Para el sistema de manutención se usara una fuente de alimentación por medio de un tornillo sin fin, con esto se lograra la alimentación de la biomasa al gasificador de una manera continua y con cantidades razonables, en la industria y para la biomasa que se usara el tornillo sin fin es el más acorde y más recomendado para este tipo de gasificadores[76].

El transportador de tornillo sin fin está conformado por una hélice que se encuentra montada sobre un eje, donde se encuentra insertado en un canal que usualmente va en forma de “U”, como se muestra en la siguiente ilustración:

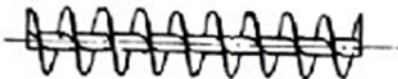
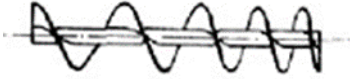
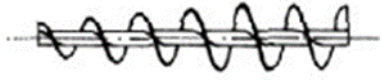
Ilustración 33. Transportadores de Tornillo Sin Fin.

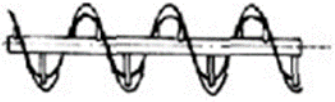
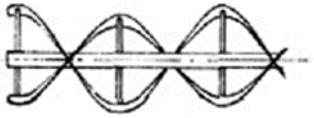
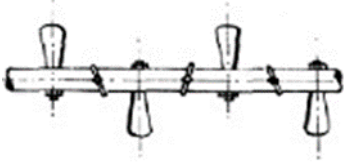


Fuente: [76].

Existen varios tipos de Hélice que son utilizados en los tornillos sin fin y estos están diferenciados por su tipo de material a transportar y de la función a la que se vaya a poner a ejecutar:

Tabla 27. Tipos de Hélices.

Tipo de Hélice	Tipo de Material para Transportar / Aplicación	Figura
Hélice continua, de paso igual al diámetro	Tipo de hélice normal para transporte de sólidos	
Hélice de gran paso, de 1,5 a 2 veces el diámetro	Se utiliza para productos que fluyen muy bien	
Hélice de pequeño paso, normalmente la mitad del diámetro	Se utiliza en tornillos sin fin inclinados hasta unos 20-25°, o cuando se quiere un prolongado tiempo de permanencia del producto en el transportador con el objeto de enfriarlo, secarlo, etc.	
Hélice de paso variable	Utilizado para compresión de productos, como es el caso de las prensas de tornillo.	
Hélice de diámetro variable	Se utiliza como extractor dosificador de sólidos de tolvas.	

Hélice de cinta	Tipo de hélice adecuada para productos que producen atascamiento.	
Hélice mezcladora, con dos hélices tipo cinta, uno a derecha y otro a izquierda	Se utiliza como equipo mezclador	
Hélice mezcladora, con eje provisto de paletas	Se utiliza como equipo mezclador	

Fuente: [76].

Revisando la ilustración anterior se decide escoger el tipo de hélice de paso pequeño, debido a que las partículas de biomasa que ingresara al gasificador serán de máximo 5mm y también es conveniente este tipo debido a que nos permite un flujo constante de la biomasa y así mismo sirve para disminuir el contenido de humedad que contengan las partículas de la misma.

6.7.1 Diámetro y Paso del tornillo:

Para el diámetro de los transportadores de tornillo se tiene que tener en cuenta el tipo de material que se va a transportar y se debe cumplir de manera aproximada la relación que se da a continuación:

- Cuando se utilizan materiales de forma heterogénea, se dice que el diámetro que se debe manejar en el tornillo debe ser 4 veces más grande que el diámetro que tienen las partículas del material [76].
- Cuando se utilizan materiales de forma homogénea, se dice que el diámetro que se debe manejar en el tornillo debe ser 12 veces más grande que el diámetro que tienen las partículas del material [76].

Teniendo en cuenta las anteriores restricciones, como ya se estableció anteriormente las partículas de biomasa que ingresarán al gasificador serán de 5mm homogéneamente, se procede a calcular el diámetro del tornillo:

$$D = 5 * 12$$

$$D = 60 \text{ mm} = 0.06 \text{ m}$$

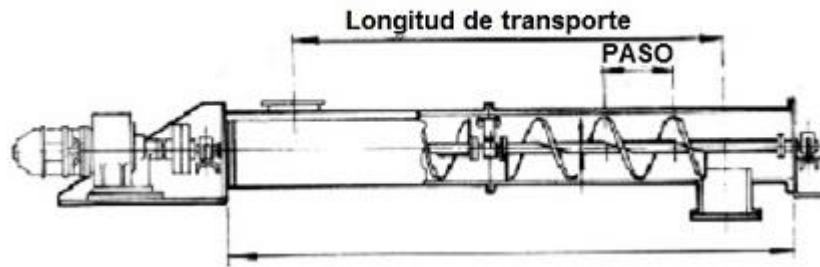
Se tiene en cuenta que para el paso de los transportadores de tornillo según bibliografía debe estar entre 0,5 y 1 veces el diámetro del tornillo, se escoge para este diseño 0,5 debido a que la carga que se va a utilizar no es tan ligera [76]:

$$P = 0.5 * 0.06 \text{ m}$$

$$P = 0.03 \text{ m}$$

En cuanto a la longitud que debe tener el tornillo, esta va de acuerdo con los diámetros del gasificador que en este caso la longitud de transporte que tendrá el tornillo debe ser de 0.32m.

Ilustración 34. Longitud y paso del tornillo sin fin.



Fuente: [76].

Para la velocidad de giro del tornillo lo recomendado en cuanto a gasificación es manejar 100 rpm debido a que siempre se maneja una gran cantidad de biomasa y por este motivo no puede ingresar a una velocidad muy alta [66].

6.7.2 Capacidad de transporte:

6.7.2.1 Área de relleno del canalón:

El área de relleno (S) del canalón que rellena el material para que se mueva el transportador, se puede determinar por medio de la siguiente ecuación [76]:

$$S = \lambda * \frac{\pi * D^2}{4} \quad (52)$$

Donde:

- S = área de relleno del transportador (m^2).
- D = diámetro del canalón del transportador (m).
- λ = coeficiente de relleno de la sección.

Para la determinación del coeficiente de relleno de la sección se tiene en cuenta el tipo de carga del material en este caso la biomasa de bagazo de caña de azúcar, como se muestra en la siguiente tabla [76]:

Tabla 28. Valores de coeficiente de relleno.

Tipo de carga	Coeficiente de relleno (λ)
Pesado y abrasiva	0,125
Pesado y poco abrasiva	0,25
Ligera y poco abrasiva	0,32
Ligera y no abrasiva	0,4

Fuente: [76].

En el caso de este trabajo como la biomasa que se está manejando es bagazo de caña de azúcar, según bibliografía se dice que es una biomasa ligera y poco abrasiva [77].

Sabiendo cual es el coeficiente de relleno y el diámetro del tornillo que ya se calculó anteriormente, podemos utilizar la ecuación 52 para poder determinar el área de relleno del canalón:

$$S = 0.32 * \frac{\pi * 0.06^2}{4} = 0.0009m^2$$

6.7.2.2 Velocidad de desplazamiento del transportador:

Es la velocidad con la que se ve desplazado la biomasa en la dirección longitudinal del eje del tornillo y se calcula con la siguiente ecuación [76]:

$$V = \frac{P * n}{60} \quad (53)$$

Donde:

- V = velocidad de desplazamiento del transportador (m/s)

- P = paso del tornillo (m)
- n = velocidad de giro del eje del tornillo (rpm)

Anteriormente ya se calculó el paso del tornillo y se determinó cual era la velocidad de giro y utilizando la ecuación 53 hallamos la velocidad de desplazamiento [76]:

$$V = \frac{0.03m * 100rpm}{60} = 0.05 m/s$$

6.7.2.3 Determinación del flujo de biomasa:

El flujo de biomasa es la capacidad de transporte que tiene el tornillo sin fin, anteriormente ya se ha determinado que para este gasificador tendrá un flujo de 15 kg/h lo que quiere decir que en promedio hace 200 g/min.

6.7.2.4 Potencia de accionamiento:

Hace referencia al trabajo que requiere el movimiento del sistema de alimentación y se calcula con la siguiente ecuación [76]:

$$P = P_H + P_N + P_i \quad (54)$$

Donde:

- P_H = Potencia necesaria para el desplazamiento horizontal del material.
- P_N = Potencia necesaria para el accionamiento del tornillo en vacío.
- P_i = Potencia necesaria para el caso de un tornillo sin fin inclinado.

En el caso de este tornillo no se usa P_i debido a que no tiene ningún grado de inclinación por ende es 0.

6.7.2.5 Potencia para el desplazamiento horizontal:

El desplazamiento horizontal hace referencia a lo que se mueve la biomasa desde la tolva hasta el gasificador y esta potencia se calcula con la siguiente ecuación [76]:

$$P_H = c_o \frac{Q * L}{367} \quad (55)$$

Donde:

- Q = Flujo del material transportado.
- L = Longitud del transportador.
- c_o = Coeficiente de resistencia de material transportado.

El coeficiente de resistencia se establece teniendo en cuenta el tipo de biomasa que se va a utilizar como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 29. Valor de coeficiente de resistencia de material.

Tipo de material	Valor de c_o
Harina, serrín, productos granulosos	1.2
Turba, sosa, polvo de carbón	1.6
Antracita, carbón, sal de roca	2.5
Yeso, arcilla seca, azúcar, tierra fina, cemento, bagazo, cal, arena	4

Fuente: [76].

