



**UNIVERSIDAD ESTATAL DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA  
CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**“DISEÑO, SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR DE  
DESECHOS DEL MAÍZ”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PRESENTADO  
PARA OPTAR POR EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO**

**ELABORADA POR:**

**CRISTHIAN JAVIER ALMEIDA MURILLO**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Ing. MARIANA NAVARRO ALMEIDA**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2014**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, que fueron parte fundamental para la culminación de mi carrera profesional, por sus esfuerzos, tolerancia, comprensión y motivación en la realización de mis metas.

A la Universidad Estatal de Guayaquil, institución dedicada al desarrollo de profesionales, así como a todos los docentes quienes con sus conocimientos y sabiduría en cada aula, guiaron nuestros aprendizajes creando espíritu de investigación y trabajo.

Un profundo y sincero agradecimiento al sr. Carlos Castro Gerente en industrias Horst Cía. Ltda. Por prestarnos sus instalaciones y equipos para la construcción del equipo, sin sus recomendaciones y observaciones en la construcción del equipo no se hubiera llevado a cabo exitosamente la construcción del equipo.

A mi primo Wilmer Almeida Murillo que me ayudo en cada momento sin importar las circunstancias en la construcción del equipo, lo que te puedo decir es mil gracias por ayudarme en todo.

A la ing. Mariana Navarro Almeida por sus apreciaciones, sugerencias y recomendaciones, mis más sincero agradecimiento.

A mis amigos que me han apoyado y que con sus palabras me han dado fuerzas para seguir.

A todos ellos mi más sinceros agradecimientos.

## **DEDICATORIA**

Tengo el agrado y devoción de dedicar este trabajo a mis padres pilares fundamentales en mi vida, guiándome en el aprendizaje diario de mi vida, apoyándome incondicionalmente en los proyectos propuestos de mi vida, y que son mis ejemplos de que las metas propuestas con dedicación y esfuerzo siempre se pueden conseguir. A mi hermana, sobrino y familiares que estuvieron ahí motivando a seguir adelante y no rendirme nunca para así cumplir una etapa más de mi vida.

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

---

Cristhian Javier Almeida Murillo

CI.1206714568

## CERTIFICADO DEL TUTOR

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

---

Mariana Navarro Almeida

Ingeniera Química

CI.

## **RESUMEN**

El Ecuador es un país que se caracteriza por su gran diversidad de plantaciones y sus extensas áreas dedicadas a la agricultura; dentro de las áreas cultivables podemos encontrar grandes plantaciones de maíz, Cacao, Arroz, Plátano, Banano, Palma Africana, Caña de Azúcar, entre otros. Cuando sus cultivos entran en fase de cosecha, se procede a recolectar sus frutos para su posterior venta a los agroindustrias y agro importadores, ellos se encargan de separar y clasificar los frutos por su calidad y forma. Esta separación y clasificación de los productos agrícolas genera importantes cantidades de desechos orgánicos que son botados o incinerados despreciando su usos para con fines energéticos.

Actualmente en el Ecuador, como fuente de energía para el secado de granos o para generar vapor de agua en las calderas se usa diésel gas licuado de petróleo, pero gracias a los nuevos avances tecnológicos y conciencia ambiental por parte de los empresarios se ha obtenido otros medios de combustibles tales como el bagazo de la caña de azúcar que se utiliza para generar energía que generalmente se usa en los calderos, tamo de arroz que lo utilizan para el secado de granos de los productos agrícolas. Sin embargo existe gran cantidad de desechos que pueden ser utilizados para la generación energía calorífica, ya sea por medio de calderos de combustión para generar vapor o a través de procesos de gasificación.

El desarrollo de la tesis va encaminado en la construcción de un equipo de gasificación para desechos del maíz con el fin de implementar estas condiciones a las diferentes aplicaciones de la biomasa a escala industrial. La naturaleza del tema de estudio prácticamente nos incita a emplear durante el proceso investigativo el método cualitativo y el método cuantitativo.

Con la fabricación de una gasificación de desechos de maíz se ahorra el valor por la compra del gas licuado de petróleo, anual a las empresas que brindan servicio de secado del grano de maíz, y que ese ahorro cubriría el gasto del sistema de gasificación en menos de 5 meses.

### **Palabras Claves**

Maíz, Gasificación, Biomasa, Energía alterna.

## **ABSTRACT**

Ecuador is a country characterized by great diversity of plantations and extensive areas devoted to agriculture; within arable areas we can find large cornfields, Cocoa, Rice, Banana, Banana, African palm, sugar cane, among others. When their crops come harvest phase, we proceed to reap the rewards for later sale to agribusiness and agro importers, they are responsible for separating and sorting fruit for quality and shape. This separation and sorting of agricultural products generates significant amounts of organic wastes that are dumped or incinerated neglecting its uses for energy purposes.

Currently in Ecuador, as a source of energy for drying grain or to generate steam boilers diesel LPG is used, but thanks to new technological developments and environmental awareness on the part of employers has been obtained other mass fuels such as bagasse from sugar cane that is used to generate energy that is generally used in the pots, rice chaff use it for grain drying of agricultural products. However, there is great amount of waste that can be used for generating heat energy either through combustion boilers for generating steam or by gasification.

The development of the thesis is aimed at building a team gasification for waste corn in order to implement these conditions to the different uses of biomass on an industrial scale. The nature of the study topic practically encourages us to use during the research process qualitative method and quantitative method.

Through making waste gasification corn value for the purchase of liquefied petroleum gas, annual service companies that provide drying of maize grain is saved, and that savings would cover spending gasification system in less 5 months.

### **Keywords**

Corn, Gasification, Biomass, Energy AC.

## INDICE

<b>I. CAPITULO 1.</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.4. Formulación del problema.	5
1.5. Sistematización del problema.	5
1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO	6
1.7. DELIMITACIÓN	7
1.8. OBJETIVOS	8
1.8.1. OBJETIVO GENERAL	8
1.8.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	8
1.9. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.9.1. HIPOTESIS GENERAL	9
1.9.2. HIPOTESIS ESPECIFICA	9
1.10. VARIABLES	10
1.11. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	11
<b>II. CAPITULO 2.</b>	<b>12</b>
2.1. Introducción al Maíz	12
2.1.1. Partes de la Mazorca de Maíz.	13
2.2. Definición de Biomasa	13
2.2.1. Composición de la Biomasa	14
2.2.2. Características de la Biomasa	15
2.2.3. Ventajas y Desventajas del uso de biomasa	22
2.3. Convirtiendo Biomasa en Energía	24
2.3.1. Procesos de combustión directa	25
2.3.2. Procesos termoquímicos	26
2.3.3. Procesos Bioquímicos	28
2.4. Gasificador de Biomasa	30
2.4.1. Influencia de la composición del sólido en el proceso.	31
2.4.2. Termoquímica de los procesos de gasificación	32
2.4.3. Reacciones químicas elementales de la gasificación	33
2.4.4. Procesos de gasificación	36
2.5. Tipos de Gasificadores	36
2.5.1. Gasificador de Lecho Fijo y Semi móvil	37
2.5.2. Gasificador de Lecho Fluidizado	41