Para el caso de la biomasa de bagazo de caña de azúcar el valor de coeficiente de resistencia de material es 4 y con esto se emplea en la ecuación 55:

$$P_H = 4 \frac{200 * 0.32}{367}$$

$$P_H = 0.69 \text{ kW}$$

6.7.2.6 Potencia de accionamiento del tornillo en vacío:

Hace referencia a la potencia que se usaría si el tornillo no tuviera biomasa y se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_N = \frac{D * L}{20} \quad (56)$$

Donde:

- D = diámetro de la sección del canalón de la carcasa del transportador.
- L = longitud del transportador.

Calculamos la potencia de accionamiento con la ecuación 56:

$$P_N = \frac{0.06 * 0.32}{20} = 0.0096 \text{ kW}$$

6.7.2.7 Potencia Total:

Finalmente se calcula cual es la potencia total sumando potencia de deslizamiento horizontal (P_H) y la potencia de accionamiento del tornillo en vacío que es (P_N). Esto nos da a concluir que para ejercer el movimiento necesario al tornillo sin fin se necesita un motor con una potencia igual o mayor a 0.69096 KW, que es equivalente a 0.9 HP, por este motivo se debe seleccionar un motor reductor de 1 HP que tenga una velocidad de 100 r.p.m.

6.7.3 Grupo motriz:

Para el accionamiento del tornillo se necesita buscar una instalación en el sistema del transporte de un grupo motriz que normalmente para este tipo de proyectos se utiliza de accionamiento eléctrico.

En primer lugar, se busca una motor-reductor que se adapte a las especificaciones ya determinadas anteriormente que es un motor – reductor que trabaja a 1 HP y que su transmisión sea a 100 rpm

6.7.3.1 Selección del motor-reductor:

Para la selección del motor – reductor, según bibliografías se utiliza para tornillos sin fían los motorreductores helicoidales sinfín-corona, debido a que ofrece una variedad de tamaños, relaciones de transmisión y tamaños de motor.

Una de sus ventajas es que maneja una suavidad en la marcha del motor y poca generación de ruido, es uno de los más aconsejables debido a que están diseñados para servicios en continuo, por este motivo se procede a seleccionar el motorreductor en el catálogo de SIEMES, cumpliendo con las especificaciones determinadas [78].

Se selecciona un motor reductor helicoidal sinfín – corona, marca SIEMES, con referencia 2KJ1601-DC13-F1, con una potencia de motor de 0,75 KW a 50Hz es decir 1 Hp, reduciendo a una velocidad de 101 rpm y un par de salida de 75 Nm, el motor tiene un peso de 26 kg [78].

Ilustración 35. Motorreductor helicoidal sinfín - corona.

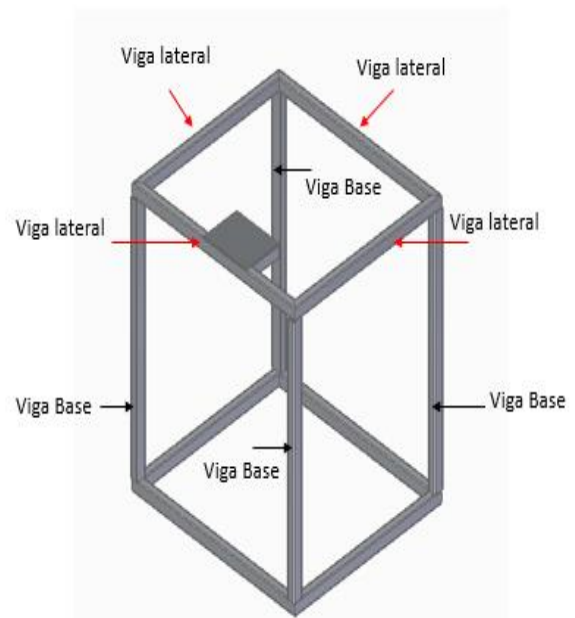


Fuente: [78].

6.8 Estructura del gasificador:

La estructura en la que se va a sostener el gasificador de biomasa se observa en la siguiente figura, donde la carga del reactor y del motor se genera en las vigas laterales situadas en la parte superior de la estructura y sobre las cuatro bases de la estructura:

Ilustración 36. Geometría de la estructura.



Fuente: Autor.

Se realizará el cálculo de la estructura para una viga dividiendo la carga soportada, para así poder seleccionar un perfil estructural en especial si es de perfil cuadrado debido a que el manejo y el ensamble son simples y normalmente usados para este tipo de estructuras.

En primer lugar, se establece cual es la fuerza que se le va a ejercer a la viga, los pesos que se ven inferidos en esta ecuación se toman de Solid Edge debido a que este programa nos suministra los valores del peso de cada sólido y se pueden ver en los anexos en la parte de los planos, dicha fuerza se calcula con la siguiente ecuación:

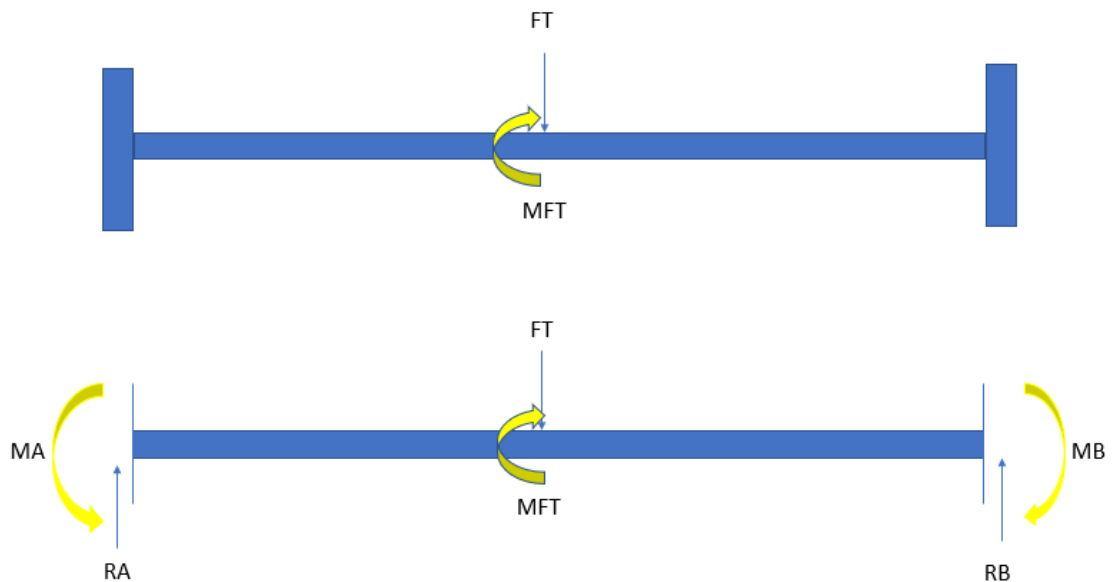
$$F = (\text{Peso del gasificador} + \text{Peso de la biomasa} + \text{Peso del motor}) * \text{gravedad}$$

$$F = (140\text{kg} + 30\text{ kg} + 26\text{ kg}) * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 1923\text{ N}$$

Luego de obtener la fuerza ejercida a la estructura se realiza el diagrama de cuerpo libre de la viga lateral que es la viga donde se realizaran los mayores esfuerzos:

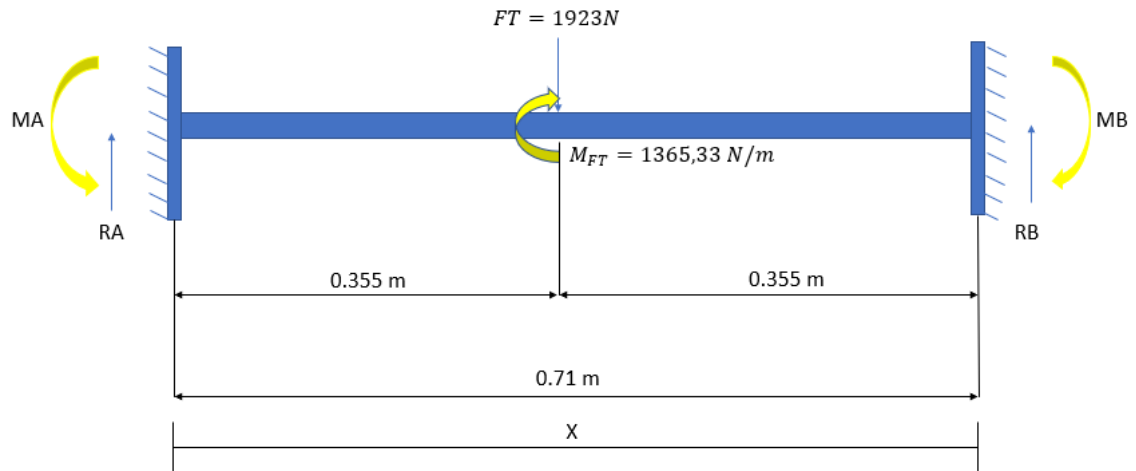
Ilustración 37. Diagrama de cuerpo libre inicial.



Fuente: Autor.

Luego de esto sabemos que la fuerza que se ejerce sobre la viga es de $FT = 1923\text{ N}$ y la longitud de la viga es de $L = 710\text{ mm}$, se selecciona esta longitud debido a que tiene que ser una longitud que supere el diámetro del gasificador, el momento por torsión que se ejerce en la mitad de la viga es igual a la fuerza por la distancia de la viga que es $M_{FT} = 1365.33\text{ N/m}$.

Ilustración 38. Diagrama de cuerpo libre con valores.



Fuente: Autor.

Realizamos la sumatoria de fuerzas y de momentos, teniendo en cuenta la ilustración anterior:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_y &= 0 \\
 R_A + R_B &= 1923
 \end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned}
 \curvearrowright + \sum M_A &= 0 \\
 M_A + 0.71R_B - 0.355 * 1923 - 1365.33 - M_B &= 0 \\
 M_A + 0.71R_B - M_B &= 682.665 + 1365.33 \\
 M_A + 0.71R_B - M_B &= 2047.995
 \end{aligned} \tag{58}$$

Realizando la doble integración:

$$EI \frac{d^2Y}{dX^2} = -M_A + R_A(X) + 1365.33 - 1923(X - 0.355)$$

$$EI \frac{dY}{dX} = -M_A(x) + R_A\left(\frac{X^2}{2}\right) + 1365.33 X - 1923 \frac{(X - 0.355)^2}{2} + C1$$

$$EIY = -M_A \frac{X^2}{2} + R_A\left(\frac{X^3}{6}\right) + 1365.33 \left(\frac{X^2}{2}\right) - 1923 \frac{(X - 0.355)^3}{6} + C1X + C2$$

Realizando la simplificación de las ecuaciones anteriores quedan de la siguiente forma:

$$EI \frac{d^2 Y}{dX^2} = -M_A + R_A(X) + 1365.33 - 19238 (X - 0.355) \quad (59)$$

$$EI \frac{dY}{dX} = -M_A(x) + R_A \left(\frac{X^2}{2} \right) + 1365.33 X - 961.5 (X - 0.355)^2 + C1 \quad (60)$$

$$EIY = -M_A \frac{X^2}{2} + R_A \left(\frac{X^3}{6} \right) + 682.665 X^2 - 320.5 (X - 0.355)^3 + C1X + C2 \quad (61)$$

Para condiciones de contorno:

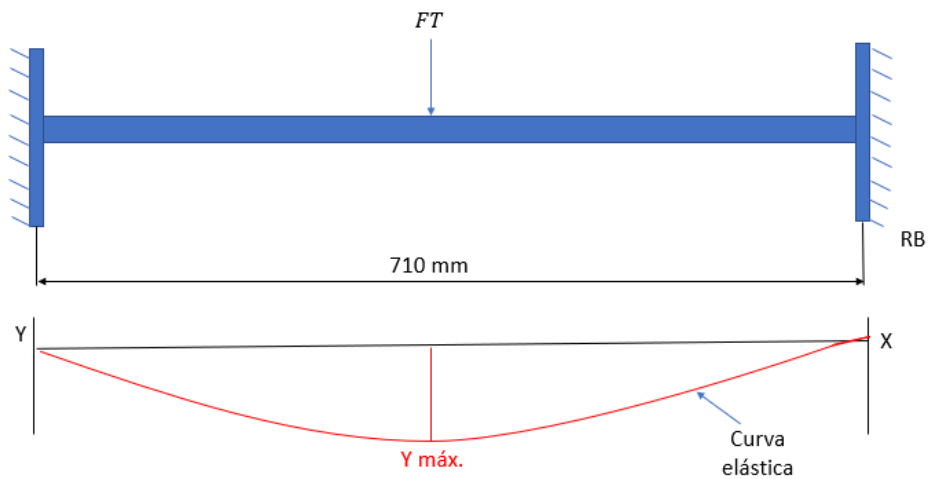
Lado izquierdo:

$$X = 0$$

$$Y = 0 \quad \rightarrow \quad C2 = 0$$

$$\frac{dY}{dX} = 0 \quad \rightarrow \quad C1 = 0$$

Ilustración 39. Condiciones de contorno.



Fuente: Autor.

En la ecuación 61:

$$X = 0.71m \quad C1 = 0$$

$$Y = 0 \quad C2 = 0$$

$$EIY = -M_A \frac{X^2}{2} + R_A \left(\frac{X^3}{6} \right) + 682.665 X^2 - 320.5 (X - 0.355)^3$$

$$0 = -M_A \frac{0.71^2}{2} + R_A \left(\frac{0.71^3}{6} \right) + 682.665 * 0.71^2 - 320.5 (0.71 - 0.355)^3$$

$$0 = -0.25205 M_A + 0.059651 R_A + 344.131 - 14.3388$$

Dividimos todo en 0.059651:

$$-4.2253 M_A + R_A = -5528.625 \quad (62)$$

En la ecuación 60:

$$X = 0.71m \quad C1 = 0$$

$$\frac{dY}{dX} = 0 \quad C2 = 0$$

$$EI \frac{dY}{dX} = -M_A(x) + R_A \left(\frac{X^2}{2} \right) + 1365.33 X - 961.5 (X - 0.355)^2$$

$$0 = -M_A(0.71) + R_A \left(\frac{0.71^2}{2} \right) + 1365.33 * 0.71 - 961.5 (0.71 - 0.355)^2$$

$$0 = -0.71 M_A + 0.25205 R_A + 969.3843 - 121.173$$

$$0 = -0.71 M_A + 0.25205 R_A + 848.211$$

Dividimos todo en 0.25205:

$$-2.8169 M_A + R_A = -3365.25 \quad (63)$$

Realizamos una resta entre la ecuación 63 y 62 para despejar M_A :

$$-2.8169 M_A + R_A = -3365.25$$

—

$$\begin{array}{rcl}
 -4.2253 M_A + R_A & = & -5528.625 \\
 \hline
 1.40845 M_A & = & 2163.375
 \end{array}$$

Despejamos M_A :

$$M_A = 1536 \text{ Nm}$$

despejamos R_A de la ecuación 63:

$$-2.8169 M_A + R_A = -3365.25$$

$$R_A = -3365.25 + 2.8169 * 1536$$

$$R_A = 961.5 \text{ N}$$

Despejamos R_B de la ecuación 57:

$$R_A + R_B = 1923$$

$$R_B = 1923 - 961.5$$

$$R_B = 961.5 \text{ N}$$

Despejamos M_B de la ecuación 58:

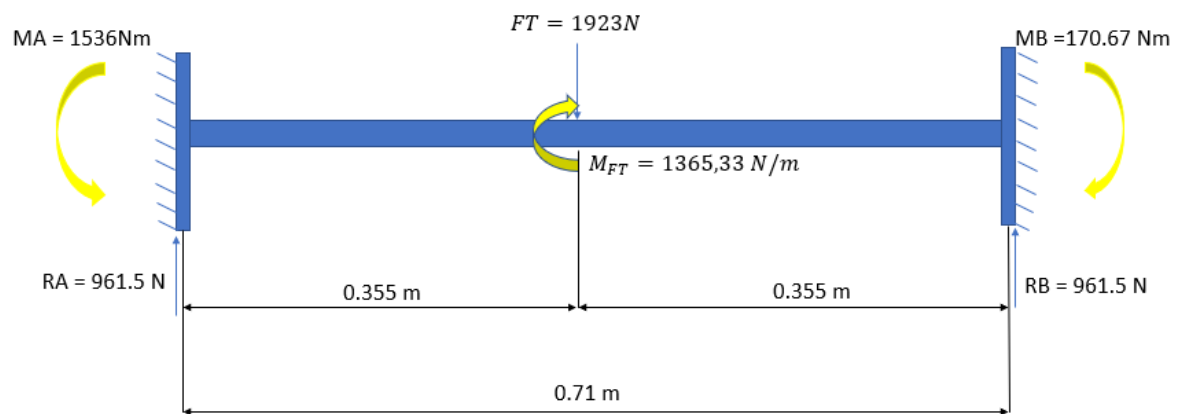
$$M_A + 0.71R_B - M_B = 2047.995$$

$$M_B = 1536 + 0.71 * 961.5 - 2047.995$$

$$M_B = 170.67 \text{ Nm}$$

Para hallar los diagramas de fuerza cortante y momento flector se debe dividir la viga por tramos, a continuación, se muestra el diagrama de cuerpo libre con todos los valores ya calculados anteriormente:

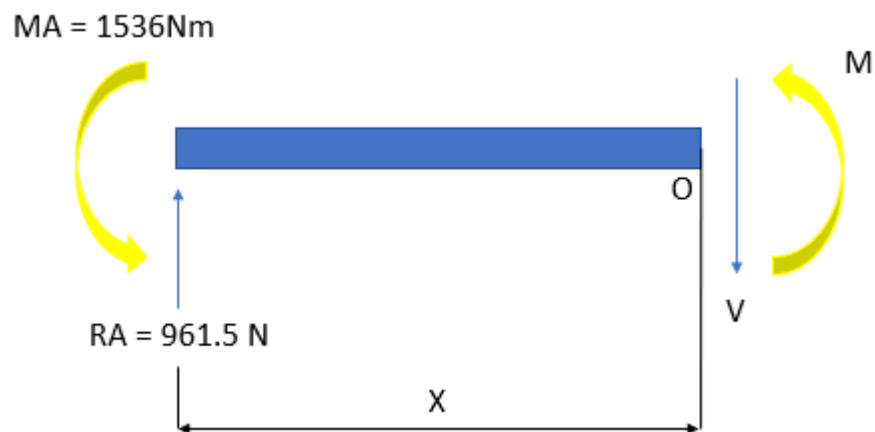
Ilustración 40. Diagrama de cuerpo libre final.



Fuente: Autor.

Primer tramo $0 \leq X < 0.355$:

Ilustración 41. Primer tramo.



Fuente: Autor.