2.5.3. Gasificador de Flujo de Arrastre .....	41
2.6. Comparación de los Gasificadores de Lecho Fijo y Fluidificado .....	42
III. CAPITULO 3. ....	45
3.1. Metodología de la Investigación .....	45
3.1.1. Tipos y Enfoques Metodológicos.....	45
3.1.2. Métodos y Técnicas.....	45
3.2. Ingeniería de Procesos .....	46
3.2.1. Selección de un equipo de gasificación.....	46
3.2.2. Diseño del Gasificador .....	49
3.2.3. Condiciones de operación .....	57
3.2.4. Dimensionamiento del ciclón. ....	61
3.2.5. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.....	65
3.3. Materiales a usar .....	66
3.4. Manual de operaciones.....	67
IV. CAPITULO 4. ....	70
4.1. Balance de materia.....	70
4.2. Balance de Energía .....	75
4.2.1. Eficiencia del Gasificador .....	82
4.3. Resultados de la experimentación. ....	84
4.4. Análisis de Resultados .....	87
4.5. Costo del Sistema de Gasificación.....	91
4.5.1. Costo Total de Fabricación.....	91
4.6. Rentabilidad del Proyecto .....	95
4.7. Comprobación de la Hipótesis.....	97
CONCLUSIONES .....	99
RECOMENDACIONES .....	100
GLOSARIO .....	101
BIBLIOGRAFÍA .....	102
ANEXOS .....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla. 1. Operacionalización de las variables	11
Tabla. 2. Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa.	16
Tabla. 3. Intervalos del contenido de humedad de algunos tipos de biomasa sólida.	18
Tabla. 4. Poderes caloríficos de diversos combustibles	21
Tabla. 5. Resumen de las características de los gasificadores para la gasificación de biomasa	42
Tabla. 6. Cuadro comparativo entre los diferentes tipos de gasificadores	43
Tabla. 7. Principales propiedades físicas del olote del maíz	47
Tabla. 8. Propiedades Químicas del olote de maíz	48
Tabla. 9. Comparación de Gasificadores	49
Tabla. 10. Dimensionamiento de las zonas que se compone el gasificador	55
Tabla. 11. Valores de masa, volumen y densidad del olote del maíz	56
Tabla. 12. Condiciones de operación	58
Tabla. 13. Relación estequiometría	59
Tabla.14. Dimensionamiento total	59
Tabla. 15. Características de los ciclones de alta eficiencia	62
Tabla. 16. Resumen del balance de materia	74
Tabla. 17. Calor de reacción en la reacción de combustión	75
Tabla. 18. Calor de reacción en la 1° reacción de gasificación.	76
Tabla. 19. Calor de reacción en la 2° reacción de gasificación.	76
Tabla. 20. Calor de reacción en la 3° reacción de gasificación.	77
Tabla. 21. Determinación de la entalpia de los componentes de salida	77
Tabla. 22. Determinación de la entalpia de los componentes de la entrada	78
Tabla. 23. Porcentajes volumétricos de los componentes del gas	79
Tabla. 24. Determinación del calor específico del gas en el ciclón	81
Tabla. 25. Determinación del calor específico del gas en el tanque de almacenamiento	82
Tabla. 26. Datos de la prueba #1	84
Tabla. 27. Datos de la prueba #2	85
Tabla. 28. Datos de la prueba #3	86
Tabla 29. Comparación entre datos experimentales y analíticos del sistema de gasificación.	88
Tabla. 30. Costo de los materiales utilizados para el equipo de Gasificación	93
Tabla. 31. Costos de la ingeniería del proyecto.	95
Tabla.32. Comparación de consumo entre combustibles para un secador circular artesanal	97
Tabla. 33. Análisis elemental del olote de maíz	106

<b>Tabla. 34. Composición Química del olote de maíz</b>	<b>107</b>
<b>Tabla. 35. Estequiometria de la reacción de oxidación</b>	<b>107</b>
<b>Tabla. 36. Determinación de la masa molar media del aire</b>	<b>108</b>
<b>Tabla. 37. Relación entre los diámetros de la garganta y tubería de entrada de aire.</b>	<b>110</b>
<b>Tabla. 38. Distribución por tamaños del polvo en el gas</b>	<b>112</b>

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
<b>Figura. 1. Partes de la mazorca de maíz</b>	13
<b>Figura. 2. Transformaciones y aplicaciones energéticas de biomasa</b>	24
<b>Figura. 3. Etapas de la gasificación</b>	33
<b>Figura 4. Zonas de reacción de un gasificador</b>	35
<b>Figura. 5. Gasificador de corriente ascendente (Updraft)</b>	38
<b>Figura. 6. Gasificador de corriente descendente o tiro invertido</b>	39
<b>Figura. 7. Gasificador de Tiro Transversal (Crossdraft)</b>	40
<b>Figura 8. Gasificador de Flujo de Arrastre</b>	42
<b>Figura. 9. Diagrama de las Corriente de un Gasificador Down-Draft</b>	50
<b>Figura 10.- Gasificador Down-Draft con sus respectivas zonas</b>	51
<b>Figura. 11. Garganta de oxidación</b>	52
<b>Figura. 12. Garganta de oxidación con sus respectivas medidas.</b>	55
<b>Figura. 13. Sistema de Gasificación para la eliminación de partículas de cenizas, presentes en el gas pobre.</b>	60
<b>Figura. 14. Ciclón de Alta Eficiencia Stairmand</b>	61
<b>Figura. 15. Tanque de almacenamiento</b>	66
<b>Figura 16. Alquitranes y aceites condensados de la parte inferior del gasificador</b>	89

## INDICE DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo 1 - Cálculos Previos en el Diseño del Gasificador</b>	<b>106</b>
<b>Anexo 2 - Balances de materia y energía</b>	<b>113</b>
<b>Anexo 3 - Fotos de la Construcción del Gasificador</b>	<b>116</b>
<b>Anexo 4 - Planos del equipo de gasificación</b>	<b>128</b>