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$961.5 - V = 0$$

$$V = 961.5 \text{ N}$$

$$\curvearrowright + \sum M_O = 0$$

$$1536 - 961.5 * X + M = 0$$

$$M = 961.5X - 1536$$

Con $X = 0$

$$M = 961.5 * 0 - 1536$$

$$M = -1536 \text{ Nm}$$

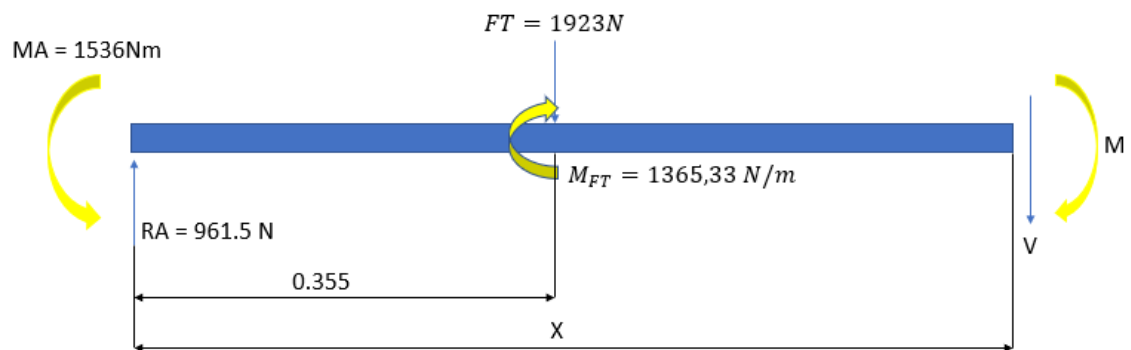
Con $X = 0.355$

$$M = 961.5 * 0.355 - 1536$$

$$M = -1194.7 \text{ Nm}$$

Segundo tramo $0.355 \leq X < 0.71$:

Ilustración 42. Segundo tramo.



Fuente: Autor.

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$961.5 - V - 1923 = 0$$

$$V = -961.5 \text{ N}$$

$$\curvearrowright + \sum M_o = 0$$

$$M + 1536 - 1365.33 - 961.5 X + 1923 (X - 0.355) = 0$$

$$M = 961.5 X - 1923 (X - 0.355) - 170.67$$

Con $X = 0.355$

$$M = 961.5 * 0.355 - 1923 (0.355 - 0.355) - 170.67$$

$$M = 170.662 \text{ Nm}$$

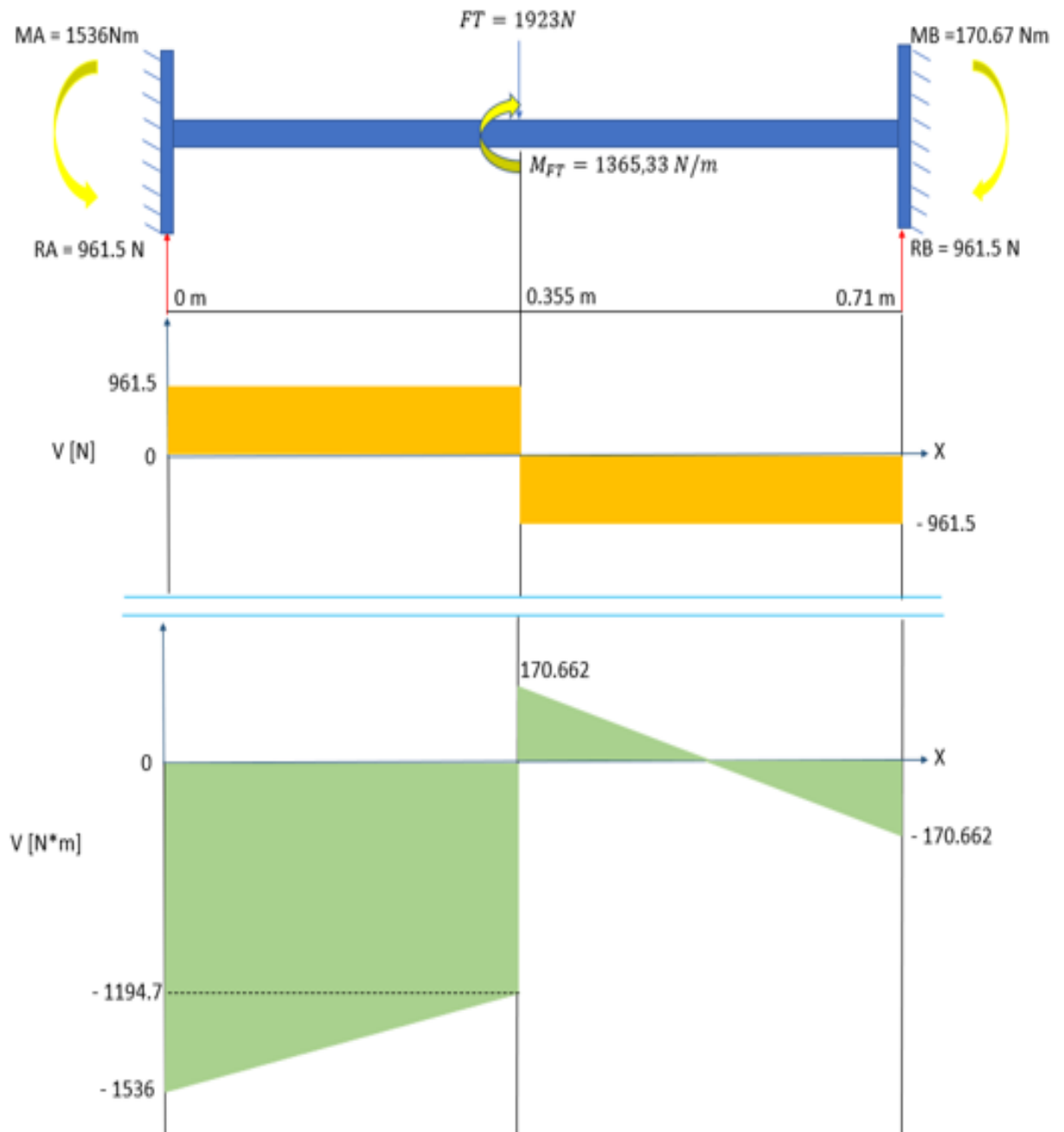
Con $X = 0.71$

$$M = 961.5 * 0.71 - 1923 (0.71 - 0.355) - 170.67$$

$$M = -170.662 \text{ Nm}$$

Posterior a obtener las ecuaciones se puede realizar la gráfica correspondiente a esfuerzo cortante y momento flector:

Ilustración 43. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector.



Fuente: Autor.

Posterior a tener el diagrama de esfuerzo cortante y momento flector, se procede a realizar la selección del perfil óptimo para la viga cuadrada que se usara en esta estructura, para esto necesitamos los siguientes datos [79]:

$$L = 0.71 \text{ m}$$

$$FT = 1923 \text{ N}$$

Material = Acero S275

$$\text{Límite elástico} = F_{yd} = 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Momento máximo} = M_{m\acute{a}x} = 1536 \text{ Nm} = 1536 * 10^3 \text{ Nmm}$$

$$\text{Factor de seguridad} = 1.05$$

M_{CRd} = Resistencia a flexión

W_{pl} = Momento resistente

Tenemos que el momento máximo que actúa en la viga no podrá superar la resistencia a flexión de la sección M_{CRd} [79]:

$$M_{m\acute{a}x} \leq M_{CRd} = W_{pl} * F_{yd}$$

Tenemos:

$$W_{pl} \geq \frac{M_{m\acute{a}x}}{F_{yd}}$$

$$W_{pl} \geq \frac{1536 * 10^3 \text{ Nmm}}{275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}$$

$$W_{pl} \geq 5.585 * 10^3$$

Buscamos en tablas de perfiles cuadrados huecos en donde el momento resistente sea mayor a $5.585 * 10^3$:

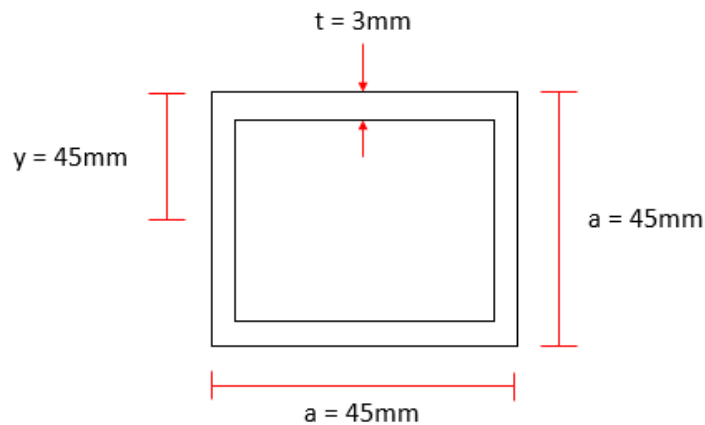
Ilustración 44. Tabla de perfiles cuadrados huecos.

Perfil	Dimensiones				Peso p (N/m)	Términos de sección						
	a (mm)	t (mm)	r (mm)	u (mm)		A $\cdot 10^4$ (mm ²)	I $\cdot 10^4$ (mm ⁴)	W $\cdot 10^3$ (mm ³)	i $\cdot 10$ (mm)	I _T $\cdot 10^4$ (mm ⁴)	S $\cdot 10^3$ (mm ³)	
# 40.2	40	2	5	151	22,4	2,90	6,60	3,40	1,53	11,3	2,04	P
# 40.3	40	3	8	147	31,8	4,13	9,01	4,51	1,48	15,6	2,80	P
# 40.4	40	4	10	143	40,1	5,21	10,5	5,26	1,42	18,9	3,40	P
# 45.2	45	2	5	171	25,4	3,30	9,94	4,42	1,74	16,3	2,63	C
# 45.3	45	3	8	167	36,4	4,73	13,4	5,95	1,68	22,9	3,65	C
# 45.4	45	4	10	163	46,3	6,01	15,9	7,07	1,63	28,2	4,49	C
# 50.2	50	2	5	191	28,5	3,70	13,9	5,57	1,94	22,7	3,30	P
# 50.3	50	3	8	187	41,0	5,33	19,0	7,59	1,89	32,0	4,62	P
# 50.4	50	4	10	183	52,5	5,81	22,9	9,15	1,83	39,9	5,73	P
# 55.2	55	2	5	211	31,6	4,10	18,9	6,86	2,14	30,5	4,04	C
# 55.3	55	3	8	207	45,7	5,93	25,9	9,43	2,09	43,4	5,70	C
# 55.4	55	4	10	203	58,6	7,61	31,6	11,5	2,04	54,5	7,12	C
# 60.2	60	2	5	231	34,6	4,50	24,8	8,28	2,35	39,9	4,86	P
# 60.3	60	3	8	227	50,3	6,53	34,4	11,5	2,30	57,1	6,89	P
# 60.4	60	4	10	223	64,7	8,41	42,3	14,1	2,24	72,2	8,66	P
# 60.5	60	5	13	219	78,1	10,1	48,5	16,2	2,19	85,2	10,2	C
# 70.2	70	2	5	271	40,8	5,30	40,3	11,5	2,76	64,1	6,71	P
# 70.3	70	3	8	267	59,5	7,73	56,6	16,2	2,71	92,6	9,60	P
# 70.4	70	4	10	263	77,1	10,0	70,4	20,1	2,65	118	12,2	P
# 70.5	70	5	13	259	93,5	12,1	82,0	23,4	2,60	141	14,5	P
# 80.3	80	3	8	307	68,8	8,9	86,6	21,7	3,11	140	12,8	P
# 80.4	80	4	10	303	89,4	11,6	108,8	27,2	3,06	180	16,3	P
# 80.5	80	5	13	299	109	14,1	128	32,0	3,01	217	19,5	P
# 80.6	80	6	15	294	128	16,5	144	36,0	2,95	250	22,4	C
# 90.3	90	3	8	347	78,0	10,1	126	37,9	3,52	202	16,4	P
# 90.4	90	4	10	343	102	13,2	159	35,4	3,47	281	21,1	P
# 90.5	90	5	13	339	125	16,1	189	41,9	3,42	316	25,3	P
# 90.6	90	6	15	334	146	18,9	214	47,6	3,36	366	29,2	P

Fuente: [79].

Se selecciona el perfil # 45.3, que tiene las siguientes dimensiones:

Ilustración 45. Dimensiones del perfil # 45.3



Fuente: Autor.

Tenemos que:

$$S_X = 3.65 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_X = 13.4 * 10^4 \text{ mm}^4 = I_Y$$

$$M_{m\acute{a}x} = 1536 * 10^3 \text{ Nmm}$$

Tensión normal máxima [67]:

$$\sigma_{M\acute{a}x} = \frac{M_{M\acute{a}x} * y}{I_Y} \quad (64)$$

Donde:

$M_{M\acute{a}x}$ = Momento máximo

I_Y = Momento de inercia

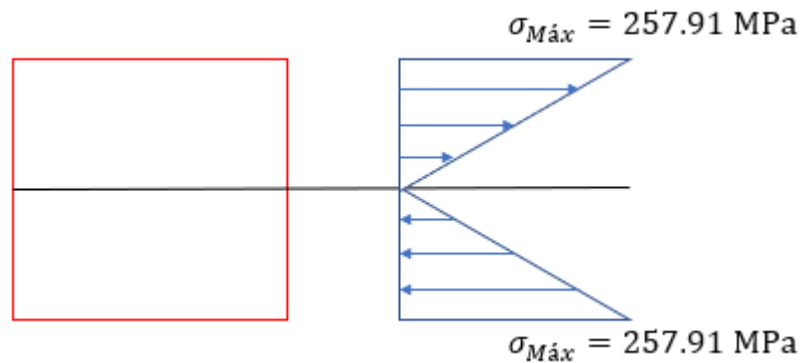
y = distancia media

Entonces:

$$\sigma_{M\acute{a}x} = \frac{1536 * 10^3 \text{ Nmm} * 22.5 \text{ mm}}{13.4 * 10^4 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma_{M\acute{a}x} = 257.91 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 257.91 \text{ MPa}$$

Ilustración 46. Diagrama tensión normal máxima.



Fuente: Autor.

Tensión tangencial máxima [67]:

$$V_{m\acute{a}x} = 961.5 \text{ N}$$

$$t = b = 3 \text{ mm}$$

$$I_X = 13.4 * 10^4 \text{ mm}^4 = I_Y$$

$$S = \text{Momento estatico} = 3.65 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} * S}{I_Y * b} \quad (65)$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{961.5 \text{ N} * 3.65 * 10^3 \text{ mm}^3}{13.4 * 10^4 \text{ mm}^4 * 3 \text{ mm}}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 8.76 \text{ MPa} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 8.76 \text{ MPa}$$

Criterio de Von Mises [67]:

$$\sigma_{VM} = \text{Tensión de Von Mises}$$

$$\sigma_X = \sigma_{m\acute{a}x} = \text{Tensión Normal}$$

$$\tau_{XY} = \sigma_{m\acute{a}x} = \text{Tensión Tangencial}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_X^2 + 3\tau_{XY}^2} \quad (66)$$

Entonces:

$$\sigma_{VM1} = \sqrt{257.91^2 + 3 * 0^2}$$

$$\sigma_{VM} = 257.91 \text{ MPa} \quad \text{Es la más crítica}$$

$$\sigma_{VM2} = \sqrt{0^2 + 3 * 8.76^2}$$

$$\sigma_{VM2} = 15.173 \text{ MPa}$$

Cálculo de la rotura de la viga:

Como se sabe que es un acero 275

$$\sigma_F = 275 \text{ MPA}$$

Se determina un factor de seguridad de 1.05 que es el indicado para vigas cuadradas y se determina la tensión de fluencia T_F [67] :

$$T_F = \frac{\sigma_F}{F_S} \quad (67)$$

$$T_F = \frac{275 \text{ MPA}}{1.05}$$

$$T_F = 261.9 \text{ MPA}$$

Se hace la comparación de tensión de fluencia del material y la calculada:

$$261.9 \text{ MPa} > 257.91 \text{ Mpa}$$

Es decir que la viga seleccionada no se rompe ni se deforma.

6.8.1 Ruedas de la estructura:

Las ruedas son el apoyo de la estructura y de todo el sistema, además permiten la movilidad de este cuando se requiera. El método de selección se hizo teniendo en cuenta dos condiciones, carga permitida y que fueran capaces de girar. El peso del sistema supera los 190 kg es por esto que la carga se considera de tipo mediana y las ruedas tienen que ser capaces de moverse sin mayor dificultad. La empresa “Rodachines Industriales y Cia LTA” proporciona una amplia gama de sistemas ruedas, las escogidas en este caso fueron de la referencia 17NB Giratorias, las cuales pueden venir con o sin freno y pueden soportar un rango de entre 175 kg a 250 kg, adecuadas para cargas medianas [80].

Ilustración 47. Ruedas industriales.



Fuente: [80].

Las ruedas sin freno tienen un costo aproximado de \$80.000 pesos colombianos, mientras que las ruedas con freno tienen un costo aproximado de \$117.000 pesos colombianos. Debido a esto, y para economizar costos, se escogieron dos ruedas con freno para ser posicionadas en la parte de atrás de la estructura y dos sin freno para ser posicionadas en frente de la estructura.

7. PRESUPUESTO ESTIMADO DE FABRICACIÓN

Para el costo estimado de todo el sistema que compone el gasificador, se tuvo en cuenta cada una de las partes y materiales que lo componen, para así realizar las respectivas cotizaciones de cada uno de sus componentes y determinar el costo total estimado que tendría la fabricación del gasificador.

Dicho costeo se realizará por partes, teniendo en cuenta los diferentes componentes que incluye el sistema del gasificador que son: El gasificador, La fuente de alimentación, el ciclón, la estructura y por ultimo los materiales extras para el funcionamiento del gasificador.

7.1 Presupuesto del gasificador:

Para el presupuesto del gasificador en primer lugar se tienen en cuenta los materiales que se utilizarán realizando la respectiva cotización de cada uno de ellos:

Tabla 30. Costo de materiales para el gasificador.

COSTO DE MATERIALES PARA EL GASIFICADOR			
Material	Unidades	Precio	Precio total
Lamina de acero inoxidable 310s por 6 m	2	\$ 490,000	\$ 980,000
Fibra cerámica x 8m	1	\$ 210,000	\$ 210,000
Cemento refractario x25kg	2	\$ 48,000	\$ 96,000
Foil de aluminio	1	\$ 110,000	\$ 110,000
Barra de Acero AISI 1045 diámetro 60mm	1	\$ 60,000	\$ 60,000
Pintura en aceite 1 galón	2	\$ 80,000	\$ 160,000
Juego de tornillos y tuercas 5/16 in	1	\$ 15,000	\$ 15,000
Manguera de aire R2 x 6m	1	\$ 80,000	\$ 80,000
TOTAL			\$ 1,711,000

Fuente: [81] [82] [83] [84] [78] [85]

Para determinar el costo de mano de obra, se realizó una cotización en la que se facilita la respectiva muestra de planos y características de cada parte del gasificador a la persona encargada del trabajo en un taller industrial, teniendo en cuenta la operación que va a realizar, las horas estimadas de trabajo que le tomara hacerlo y el precio de la hora de trabajo.