## NOMENCLATURA

<b>mi</b>	Peso molecular de los compuestos y elementos químicos
<b>Xi</b>	Moles de los reactantes
<b>ni</b>	Kilos moles de reactantes
<b>Yi</b>	Kilogramos de reactantes
<b>Xf</b>	Moles de los productos de la combustión
<b>nf</b>	Kilos moles de los productos de la combustión
<b>Yf</b>	kilogramos de los productos de la combustión
<b>P</b>	Presión del aire en atm (atmosferas)
<b>V</b>	Volumen necesario de aire en m <sup>3</sup> (metros cúbicos)
<b>n</b>	Moles de aire
<b>R</b>	Constante de los gases en atm Lt/mol °K
<b>T</b>	Temperatura ambiente en °K (grados kelvin)
<b>M</b>	Flujo másico del olote del maíz Kg/h
<b>m</b>	Kilogramos de olote del maíz
<b>A<sub>tr</sub></b>	Área total del reactor en m <sup>2</sup> (metros cuadrados)
<b>A<sub>zp</sub></b>	Área de la zona de pirolisis y secado en m <sup>2</sup> (metros cuadrados)
<b>A<sub>zox</sub></b>	Área de la zona de oxidación en m <sup>2</sup> (metros cuadrados)
<b>A<sub>ag</sub></b>	Área del anillo de la garganta en m <sup>2</sup> (metros cuadrados)
<b>A<sub>c</sub></b>	Área del cono de la garganta en m <sup>2</sup> (metros cuadrados)
<b>D<sub>zp</sub></b>	Diámetro de la zona de pirolisis y secado en m (metro)
.	
<b>D<sub>ag</sub></b>	Diámetro del anillo de la garganta en m (metro)
<b>H<sub>zp</sub></b>	Altura de la zona de pirolisis y secado en m (metro)
<b>H<sub>ag</sub></b>	Altura del anillo de la garganta en m (metro)
<b>H<sub>c</sub></b>	Altura del cono de la garganta en m (metro)
<b>Ge</b>	Generatriz del cono de la garganta en m (metro)
<b>B</b>	Constante para la relación volumétrica, adimensional
<b>V<sub>tr</sub></b>	Volumen total del reactor en m <sup>3</sup> (metros cúbicos)
<b>V<sub>ol</sub></b>	Volumen del olote del maíz en m <sup>3</sup> (metros cúbicos)
<b>V<sub>c</sub></b>	Volumen del cono de la garganta en m <sup>3</sup> (metros cúbicos)
<b>V<sub>zp</sub></b>	Volumen de la zona de pirolisis en m <sup>3</sup> (metros cúbicos)
<b>V<sub>ag</sub></b>	Volumen del anillo de la garganta en m <sup>3</sup> (metros cúbicos)
<b>K</b>	Relación volumétrica entre el volumen total de reacción y el volumen del olote del maíz.
<b>T<sub>gox</sub></b>	Temperatura de la garganta de oxidación en °C (grados Celsius)
<b>T<sub>gtl</sub></b>	Temperatura del gas en el tanque de lavado en °C (grados Celsius)

<b>T<sub>gzp</sub></b>	Temperatura del gas en la zona de pirolisis y secado en °C (grados Celsius)
<b>T<sub>gstl</sub></b>	Temperatura del gas a la salida del tanque de lavado en °C (grados Celsius)
<b>V<sub>s</sub></b>	Velocidad de salida del gas pobre en m/s (metros sobre segundos)
<b>Q<sub>g</sub></b>	Calor o potencia generada por el gas. MJ/h (mega joule sobre hora)
<b>m<sub>bio</sub></b>	Masa de entrada de biomasa al gasificador Kg (kilogramos)
<b>PCI<sub>bio</sub></b>	Poder calorífico inferior de la biomasa MJ/Kg (mega joule sobre kilogramo)
<b>m<sub>g</sub></b>	Masa del gas producido en Kg (kilogramos)
<b>Cp<sub>g</sub></b>	Calor específico del gas MJ/Kg °C (mega joule sobre kilogramos por grados Celsius)
<b>ΔT<sub>g</sub></b>	Diferencia de temperatura del gas a la salida en °C (grados Celsius)
<b>Q<sub>sm</sub></b>	Calor necesario para secar 2000 Kg de grano de maíz
<b>PCI<sub>glp</sub></b>	Poder calorífico inferior de GLP en MJ/Kg (mega joule sobre kilogramo)
<b>m<sub>GLP</sub></b>	Masa de gas licuado de petróleo Kg (kilogramos)
<b>H<sub>e</sub></b>	Entalpia de los componentes de entrada en Kcal (kilocalorías)
<b>H<sub>s</sub></b>	Entalpia de los componentes de salida en Kcal (kilocalorías)
<b>H<sub>f</sub></b>	Entalpia de formación de los compuestos Kcal/mol-kg (kilocalorías sobre mol kilogramo)
<b>Z<sub>i</sub></b>	Porcentaje molar de los componentes del gas de salida.
<b>E<sub>f</sub></b>	Eficiencia del gasificador

## **I. CAPITULO 1.**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Prácticamente todas las actividades cotidianas e industriales que se desarrollan en nuestra sociedad tecnológica utilizan fuentes de energía provenientes del petróleo es decir fuentes no renovables, el origen de esa energía es la fusión nuclear del uranio, derivados del petróleo como gasolina, diésel, gas licuado del petróleo, etc.; las cuales en su mayoría precisan ser transformadas antes que ser consumidas. Debido a que su ciclo cronológico de formación es tan largo para su restauración, éstas fuentes de energía no son consideradas como renovables.

La concentración de gases de efecto invernadero que producen el calentamiento del planeta en estos últimos 50 años está creciendo rápidamente como consecuencia de la acción humana debido al uso generalizado de los combustibles fósiles, y la destrucción de la áreas forestales están favoreciendo al debilitamiento de la capa de ozono y el aumento de la temperatura de la tierra, provocando cambios drásticos en el clima global y haciéndolo cada vez más impredecible.

Ante esta perspectiva, muchos Naciones en el año de 1997 resolvieron en firmar el Protocolo de Kioto, convocado por la Organización de las Naciones Unidas, en la comisión de cambios climáticos. Que consiste en reducir las emisiones que contribuyen al efecto invernadero, entre el 5 y el 8 % dentro de un periodo que va desde 2008 a 2012, por medio de la búsqueda de obtención de energías que no causen impacto en el medio ambiente.

Teniendo en cuenta estas observaciones, se ha decidido trabajar con una nueva fuente de energía, el cual va a utilizar los desechos sólidos agrícolas presente en nuestro medio, mediante un proceso de gasificación de biomasa que va a transformar los desechos agrícolas en un gas con un moderado poder calorífico, para obtener una energía más limpia y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

## **1.2. ANTECEDENTES**

La gasificación es una vieja tecnología con grandes perspectivas de futuro. Efectivamente, la gasificación de carbón, sólidos carbonos y materiales líquidos, se ha estado utilizando hace más de 200 años y fue extensivamente utilizada para la obtención de gas de ciudad de finales del siglo XIX y durante el siglo XX. Aunque estas aplicaciones prácticamente han desaparecido, han ido apareciendo otras nuevas, de forma que la gasificación sigue jugando un papel importante como tecnología comercial. Desde sus orígenes se han introducido sustanciales mejoras, convirtiéndola en una tecnología económicamente más competitiva, técnicamente más eficiente y más respetuosa con el medio ambiente. (Castells & Velo, La Gasificación, 2012)

Los primeros gasificadores de carbón fueron construidos en Alemania por Bischof, 1839, y por Siemens, 1861. Los gasificadores de Siemens se utilizaban principalmente para proporcionar combustibles a hornos para la industria metalúrgica y siderúrgica pesada. A principios del siglo XX, la tecnología de los gasificadores habría avanzado hasta el punto que podían gasificarse cualquier tipo de residuo lignocelulósico, como pepitas de aceitunas, pajas y cascara de nueces. Estos primeros gasificadores se utilizaron principalmente para proporcionar combustibles a motores de combustión interna fijos para molienda y otros usos agrícolas. También a principios del siglo XX se desarrollaron los gasificadores portátiles, se usaban en los barcos, automóviles, camiones y tractores. El verdadero impulso para el desarrollo de la tecnología de los gasificadores fue la escasez de gasolina durante la segunda guerra mundial, Después de la segunda guerra mundial, la abundancia de gasolina y de gasóleo relativamente baratos, condeno al olvido la tecnología de los gasificadores para su uso en automoción. (Castells & Velo, La Gasificación, 2012)

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el Ecuador se puede encontrar una gran diversidad de clases de maíz, adaptadas a diferentes altitudes, tipos de suelos y ecosistemas que se da en el país. El área cultivable de maíz en la región costa es de 347,324 HAS, y la superficie de cultivo de maíz de la provincia de los Ríos es de 146,647 HAS, en el año 2012 (datos otorgados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca), por lo tanto en la cosecha de invierno del 2012 se produjo en la provincia de los Ríos 490,587.33 Ton de maíz.