El precio de la hora de trabajo es determinado por la persona encargada del trabajo y es variable debido a la complejidad que tenga cada operación y a los equipos o maquinaria que se deba usar para realizar dicha labor.

A continuación, se muestra la cotización:

Tabla 31. Costo de mano de obra del gasificador.

COSTO DE MANO DE OBRA DEL GASIFICADOR			
Operación	Horas de trabajo	Precio hora de trabajo	Precio total
Corte de láminas de acero a las medidas a utilizar en cada parte del gasificador.	6	\$ 40,000	\$ 240,000
Doblado de láminas para la sección interna, externa y depósito de cenizas	4	\$ 30,000	\$ 120,000
Corte y adecuación de tubos para inyección de aire	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Mecanizado y dobles de la garganta del reactor	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Perforación de agujeros de anclaje	1	\$ 20,000	\$ 20,000
Perforación de agujeros patrón para la rejilla	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Pintada de todas las partes del gasificador	4	\$ 25,000	\$ 100,000
Soldadura para las secciones internas, externa y depósito de cenizas	3	\$ 40,000	\$ 120,000
Adecuación de la manguera de aire	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Rosca interna del depósito de cenizas	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Rosca externa de la sección externa	2	\$ 30,000	\$ 60,000
TOTAL			\$ 900,000

Fuente: Autor.

7.2 Presupuesto del ciclón:

Para el presupuesto del ciclón en primer lugar se tienen en cuenta los materiales que se utilizarán realizando la respectiva cotización de cada uno de ellos:

Tabla 32. Costo de materiales para el ciclón.

COSTO DE MATERIALES PARA EL CICLÓN			
Material	Unidades	Precio	Precio total
Lamina de acero inoxidable 310s por 2 m	1	\$ 163,333	\$ 163,333
Barra de Acero AISI 1045 diámetro 60mm	1	\$ 60,000	\$ 60,000
Pintura en aceite 1/2 galón	1	\$ 40,000	\$ 40,000
Juego de tornillos y tuercas 15/16 in	1	\$ 15,000	\$ 15,000
		TOTAL	\$ 278,333

Fuente: [81] [82] [83] [84] [78] [85]

Para determinar el costo de mano de obra, se realizó una cotización en la que se facilita la respectiva muestra de planos y características de cada parte del ciclón a la persona encargada del trabajo en un taller industrial, teniendo en cuenta la operación que va a realizar, las horas estimadas de trabajo que le tomara hacerlo y el precio de la hora de trabajo.

El precio de la hora de trabajo es determinado por la persona encargada del trabajo y es variable debido a la complejidad que tenga cada operación y a los equipos o maquinaria que se deba usar para realizar dicha labor.

A continuación, se muestra la cotización:

Tabla 33. Costo de mano de obra del ciclón.

COSTO DE MANO DE OBRA DEL CICLÓN			
Operación	Horas de trabajo	Precio hora de trabajo	Precio total
Corte de láminas de acero a las medidas a utilizar en cada parte del ciclón.	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Doblado de láminas para las partes que conforman el ciclón	2	\$ 25,000	\$ 50,000
Adecuación de tubos para entrada de gas al ciclón	1	\$ 20,000	\$ 20,000
Perforación de agujeros de anclaje	1	\$ 15,000	\$ 15,000
Soldadura para la unión de partes del ciclón	1	\$ 35,000	\$ 35,000

Pintada de todas las partes del ciclón	2	\$ 25,000	\$ 50,000
Adecuación de la manguera de aire	1	\$ 20,000	\$ 20,000
Rosca interna del depósito de cenizas	1	\$ 30,000	\$ 30,000
Rosca externa del depósito de cenizas	1	\$ 30,000	\$ 30,000
		TOTAL	\$ 310,000

Fuente: Autor.

7.3 Presupuesto de la fuente de alimentación:

Para el presupuesto de la fuente de alimentación en primer lugar se tienen en cuenta los materiales que se utilizarán realizando la respectiva cotización de cada uno de ellos:

Tabla 34. Costo de materiales para la fuente de alimentación.

COSTO DE MATERIALES PARA LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN			
Material	Unidades	Precio	Precio total
Lamina de acero inoxidable 310s por 6 m	1	\$ 490,000	\$ 490,000
Barra de Acero AISI 1045 diámetro 60mm	1	\$ 60,000	\$ 60,000
Pintura en aceite 1 galón	1	\$ 80,000	\$ 80,000
		TOTAL	\$ 630,000

Fuente: [81] [82] [83] [84] [78] [85]

Para determinar el costo de mano de obra, se realizó una cotización en la que se facilita la respectiva muestra de planos y características de cada parte de la fuente de alimentación a la persona encargada del trabajo en un taller industrial, teniendo en cuenta la operación que va a realizar, las horas estimadas de trabajo que le tomara hacerlo y el precio de la hora de trabajo.

El precio de la hora de trabajo es determinado por la persona encargada del trabajo y es variable debido a la complejidad que tenga cada operación y a los equipos o maquinaria que se deba usar para realizar dicha labor.

A continuación, se muestra la cotización:

Tabla 35. Costo de mano de obra para la fuente de alimentación.

COSTO DE MANO DE OBRA DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN			
Operación	Horas de trabajo	Precio hora de trabajo	Precio total
Corte de láminas de acero a las medidas a utilizar en cada parte del canalón y tolva.	4	\$ 40,000	\$ 160,000
Doblado de láminas para el canalón y tolva.	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Corte y adecuación de tubos para entrada de biomasa	1	\$ 20,000	\$ 20,000
Perforación de agujeros de anclaje y agujeros de entrada de biomasa	1	\$ 20,000	\$ 20,000
Pintada de todas las partes de alimentación	3	\$ 25,000	\$ 75,000
Soldadura para las uniones del canalón	2	\$ 40,000	\$ 80,000
Mecanizado del tornillo sin fin	4	\$ 50,000	\$ 200,000
TOTAL			\$ 645,000

Fuente: Autor.

7.4 Presupuesto de la estructura del gasificador:

Para el presupuesto de la estructura del gasificador en primer lugar se tienen en cuenta los materiales que se utilizarán realizando la respectiva cotización de cada uno de ellos:

Tabla 36. Costo de materiales para la estructura del gasificador.

COSTO DE MATERIALES PARA LA ESTRUCTURA DEL GASIFICADOR			
Material	Unidades	Precio	Precio total
Lamina de acero inoxidable 310s por 3 m	1	\$ 245,000	\$ 245,000
Perfil cuadrado 45x45 por 6 m	4	\$ 68,000	\$ 144,000
Ruedas con freno	2	\$ 117,000	\$ 234,000
Ruedas sin freno	2	\$ 80,000	\$ 160,000
Pintura en aceite 1 galón	1	\$ 80,000	\$ 80,000
TOTAL			\$ 863,000

Fuente: [81] [82] [83] [84] [78] [85]

Para determinar el costo de mano de obra, se realizó una cotización en la que se facilita la respectiva muestra de planos y características de cada parte de la fuente la estructura del gasificador a la persona encargada del trabajo en un taller industrial, teniendo en cuenta la operación que va a realizar, las horas estimadas de trabajo que le tomara hacerlo y el precio de la hora de trabajo.

El precio de la hora de trabajo es determinado por la persona encargada del trabajo y es variable debido a la complejidad que tenga cada operación y a los equipos o maquinaria que se deba usar para realizar dicha labor.

A continuación, se muestra la cotización:

Tabla 37. Costo de mano de obra para la estructura del gasificador.

COSTO DE MANO DE OBRA DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN			
Operación	Horas de trabajo	Precio hora de trabajo	Precio total
Corte de láminas de acero a las medidas a utilizar en la base de la estructura y base motor	1	\$ 40,000	\$ 40,000
Doblado de láminas para los apoyos del gasificador	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Corte y adecuación del perfil cuadrado a las medidas indicadas	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Pintada de todas las partes de la estructura	3	\$ 25,000	\$ 75,000
Soldadura para las uniones de los perfiles y de las laminas	3	\$ 40,000	\$ 120,000
TOTAL			\$ 335,000

Fuente: Autor.

7.5 Presupuesto de los materiales extras del gasificador:

Para el presupuesto de la los materiales extras del gasificador se tienen en cuenta las maquinas y materiales que se necesitan para el funcionamiento del gasificador y se realiza la respectiva cotización de cada uno de ellos:

Tabla 38. Costo de materiales para la estructura del gasificador.

COSTO DE MATERIALES EXTRAS PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL GASIFICADOR			
Material	Unidades	Precio	Precio total
Motor reductor helicoidal sinfín – corona	1	\$ 2,400,000	\$ 2,400,000
Manómetro	2	\$ 39,000	\$ 78,000
Compresor DeWalt	1	\$ 300,000	\$ 300,000
Resistencias Kanthal	1	\$ 120,000	\$ 120,000
Controlador MC 5438	1	\$ 150,000	\$ 150,000
TOTAL			\$ 3,048,000

Fuente: [81] [82] [83] [84] [78] [85]

7.6 Presupuesto total del gasificador:

Para determinar el presupuesto total del gasificador se tiene en cuenta en primer lugar el total de costos que se requiere para los materiales a utilizar:

Tabla 39. Costo total de los materiales para la fabricación del gasificador.

COSTO TOTAL DE LOS MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DEL GASIFICADOR	
Descripción	Precio
Materiales para el gasificador	\$ 1,711,000
Materiales para el ciclón	\$ 278,333
Materiales para la fuente de alimentación	\$ 630,000
Materiales para la estructura	\$ 863,000
Materiales extras	\$ 3,482,333
TOTAL	\$ 6,964,667

Fuente: [81] [82] [83] [84] [78] [85]

Luego de esto se requiere el total de costos que nos genera la mano de obra de todas las partes del gasificador:

Tabla 40. Costo total de la mano de obra para la fabricación del gasificador.