El maíz es un producto alimenticio de gran demanda, sus usos son innumerables, tanto se lo puede utilizar como alimento, usos culturales y como un biomaterial. En nuestro país su principal uso es como alimento humano, ya sea doméstico o industrial, alimento para animales y fermentado para varios productos industriales.

Si bien la producción del grano es la razón principal del cultivo del maíz, y todas las partes de la planta, hojas, tallo, panojas (envoltura de la mazorca), y olotes (tusa de maíz) no son utilizadas para diversos fines, sino que son botadas, utilizadas como abono o incineradas en el medio y desprendiendo gases de efecto invernadero a la atmosfera.

Los centros de acopio del grano de maíz ubicados en el cantón Quevedo compran el maíz a los agricultores con una humedad promedio del 30% al 32%; el maíz con este porcentaje de humedad no puede ser comercializado a las industrias alimenticias, por lo que se opta a secar el grano de maíz hasta llevarlo al porcentaje de humedad ideal para la comercialización que es del 13 % de humedad; para secar el grano se utiliza como fuente de combustible gas licuado de petróleo (GLP), que compran a su distribuidor de confianza, comprando únicamente el grano de maíz y haciendo que los agricultores desechen las panojas y olotes al medio ambiente, en donde se descomponen por acción del sol y el agua o son quemadas; en vez de aprovechar el poder calorífico de estos recursos biomasicos como fuente de energía y reducir gastos innecesarios en la compra de combustibles.

## **Diagnóstico.**

Realizando una pequeña investigación en los centros de acopio de almacenamiento y secado del grano de maíz del cantón Quevedo, se pudo conocer la forma de abastecimiento del GLP, el valor económico, la disponibilidad y el tiempo en que se realiza una nueva compra.

La compra del GLP se efectúa mediante vía telefónica a la compañía Congas C.A. que distribuye el gas en la provincia de los Ríos, el cual está disponible cada 48 horas una vez realizado el pedido, el abastecimiento del GLP se lo hace mediante el transporte de auto tanques (carros cisternas) que despachan el GLP al granel; la compra del GLP se realiza una vez al mes, debido a que el consumo de GLP para el secado de productos agrícolas es de 1,488 Kg/mes aproximadamente y los tanques de almacenamiento de ellos tienen una capacidad de 2000 Kg.

El valor económico del GLP para usos de secado de grano se encuentra a \$ 5.01 por cada 15 Kg de GLP (dato otorgado por la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero), lo que genera a los centros de acopio de almacenamiento y secado del maíz un gasto de \$ 668 al mes por llenar al máximo de su capacidad sus tanques de almacenamiento de GLP, cuya acción genera dudas por que todos los meses hay sobrantes y no se hacen regular los días despacho del GLP, pudiéndose producir un error en el abastecimiento del GLP.

## **Pronóstico del problema.**

El tiempo que se debe esperar una vez realizado el pedido es de dos días, siempre y cuando no ocurran problemas en los carros cisternas de las empresas distribuidoras alargando el tiempo de espera, tiempo en el cual podría acabarse y provocando el paro de las acciones diarias.

## **Control de pronóstico.**

Actualmente se han buscado nuevas alternativas de combustible para el uso de secadores, lo que permite establecer que los centros de acopio de almacenamiento y secado del grano de maíz no solo compren un combustible para desempeño diario si

no que sean capaces de generar su propio combustible a través de nuevas fuentes biomásicas que se encuentren a su disposición.

#### **1.4. Formulación del problema.**

Lo expuesto nos permite plantear la siguiente interrogante:

¿Cómo un gasificador para los residuos del maíz puede ayudar a los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz, en la sustitución del gas licuado del petróleo por una nueva fuente de combustible?

#### **1.5. Sistematización del problema.**

De acuerdo al problema planteado se desprende las siguientes sub preguntas:

¿Qué importancia tiene el diseño de un gasificador de desecho de maíz en el desarrollo productivo de los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz?

¿Cómo reducirá el gasto en la compra de GLP a los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz, con la construcción de un gasificador de desechos de maíz?

¿Qué características físicas y químicas nos brinda los desechos del maíz para la generación de gas pobre?

¿Cómo ayudaría un manual de operaciones al correcto manejo del gasificador de desechos del maíz?

## **1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO**

La biomasa como fuente de combustible alternativo tiene un gran interés ambiental, debido a sus múltiples ventajas que presentan como la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y no emiten contaminantes sulfurados o nitrogenados. Debido a eso la biomasa está conformado de recursos renovables, es decir, que al ser utilizados; pueden regenerarse naturalmente o artificialmente como los alimentos y el agua. Son recursos que al estar sometidos a ciclos se mantienen constante en la naturaleza.

La gasificación es la única tecnología de conversión energética que ofrece simultáneamente flexibilidad y ventajas tanto en la alimentación, como en la tipología del producto. Todas las materias primas conteniendo carbono, incluyendo residuos peligrosos, residuos sólidos urbanos, fangos de depuradora, biomasa, etc., pueden ser gasificadas tras su preparación para producir gas de síntesis limpio para su posterior procesado.

El presente trabajo tiene gran importancia, en la región costa porque diferentes centros de acopio que se encargan de almacenar y secar el grano de maíz para su posterior comercialización a las industrias alimenticias, gastan gran cantidad de dinero en la compra de GLP (gas licuado de petróleo) como fuente de combustible para la utilización de sus diferente equipos de secado y demás operaciones de la empresa.

Mientras que por otra parte los desechos del maíz son quemados, botados o recirculados a las tierras como abono y menospreciando sus demás utilidades que se le pueden dar a estos desechos.

Este proyecto permite brindar desarrollo, crecimiento y progreso al sector industrial y comercial del cantón Quevedo, por medio de un equipo que provea energía a base del uso óptimo de biomasa.

## **1.7. DELIMITACIÓN**

### **Tema:**

“Diseño, Selección Y Construcción De Un Gasificador De Desechos Del Maíz”

### **Problema:**

¿Cómo un gasificador para los residuos del maíz puede ayudar a los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz, en la sustitución del gas licuado del petróleo por una nueva fuente de combustible?

### **Delimitación Espacial**

El problema se lo delimita a los centros de acopio que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz perteneciente a las zonas del cantón Quevedo.

### **Delimitación Temporal.**

El presente Trabajo se lo llevara a cabo desde abril del 2013 hasta septiembre del 2014.

## **1.8. OBJETIVOS**

### **1.8.1. OBJETIVO GENERAL**

- ✓ Construir y montar un gasificador de desechos de maíz con todos sus parámetros óptimos con el fin de adoptar nuevas fuentes de combustible para el secado del grano de maíz a nivel industrial.

### **1.8.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- ✓ Diseñar un gasificador de desechos del maíz que ayude al desarrollo productivo de los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz mediante mecanismos y parámetros óptimos de funcionamiento.
- ✓ Fabricar un gasificador de desechos del maíz que produzca un gas combustionable con la mejor calidad, con el fin de minimizar los gastos a los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz por la compra de GLP.
- ✓ Analizar las características físicas y químicas del olote del maíz como recurso biomásico, que nos brinda las propiedades necesaria para poder obtener un gas combustible con buen poder calorífico.
- ✓ Establecer acciones mediante un manual de operación y mantenimiento que permita cumplir un correcto desempeño del sistema de gasificación de olote del maíz.

## **1.9. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.9.1. HIPOTESIS GENERAL**

- ✓ Mediante la construcción y montaje de un gasificador de desechos del maíz adoptamos una nueva fuente de combustible que influencia positivamente al desarrollo industrial del cantón Quevedo y a los centros de acopio que se encargan del almacenamiento y secado del grano de maíz.

### **1.9.2. HIPOTESIS ESPECÍFICA**

- ✓ Con el diseño de un gasificador de desechos del maíz se ayuda al desarrollo productivo de los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz mediante mecanismos y parámetros óptimos de funcionamiento.
- ✓ La fabricación de un gasificador de desechos del maíz reduce los gastos a de los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano del maíz por la compra de GLP.
- ✓ Las características físicas y químicas que posee los desechos del maíz son óptimas para obtener un gas combustible con buen poder calorífico.
- ✓ La creación de un manual de operación permite un correcto desempeño y manejo del sistema de gasificación de desechos del maíz.

## 1.10. VARIABLES

Como variable en la investigación del proyecto tenemos:

Parámetros óptimos de funcionamiento de un gasificador.

De la cual se despliegan sus variables operativas o sub variables: Cantidad de olote de maíz a procesar.

- ✓ Propiedades físicas y químicas del olote de maíz
- ✓ Presión del gasificador a alcanzar
- ✓ Temperatura del gasificador a alcanzar.
- ✓ Flujo másico de olote de maíz procesado.

## 1.11. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

**Tabla. 1. Operacionalización de las variables**

Variable	Variables operativas	Variable Conceptual	Indicador	Escala	Unidad de medida
Parámetros óptimos de funcionamiento de un gasificador	Propiedades físicas y químicas del olate de maíz	Características que posee la biomasa para su identificación	Análisis en laboratorio	Intervalo	%, m <sup>2</sup> , Kg/m <sup>3</sup> , Kcal/Kg °C, etc.
	Presión del gasificador	Fuerza que se proyecta en dirección perpendicular en el interior del gasificador.	Manómetro	Intervalo	atm
	Temperatura del gasificador	Magnitud que se refiere a la cantidad de calor que se genera en el interior del equipo	Termopar tipo k	Intervalo	°C
	Flujo másico de olate de maíz	Cantidad de olate de maíz por hora de proceso.	Balanza	Intervalo	Kg / h

Fuente: Elaboración Propia.

## II. CAPITULO 2.

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Introducción al Maíz

El Maíz es una de las especies vegetales más productivas del mundo y unos de los cereales que el hombre ha utilizado desde las épocas remotas. Se originó en México desde donde fue difundido a todo el mundo por Cristóbal Colon en su primer viaje a fines del siglo XV. Es una planta que tiene múltiples usos y que se puede utilizar en varias etapas de su desarrollo desde las mazorcas muy jóvenes, hasta las mazorcas verdes tiernas y los granos ya maduros. (Paliwal, Granados, Lafitte, & Marathée, 2001)

El maíz perteneciente al género de las Zeas, cuyo nombre científico es *Zea mays*, es uno de los granos más antiguos que se conocen, pertenece a la familia de las Poáceas (gramíneas), tribu Maydeas, y es la única especie cultivada de este género de gran importancia económica. (Paliwal, Granados, Lafitte, & Marathée, 2001)

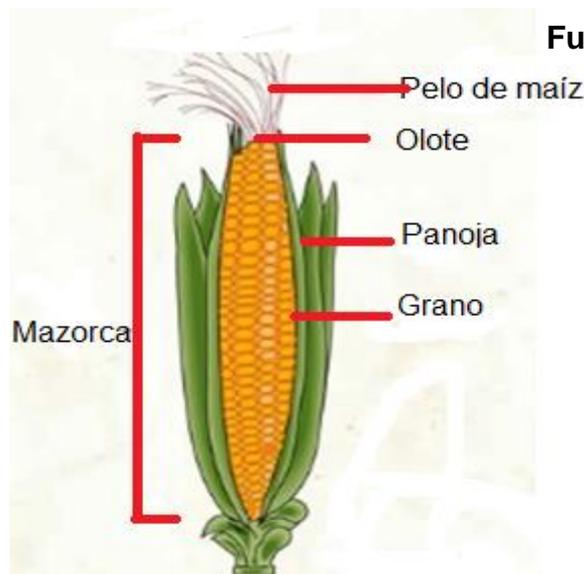
El maíz que se produce en Ecuador es del tipo cristalino de apariencia amarilla y dura, es de excelente calidad que puede ser utilizado tanto para la elaboración de alimentos balanceados como para las industrias alimenticias que brindan productos de consumo humano; gracias a su elevado contenido de fibra, carbohidratos, caroteno y el alto nivel de rendimiento en la molienda, así como por su precio. (San Camilo Comercializadora de Granos S.A. , 2010)

Además la producción se complementa, gracias al ciclo del cultivo, las condiciones geográficas y climáticas de las zonas maiceras ecuatorianas. La temporada de cosecha más alta se da en ciclo de invierno (Abril - Julio). De la producción nacional de maíz, la avicultura consume el 57%, alimentos balanceados para otros animales 6%, industrias de consumo humano 4%, el resto sirve para el autoconsumo y semilla. (San Camilo Comercializadora de Granos S.A. , 2010)

### 2.1.1. Partes de la Mazorca de Maíz.

Las partes que componen a la mazorca del maíz son:

- ✓ **Pelo de maíz.**- Conjunto de pelos situado en la punta del maíz.
- ✓ **Grano.**- Parte comestible del maíz.
- ✓ **Panoja.**- Cada una de las partes del maíz que recubre la mazorca cargada de granos.
- ✓ **Olote.**- Es el residuo producido después de desgranar la mazorca. Se encuentra en una relación de 83% / 17% con respecto al grano. (Dery, 2005 - 2011)



Fuente: (Dery, 2005 - 2011)

Figura. 1. Partes de la mazorca de maíz

### 2.2. Definición de Biomasa

"Sustancia orgánica que tiene su origen en los compuestos de carbonos formados en la fotosíntesis. Estas sustancias pueden haber sufrido, previamente a su utilización, diferentes procesos naturales o artificiales, de escasa o elevada complejidad. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) utiliza la definición de las Especificaciones Técnicas Europeas CEN/TS 14588 para catalogar la “biomasa” como “todo material de origen biológico excluyendo a todos aquellos que han sido englobados de formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”.