COSTO TOTAL DE LA MANO DE OBRA PARA LA FABRICACIÓN DEL GASIFICADOR	
Descripción	Precio
Mano de obra para el gasificador	\$ 900,000
Mano de obra para el ciclón	\$ 310,000
Mano de obra para la fuente de alimentación	\$ 645,000
Mano de obra para la estructura	\$ 335,000
TOTAL	\$ 2,190,000

Fuente: Autor.

Por último, para determinar el costo total que requiere el gasificador se tiene en cuenta el total de costo de materiales a utilizar y el total de costo de mano de obra:

Tabla 41. Presupuesto total de fabricación del gasificador.

PRESUPUESTO TOTAL DE FABRICACIÓN DEL GASIFICADOR	
Descripción	Precio
Total de costo de materiales a utilizar	\$ 6,964,667
Total de costo de mano de obra para la fabricación	\$ 2,190,000
TOTAL	\$ 9,154,667

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta el costo de fabricación se contempla con la persona encargada de fabricarlo que el total de horas requeridas para la fabricación es de 71 horas es decir 18 días de trabajo, debido a que especifican que trabajaran 4 horas diarias para la fabricación del gasificador, este tiempo y estos valores es otorgado por el personal encargada del taller industrial y el tiempo y costos no es tan elevado debido a que las medidas requeridas del gasificador no son a una escala industrial, si no a una escala de laboratorio.

8. CONCLUSIONES

- Luego de realizar el diseño conceptual se determina que el material de la biomasa es el apropiado debido a que contiene un poder calorífico alto, su contenido de carbono es elevado, presenta un contenido de cenizas que bajo y su contenido de humedad es apropiado para realizar la gasificación.
- Se entiende que la relación de aire y combustible debe permanecer en un promedio entre 0.2 y 0.3, por el motivo de que si esta relación aumenta más de lo nombrado la temperatura aumentara y esto hará que el proceso cambie y no sea una gasificación si no una combustión.
- Se concluye que el ciclón es una forma adecuada para poder disminuir la cantidad de cenizas volantes en el gas de síntesis, debido a que presenta una eficiencia del 95.8 % en la remoción de partículas mayores a los $10\ \mu m$. Esta limpieza que se le realiza al gas se hace con el fin de garantizar el buen funcionamiento de los motores o maquinas donde se vaya a utilizar este gas.
- Se define que el gasificador de lecho fijo de corrientes paralelas – Downdraft fue el indicado para este proyecto debido a que los requerimientos del cliente exigen un gasificador a nivel laboratorio y este tipo de gasificadores manejan un bajo flujo de combustibles y una potencia baja y se utiliza normalmente para escalas pequeñas y así mismo el gas generado presenta una baja cantidad de alquitranes.
- Se determina según la tabla de costos de fabricación del equipo, que el gasificador no tiene un costo muy elevado debido a su baja escala y a que el gasificador determinado en este proyecto no es del todo automatizado.
- Se concluye que, en cuanto a los objetivos planteados de forma específica, se han llevado paso a paso para así tener un diseño efectivo, generando el modelado en tres dimensiones y los planos y precios de fabricación del equipo.
- En cuanto al proceso de detalle se presenta un cambio en los cálculos, debido a que en primer lugar se determinó que el flujo de combustible iba a ser de 30 kg/h y con dicho flujo el gasificador no cumplía con los requerimientos establecidos, debido a que generaba un gasificador con dimensiones excedidas a las ya establecidas, es por esto que se decide

determinar un flujo de combustible de 15 kg/h para así poder cumplir con lo requerido.

- Se concluye que las temperaturas que se utilizaran en el reactor son uno de los parámetros primordiales para que este proceso se realice correctamente, debido a que según la temperatura dependen los gases resultantes, es por esto que se debe asegurar en el proceso una temperatura entre 500 °C a 100°C para que el proceso de gasificación sea garantizado.

9. RECOMENDACIONES

- Para el recaudo de la biomasa se recomienda conseguir la biomasa en partes no superiores a los 5 cm, o adquirir una trituradora para que antes de comenzar el proceso de la gasificación se corte la biomasa en partes no superiores a 5 cm.
- Las cenizas y alquitranes que son expulsados del gasificador se pueden reutilizar generando materia prima para otras industrias como los agricultores de fertilizantes, las constructoras de carreteras y las cementeras, para que le puedan dar una utilidad y no se convierta en más desechos.
- Se determina que si se desea tener un gas de síntesis con menor cantidad de cenizas volantes se es necesario implementar el diseño de un filtro, donde reduzca de una mayor forma estas cenizas y alquitranes que pueda tener aún el gas.
- Si el gas de síntesis se desea utilizar para alimentar alguna máquina, motores, generadores, entre otros, se es necesario implementar un intercambiador de calor, para poder reducirle la temperatura con la que sale el gas de síntesis.
- Para tener un gasificador más confortable y de una forma más automatizada se recomienda implementar las termocuplas y realizar la respectiva adecuación del PLC.

REFERENCIAS

- [1] Lorena, "Combustibles Alternativos Ventajas y Desventajas," *Recsa Energy*, 2019. <https://recsa-energy.com/combustibles-alternativos-ventajas-y-desventajas/>.
- [2] UPME, "Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución," 2019.
- [3] Team Foods, "Combustibles alternativos más usados en Colombia," vol. 1, p. 3, 2019.
- [4] R. Bermejo Gómez de Segura, "El fin de la era de los combustibles fósiles. Sus consecuencias," *Soc. y medio Ambient. ponencias Present. en las segundas jornadas "Sociedad y medio Ambient.*, vol. 1995, pp. 287–350, 2016, [Online]. Available: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2231280>.
- [5] GICIC, "Producción de Biocombustibles," *Grupo de investigación en Ciencia e ingeniería Catalíticas*, 2019. <http://www.fiq.unl.edu.ar/gicic/castellano/Temas Investigacion/Combustion biomasa/CBiomasa.htm>.
- [6] S. G. Garrido, *Centrales termoeléctricas de biomasa*, vol. 1. 2012.
- [7] H. Escalante Hernández, J. Orduz Prada, H. J. Zapata Lesmes, M. C. Cardona Ruiz, and M. Duarte Ortega, *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. 2017.
- [8] GLOBAL SYNGAS, "The Gasification Industry," 2018. <https://www.globalsyngas.org/resources/the-gasification-industry/>.
- [9] Coordinación de Energías Renovables, "Energías Renovables - Energía Biomasa," vol. 1, p. 11, 2018.
- [10] D. Jose, *Energías alternativas*. 2018.
- [11] B. Prabir, *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. 2010.
- [12] D. A. Bell, B. F. Towler, and F. Maohong, *Coal Gasification and its Application*. 2010.
- [13] TWENERGY, "La biomasa en Colombia: el gran reto para generar energía sustentable," 2019. <https://twenergy.com/energia/biomasa/biomasa-en-colombia/>.
- [14] W. D. Navarro Abril, "DISEÑO DE UN GASIFICADOR DUAL PARA BIOMASA RESIDUAL AGROPECUARIA A NIVEL LABORATORIO," 2016.
- [15] O. de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura La, "BIOMASS GASIFICATION," vol. 1, p. 2, 2020.
- [16] J. Ness and B. Moghtaderi, "Biomass and bio-energy," *Fuel Energy Abstr.*, vol. 44, no. 3, p. 158, 2013, doi: 10.1016/s0140-6701(03)81796-4.
- [17] S. Khan, V. Paliwal, V. V. Pandey, and V. Kumar, "Biomass as Renewable Energy," vol. 2, no. March 2015, 2017, doi: 10.17148/IARJSET.
- [18] W. I. Biomass, "Biomass Use of Biomass," pp. 10–14, 2018, [Online]. Available: <file:///D:/Mis documentos/Escritorio/biomasa 2.pdf>.
- [19] E. Samer, M. Perea, and A. Perea, "Biomass as Renewable Energy : Worldwide Research

- Trends," vol. 2, 2019, doi: 10.3390/su11030863.
- [20] Erenovable, "ENERGÍA FÓSIL Y EFECTO INVERNADERO," 2018.
<https://erenovable.com/energia-de-biomasa/>.
 - [21] W. DAVID and N. ABRIL, "DISEÑO DE UN GASIFICADOR DUAL PARA BIOMASA RESIDUAL AGROPECUARIA A NIVEL LABORATORIO," 2016.
 - [22] I. Martínez, *FUELS*. 2020.
 - [23] S. S. P. S, *FUELS AND COMBUSTION*, no. October 2010. 2014.
 - [24] J. Pérez and D. Borge, "Biomass gasification process: theoretical and experimental studies a review," vol. 31, 2017, [Online]. Available:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302010000200009.
 - [25] C. Augusto Estrada and A. Zapata Meneses, "Gasificación De Biomasa Para Producción De Combustibles De Bajo Poder Calorífico Y Su Utilización En Generación De Potencia Y Calor.," *Sci. Tech.*, vol. 2, no. 25, pp. 155–159, 2014, doi: 10.22517/23447214.7229.
 - [26] Coordinación de Energías Renovables, Dirección Nacional de Promoción, and Subsecretaría de Energía Eléctrica, "Energía Biomasa," *Energías Renov.*, p. 19, 2008, [Online]. Available:
http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf.
 - [27] D. Barik, *Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation*. 2019.
 - [28] G. Centi, *Journal of Energy Chemistry*, vol. 25. 2016.
 - [29] S. Ramires, F. Sierra, and C. Guerrero, "Gasification from waste organic materials," vol. 31, 2018.
 - [30] F. Nasir, *Electric Renewable Energy Systems*. 2016.
 - [31] R. Bini and A. Guercio, *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. 2017.
 - [32] Upcommons, "Estudio de alternativas para la electrificación rural en la zona de selva del Perú," 2015.
 - [33] P. Vicente¹, F. Albesa¹, and M. Condorí, "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GASIFICACIÓN EN UN GASIFICADOR DOWNDRAFT PROTOTIPO," vol. 4, p. 12, 2016, [Online]. Available:
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/65769/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
 - [34] R. Zanzi, J. Suarez, and P. Roque, "UPDRAFT GASIFICATION," vol. 2, p. 12, 2018, [Online]. Available: <file:///D:/Mis documentos/Downloads/B-034-final-Zanzi-SE.pdf>.
 - [35] F. Natalia, "ESTADO DEL ARTE DEL USO DEL GAS DE GASIFICACIÓN TERMOQUÍMICA DE BIOMASA (GG) EN MOTORES DE COMBUSTION INTERNA ALTERNATIVOS," 2013.
 - [36] R. Khalid, J. Mohammad, and R. Umer, *Biomass and Bioenergy*. 2020.
 - [37] U. de Sevilla, "Planta piloto de Gasificación de Biomasa," 2016.
 - [38] J. Pérez, D. Borge, and J. Agudelo, "Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de