Si bien la biomasa representa solo una pequeña parte en la masa total de la tierra, su importancia es vital, ya que es el gran reservorio de energía para que la vida se sustente en el planeta, a pesar que solo aprovecha una fracción de la energía que es entregada por el sol, y fijada por los organismos foto sintetizadores. La alteración de dicho ciclo influye directamente en la existencia de la vida sobre la tierra, ya que permite el suministro de oxígeno a la atmosfera y a todos los organismos que requieren de el para su existencia. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### **2.2.1. Composición de la Biomasa**

La biomasa posee una composición típica desde el punto de vista cualitativo, pero no cuantitativo, ya que la proporción de sus componentes varía dependiendo de los múltiples orígenes, así como de cada especie vegetal o animal y de los procesos mediante los cuales ha sido generado. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)

La biomasa vegetal está compuesta principalmente de hidratos de carbono, en forma de compuestos lignocelulósico y amiláceos, y en menor proporción prótidos, lípidos y compuestos orgánicos nitrogenados. Su composición varia debido a que las estructuras que forman la biomasa no son homogéneas en todos los órganos y por lo tanto dependen de la proporción de ellos en cada especie definiendo composiciones diferentes en cada caso. Por ejemplo, las semillas de leguminosas son muy ricas en proteínas, o las semillas de oleaginosas poseen una gran cantidad de lípidos, por lo que no es posible facilitar un valor exacto de su composición. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)

Desde el punto de vista energético aquella biomasa de estructura más sólida (madera) permite aplicaciones termoquímicas, y las de estructura poco sólida (como los cultivos agrícolas anuales) mayor variedad de aplicaciones, como la hidrólisis. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)

### **2.2.2. Características de la Biomasa**

Las fuentes de biomasa son tan diversas como lo pueden ser el serrín de aserradero, las ramillas obtenidas de una poda de pino, la mazorca de maíz, el hueso de melocotón obtenido en una industria conservera o la masa granulada que queda tras el prensado de la oliva y la extracción química del resto del aceite (orujillo). Frente a tal heterogeneidad, la caracterización de la biomasa sirve para obtener una previsión del comportamiento de la biomasa ante las diferentes etapas involucradas en su uso como fuente de energía: obtención, transporte, tratamiento y conversión de energía. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

Las propiedades pueden dividirse en propiedades físicas, químicas y térmicas. La biomasa sólida en su estado original presenta unas características determinada de formas, densidad, humedad, contenido energético, etc., que pueden ser incompatibles con el modo de alimentación y con los propios procesos de conversión de energía. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

**Tabla. 2. Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa.**

<b>Parámetros Físicos</b>	Densidad real y aparente Humedad Distribución granulométrica	Influyen en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pre tratamiento.
<b>Parámetros Químicos</b>	Análisis elemental Análisis inmediato Componentes estructurales Composición de cenizas Fusibilidad de cenizas	Determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica.
<b>Parámetros Energéticos</b>	Poder calorífico	Determina la calidad de energía aprovechable.

**Fuente:** Energía de la Biomasa.

**Autor:** (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### **2.2.2.1. Principales propiedades físicas**

Se trata de la densidad, la humedad y la distribución granulométrica. No se trata de propiedades inherentes a la materia, sino más bien al formato como se presenta. Así por ejemplo los residuos forestales frescos, tras su poda, presentan una baja densidad aparente por la forma en que se amontonan las ramas, su tamaño puede ser desde varios metros hasta varios centímetros dependiendo si se tratan de ramas largas o ramillas, y su humedad puede ser bastante elevada (superior al 40%). Sin embargo, en la alimentación del sistema de combustión, se suelen utilizar como astillas o en formas de pélets (pastillas de serrín y astillas molidas y densificadas). Resulta de interés conocerlas, principalmente por su importante papel en la recolección, transporte y tratamiento. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

#### Densidad real o aparente.

Según Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau “La densidad real es aquella propia de la materia, mientras que la densidad aparente tiene que con el modo como

cada tipo de biocombustible sólido tiende a llenar un volumen.” De otra manera, la densidad aparente, como indica su fórmula, es la cantidad de peso de biocombustible sólido que se puede acumular en un volumen dado. La densidad real de la madera, por ejemplo, es mucho mayor que la densidad aparente de sus ramas rellenas la caja del camión que la transporta, ya que entre las ramas hay multitud de huecos que ocupa el aire.

$$\rho_{\text{aparente}} \approx \frac{\text{masa de materia}}{(\text{Volumen de materia} + \text{volumen de aire en huecos})} \quad (\text{ec. \#1})$$

$$\rho_{\text{Real}} \approx \frac{\text{masa de materia}}{\text{Volumen de materia}} \quad (\text{ec. \#2})$$

La densidad aparente de un material varía, fundamentalmente, con el grado de compactación que haya sufrido (que disminuye sustancialmente el volumen de agua en los huecos), con su compresibilidad, así como el contenido de humedad que presenta. De cara a la realización del transporte interesa que la biomasa se represente en un formato con una densidad aparente lo más alta posible. Así son preferibles los residuos forestales atados en pacas o astillados, que en ramas sueltas. También junto con el poder calorífico, determinan la densidad energética. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### Humedad

“La humedad se define básicamente como la cantidad total de agua contenida en el total de masa de una muestra de biomasa.” (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010). La humedad puede existir en la superficie exterior de la biomasa o estar embebida en su interior. La humedad superficial es el agua presente en la superficie de la biomasa y se elimina fácilmente por secado al aire.

“La humedad inherente se define como el porcentaje de pérdida de peso que experimenta una muestra de biomasa secada al aire cuando se calienta a 105 °C

hasta que alcanza peso constante.” (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010).

El modo como aparece la humedad, y la porosidad del material, repercute en la velocidad de pérdida de humedad. Interesa utilizar biomasa seca, dado que el coste de su transporte es menor (se transporta menos peso inútil), su molienda es más sencilla (es menos flexible y se parte mejor) y dado que el agua incorporada a un sistema de aprovechamiento disminuye la energía disponible, ya que el agua absorbe energía (de la combustión) y se evapora, sin presentar ningún beneficio.