estudios teórico -experimentales,” *Rev. Fac. Ing.*, no. 52, pp. 95–107, 2010.

- [39] O. P. Sánchez de Toledp, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN DE BIOMASA,” 2015.
- [40] R. Ott, D. Childress, D. Koch, and M. Koch, “Design of a Personal Biomass Gasification Chamber for SynGas Production Capstone Design Team Members :,” 2008.
- [41] R. P. Devi and S. Kamaraj, “Design and Development of Updraft Gasifier Using Solid Biomass,” vol. 6, no. 4, pp. 182–189, 2017, [Online]. Available: <https://www.ijcmas.com/abstractview.php?ID=1910&vol=6-4-2017&SNo=21>.
- [42] C. Andrey, ““Propuesta de un sistema de gasificación de residuos de hidrocarburos para aprovechamiento energético en el Plantel El Alto de RECOPE S.A.”,” 2017.
- [43] L. Naranjo Valencia and M. Aristizábal Álvarez, “Diseño conceptual de un gasificador para la producción de gas de síntesis a partir de residuos de poda generados en la universidad EAFIT,” 2015.
- [44] SIAME, “Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia,” vol. 1, p. 2, 2020.
- [45] C. Farfan, “Ceniza de bagazo de caña de azúcar en la resistencia a la compresión del concreto,” vol. 7, p. 31, 2018, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5217/521758012002/html/index.html>.
- [46] H. Marilyn, T. Juan, C. Luis, and B. David, “Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México,” vol. 1, p. 9, 2018.
- [47] S. Zamir, G. Hugo, and M. Oscar, “Efecto del precalentamiento del aire primario y la humedad del bagazo de caña de azúcar durante la combustión en lecho fijo,” vol. 1, p. 12, 2013, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v14n1/v14n1a02.pdf>.
- [48] F. Carlos and G. Gerardo, “Gasificación adiabática del bagazo de caña de azúcar usando aire-vapor,” vol. 1, pp. 53–60, 2011, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/1210/121022658007.pdf>.
- [49] R. Iván, P. Esperanza, and L. Jorge, “Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos,” vol. 1, p. 6, 2013, [Online]. Available: <file:///D:/Mis documentos/Downloads/276504-Article Text-378201-1-10-20140523.pdf>.
- [50] P. Ramchandra, D. Boucar, and P. Gayatri, “Sustainable rural electrification using rice husk biomass energy: A case study of Cambodia,” vol. 44, pp. 530–542, 2015.
- [51] O. Natalia, T. Andrés, F. Luz, and C. Abdul, “EVALUATION OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND THERMAL IN STEMS COFFEE AND ITS ECONOMIC ANALYSIS FOR THE PRODUCTION OF SOLID PELLETS AS BIOFUEL,” vol. 1, p. 15, 2018.
- [52] R. Catalina, “Análisis termogravimétrico del bagazo de caña de azucar y de la cascarilla de cafe para la estimación de las constantes cinéticas en los procesos de gasificación.”, 2009.
- [53] R. Guillermo, G. Caio, O. Edgardo, and B. Luis, “CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR. PARTE I: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS,” vol. 1, p. 10, 2018, [Online]. Available: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/036.pdf>.

- [54] O. Carlos, S. Juan Rodrigo, and R. Nelson, "EVALUACIÓN DE UN GASIFICADOR DE FLUJO DESCENDENTE UTILIZANDO ASTILLAS DE MADERA DE CAFÉ," vol. 1, p. 15, 2017.
- [55] M. Fao, *El gas de madera como combustible para motores*. 1993.
- [56] G. CABRERA, S. MADRIÑAN, and D. MUÑOZ, "CHARACTERIZATION OF GAS OBTAINED WITH THE ALGARROBO AND SUGARCANE BAGASSE," vol. 1, p. 7, 2012, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v10n1/v10n1a19.pdf>.
- [57] March, *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. 1998.
- [58] R. Alejandro, Z. Alejandro, and O. Abraham, "PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA," vol. 1, p. 9, 2012, [Online]. Available: http://somim.org.mx/memorias/memorias2012/articulos/pdfs/A3/A3_90.pdf.
- [59] Universidad de granada, "Cálculo de Bombas y Tuberías," 2021. <http://www.ugr.es/~aulavirtualpfcic/Bbombasytuberias.html>.
- [60] Mister Worker, "Compresores de aire," vol. 1, p. 20, 2021.
- [61] Suministris Hidráulicos S.A.S, "Manguera Hidráulica R2," 2021. <http://www.suministroshidraulicos.net/portfolio/manguera-hidraulica-r2>.
- [62] V. Jan, "DESIGN RULES FOR DOWN DRAFT WOOD GASIFIERS A SHORT REVIEW," vol. 1, p. 24, 1982, [Online]. Available: file:///D:/Mis documentos/Downloads/Design_Rules_for_Downdraft_Wood_Gasifier.pdf.
- [63] P. Thomas and J. Vattappilly, "Online Companion Guide to the ASME Boiler and Pressure Vessel Codes: Criteria and Commentary on Select Aspects of the Boiler & Pressure Vessel Codes," vol. 1, p. 112, 2020.
- [64] Acerinox, "EN 1.4845 / AISI 310S," 2022. .
- [65] L. C. Arcadio, *MAQUINAS. CALCULOS DE TALLER*. 2010.
- [66] C. JONATHAN and C. JHON, "DISEÑO A ESCALA LABORATORIO DE UN GASIFICADOR DE LECHO MÓVILPG-17-2-03," 2019.
- [67] R. L. Norton, *Diseño de máquinas*, Cuarta. 2011.
- [68] S. S. Company, "Aleación 310/310S," 2021. <https://www.sandmeyersteel.com/spanish/310-310S.html>.
- [69] GAMMA, "Concretos Refractarios," vol. 1, p. 2, 2018, [Online]. Available: <https://www.gamma.com.co/wp-content/uploads/2018/05/CBC-70-1.pdf>.
- [70] Alliance Packaging Group, "FOIL DE ALUMINIO," 2020. <https://www.apgglobe.com/foil-de-aluminio-2/>.
- [71] ASH, "MATERIALES AISTANTES: Fibra de cerámica," 2021. <https://www.aislantessh.com.ar/fibra-de-ceramica/>.
- [72] M. Julio, "Resistencias electricas calefactoras," vol. 1, p. 5, 2019.
- [73] L. Maxthermo-guitta Group corp maximum electronic co., "Temperature PID controllers - Operational manual," vol. 1, p. 7, 2015.
- [74] S. Jose, "Diseño, especificacion y análisis crítico de un sistema de limpieza y depuracion

de gases para un gasificador de biomásas del tipo flujo descendente,” 2007.

- [75] E. Carlos, “DISEÑO ÓPTIMO DE CICLONES,” p. 17, 2006, [Online]. Available: <file:///D:/Mis documentos/Downloads/document.pdf>.
- [76] Ingemecánica, “Cálculo de Transportadores de Tornillo Sin Fin,” vol. 1, p. 20, 2018.
- [77] A. Gregorio and O. Deny, “CHARACTERISATION OF SUGAR CANE BAGASSE THROUGH THERMAL ANALYSIS,” vol. 1, p. 7, 2015.
- [78] Siemens, *Motorreductores Motox*. 2018.
- [79] R. M. Javier Ángel, “Perfil óptimo de vigas y pilares de acero,” vol. 1, p. 20, 2018.
- [80] J. Solanilla, “Rodachines Industriales y Cia LTA,” vol. 1, p. 15, 2020, [Online]. Available: <https://www.rodachines.co/>.
- [81] Nutec europa S.L, “Construcción materiales,” 2021. <https://www.interempresas.net/Construccion/FeriaVirtual/Producto-Colchas-de-fibra-de-ceramica-MaxWool-151523.html>.
- [82] Refractario de Colombia, “Cemento refractario,” 2021. <https://refractariosdecolombia.mercadoshops.com.co/>.
- [83] Wesco, “Aceros Inoxidables,” 2021. <https://www.wesco.com.co/>.
- [84] SoloStocks, “Manta fibra ceramica para aislamiento termico - Thermal insulation,” 2021. .
- [85] ROKA Industrial S.A.S, “Manómetros,” 2021. <https://www.roka.com.co/manometros/>.