**Tabla. 3. Intervalos del contenido de humedad de algunos tipos de biomasa sólida.**

Tipo de Biomasa	Contenido de Humedad
	% en peso
Cortezas	25 – 75
Madera residual gruesa	30 – 60
Virutas	16 – 40
Serrín	25 – 40
Polvo de lijadora	2 – 8
Pasto empacado	10 – 15

**Fuente:** Energía de la Biomasa.

**Autor:** (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### Distribución granulométrica.

De manera general, hace referencia al formato como se presenta la biomasa: fardos, ramas, troncos, polvos, etc. Los estudios de granulometría propiamente entendidos, tienen especial sentido cuando se trabaja con biomasa triturada, astillada o molida. Al

transformar ramas, obtenidas en una poda, en astillas no todas las partículas tendrán las mismas dimensiones. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

La caracterización de la granulometría se realiza por cribado sucesivo de la biomasa, y los resultados pueden presentarse como variables estadísticas (tamaño promedio y dispersión), como porcentajes en masa de cada uno de los intervalos de cribado o como frecuencia acumulada. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### **2.2.2.2. Principales propiedades químicas.**

Las propiedades químicas pueden referirse a la composición de los elementos que constituyen la biomasa (principalmente, carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y azufre) y componentes moleculares principales (lignina, celulosa y hemicelulosa). El contenido de cenizas (elementos inorgánicos) y su comportamiento también suelen ser de interés. Por otra parte, el análisis más sencillo de la biomasa como combustible consiste en determinar su análisis inmediato. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

#### Análisis elemental

El análisis elemental permite establecer el porcentaje en peso de los principales elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y azufre (S). Se utiliza para combustibles sólidos y líquidos. A partir de conocimientos de dichos constituyentes se pueden establecer las reacciones de oxidación, de manera que, por ejemplo, se determina el aire preciso para la combustión (aire estequiométrico). (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

También existen formulaciones empíricas, que, partiendo del porcentaje en peso de cada elemento, permite obtener una aproximación de su contenido energético (poder calorífico). Finalmente, los recursos biomásicos, comparados con los combustibles fósiles sólidos como los carbones bituminosos (hulla), se caracterizan en términos

generales por presentar un bajo contenido en carbono (-50%) y un alto contenido en oxígeno (mayor al 40%). (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### Análisis inmediato.

El análisis inmediato proporciona los contenidos de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo de la biomasa, expresados como porcentaje en peso. Básicamente este análisis sirve para identificar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbono fijo) y la fracción inerte (humedad y ceniza). (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

Este análisis permite estimar de manera sencilla el comportamiento, a priori, de un combustible y se suele utilizar las siguientes anotaciones: humedad (W), volátiles (V), Carbono fijo (Cf o char) y cenizas (Z).

La materia volátil es la porción de combustible que se libera en forma de gases y vapores (hidrocarburos) a descomponerse térmicamente la materia que configura la biomasa. La celulosa, por ejemplo, ante altas temperaturas, se descompone formando cadenas de hidrocarburos ligeros que escapan de la biomasa. Si existe oxígeno en el exterior y alta temperatura, los volátiles se oxidan, produciendo una llama. En comparación con el carbón, la biomasa sólida tiene un alto contenido de volátiles (entre 60 – 80 %) que pueden suponer más de dos terceras partes del poder como combustibles. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

El carbono fijo y las cenizas son fracciones que restan una vez que se ha desprendido la materia volátil. El carbono fijo, en proceso de combustión, sigue quemando lentamente, después que se desprendan los volátiles. Las brasas que quedan en una hoguera cuando se extinguen las llamas, son el carbono fijo, que continúa quemándose. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

Las cenizas son los residuos inorgánicos que quedan después de la combustión del carbono fijo, y varían en su composición y porcentajes de participación según la fuente de biomasa y los métodos de recolección utilizados. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

## Componentes estructurales

Los biocombustibles sólidos tienen un origen vegetal y presentan estructuras tan diferentes como pueden tener las hojas, las ramas, el tronco de un árbol, las raíces, los tubérculos, los frutos, las semillas o la paja del cereal. Es obvio que las estructuras moleculares de todas ellas son diferentes. Por lo general, la biomasa sólida está principalmente constituida por hidratos de carbono. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### **2.2.2.3. Poder Calorífico**

“El poder calorífico es la energía química del combustible que puede ser transformada directamente en energía mediante un proceso termoquímico de oxidación (combustión).” (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010). Esta propiedad suele expresarse en unidades de energía por unidades de masa (generalmente, KJ/Kg, MJ/Kg o Kcal/Kg). Su valor se determina experimentalmente mediante un equipo denominado bomba calorimétrica.

**Tabla. 4. Poderes caloríficos de diversos combustibles**

<b>Combustible</b>	<b>PCS (Kcal/Kg)</b>	<b>PCI (Kcal/Kg)</b>
Biomasa de cardo seca	3.899	3.608
Biomasa de chopo seca	4.704	4.392
Madera de pino 15% húmeda	4.800 – 5.000	4.500 – 4.700
Carbón vegetal	7.500 – 8.300	7.200 – 8.000
Astilla de eucalipto	4.800	4.500
Madera de fresno y encina	4.700	4.300
Fuel – oíl	10.150	9.450
Gasolina	11.200	10.500
Etanol de 96% (4% agua en vol.)	6.740	6.420
Metanol	12.738	11.950
Propano	12.900	11.080
Butano (gas)	11.800	10.932

**Fuente:** Energía de la Biomasa

**Autor:** (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

Existen dos formas de expresar el poder calorífico de un combustible. En la combustión se forma vapor de agua a partir del hidrógeno que contiene el combustible. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

Si el estado final del agua generada en la combustión es en fase vapor (lo más frecuente en la mayoría de las instalaciones de combustión), se denomina poder calorífico inferior (PCI). (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

Si por el contrario el estado final del agua producida es líquido, recuperando su energía de vaporización (calderas con condensación), se habla de poder calorífico superior (PCS). Pueden expresarse por unidad de combustible húmedo (a una determinada humedad) o combustible seco (humedad cero). (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### **2.2.3. Ventajas y Desventajas del uso de biomasa**

#### Ventajas de la utilización de la biomasa.

Entre las ventajas que nos brindan la biomasa como fuente de energía tenemos:

- ✓ La biomasa no contribuye al calentamiento global por ser una fuente renovable de energía. Por lo que ayuda a reducir los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera, al actuar como recipiente y pudiendo aumentar la concentración de carbono en los suelos. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)
- ✓ La lluvia ácida es causada por la emisión de dióxido de azufre a la atmósfera debido al alto contenido de azufre en los combustibles fósiles, a diferencia de los combustibles biomásicos que tienen un contenido insignificante de azufre y por lo tanto no contribuyen a las emisiones de dióxido de azufre. La combustión de la biomasa produce generalmente, menos ceniza que la combustión de carbón, y la ceniza producida se puede utilizar como abono para el suelo. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)

- ✓ La conversión de residuo agrícola de la silvicultura, y la basura sólida municipal para la producción energética es un uso eficaz de los residuos que a su vez reduce significativamente el problema de la disposición de los residuos, particularmente en áreas municipales. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)
- ✓ La biomasa es un recurso doméstico que no está afectado por fluctuaciones de precio de alcance mundial o por las incertidumbres producidas por las fuentes de combustibles importados. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)

#### Inconvenientes de la utilización de la biomasa.

De la misma manera veremos algunas restricciones en el uso de la biomasa:

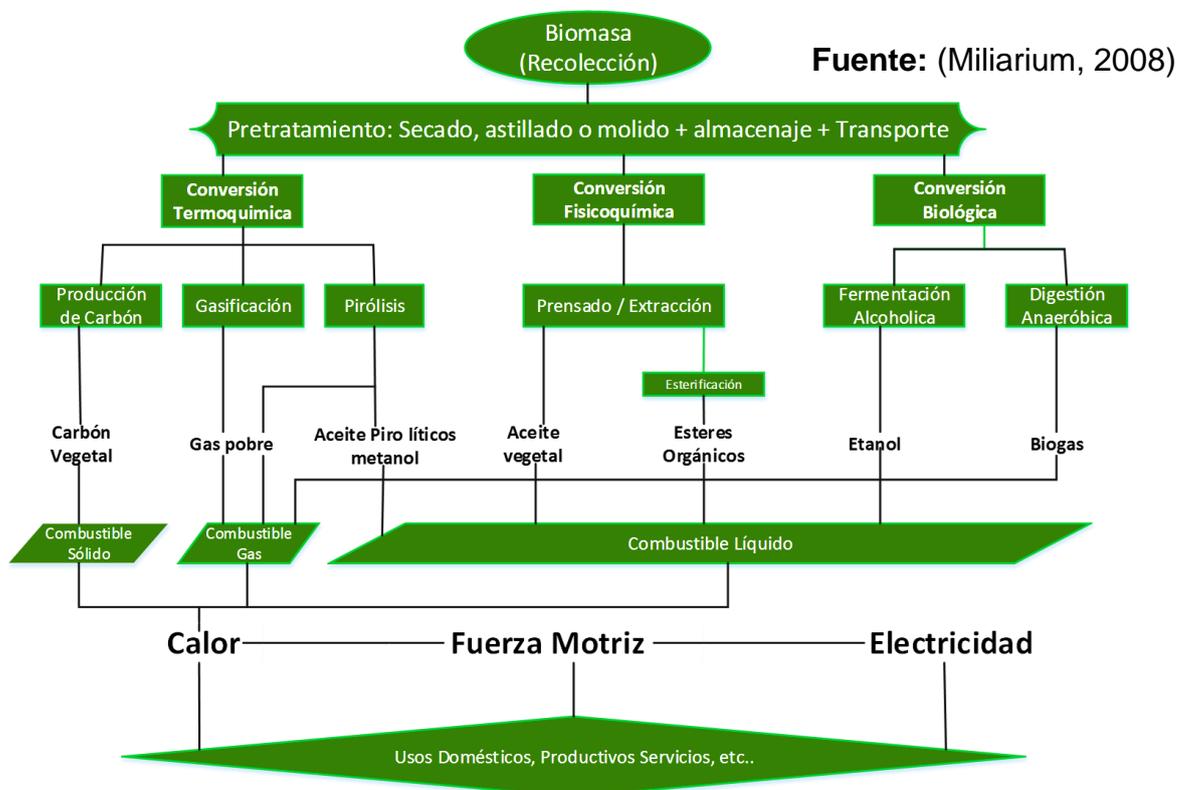
- ✓ Por su naturaleza la biomasa tiene baja densidad de energía y su transporte aumenta los costos y reduce la producción de energía neta. Son necesariamente volúmenes grandes en relación a los combustibles fósiles, haciendo del transporte y administración difíciles y costosos. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)
- ✓ La combustión incompleta de la leña produce partículas de materia orgánica como el monóxido de carbono y otros gases orgánicos. En escala doméstica el impacto a la salud se daría por la contaminación atmosférica de estos gases. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)
- ✓ La producción y el proceso de la biomasa pueden implicar un consumo de energía significativo, tales como los combustibles para los vehículos y los fertilizantes agrícolas, dando como resultado un balance energético reducido para el uso de la biomasa. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)
- ✓ A menudo existen restricciones políticas e institucionales al uso de biomasa, tales como políticas energéticas, impuestos y subsidios que animan al uso de combustibles fósiles. (Castells X. E., Biomasa y Bioenergía, 2012)

### 2.3. Convirtiendo Biomasa en Energía

Para el uso de fines energéticos la biomasa tiene que ser transformada a una forma que sea conveniente tanto para su transportación, como para su utilización. Por lo regular la biomasa es transformada en formas como briquetas, carbón vegetal, o en gas y alcohol. Las tecnologías de transformación de biomasa van desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la dendro-energía y la cogeneración. (Miliarium, 2008)

Los procesos de transformación de biomasa de mayor énfasis se presentan a continuación, los cuales se pueden clasificar en tres categorías:

- ✓ Procesos de combustión directa.
- ✓ Procesos termoquímicos.
- ✓ Procesos bioquímicos.



**Figura. 2. Transformaciones y aplicaciones energéticas de biomasa**

### **2.3.1. Procesos de combustión directa**

Esta es la forma más antigua y más común, hasta hoy, para extraer la energía de la biomasa. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado. (Miliarium, 2008)

Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas. Estos resultados se podrían disminuir considerablemente con prácticas mejoradas de operación y un diseño adecuado del equipo. (Miliarium, 2008)

Por ejemplo, secar la biomasa antes de utilizarla reduce la cantidad de energía perdida por la evaporación del agua y para procesos industriales, usar pequeños pedazos de leña y atender continuamente el fuego supliendo pequeñas cantidades resulta en una combustión más completa y, en consecuencia, en mayor eficiencia. Asimismo, equipos como los hornos se pueden mejorar con la regulación de la entrada del aire para lograr una combustión más completa y con aislamiento para minimizar las pérdidas de calor. (Miliarium, 2008)

#### **2.3.1.1. Densificación**

Esta se refiere al proceso de compactar la biomasa en “briquetas”, para facilitar su utilización, almacenamiento y transporte. Las briquetas son para usos domésticos, comerciales e industriales. La materia prima puede ser aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal, el cual se compacta bajo presión alta. (Miliarium, 2008)

Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte. (Miliarium, 2008)

Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso, o combustible líquido. (Miliarium, 2008)

### **2.3.1.2. Pirolisis**

“Se puede definir Pirólisis como la descomposición de la materia orgánica por medio de la aportación de energía en forma de calor en una atmosfera inerte o en el vacío. Esta reacción lleva a la producción de un residuo carbonoso, gases condensables y productos gaseosos”. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010).

En función del modo como se realice la Pirólisis y del tipo concreto de biocombustible, las fracciones del producto obtenido son diferentes. Las principales variables a considerar son: velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, temperatura y presión. En particular la velocidad de calentamiento, tiene una influencia tal que según el valor que tenga se pueden clasificar la Pirólisis en varios tipos, desde la denominada Pirólisis convencional (baja velocidad de calentamiento) a la rápida o la flash, con alta velocidad de calentamiento. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

Desde el punto de vista del objetivo a conseguir, la Pirólisis busca la obtención de las fracciones sólidas, líquidas o gaseosas a partir de la biomasa, con el fin de utilizarlas en la generación termoeléctrica, o bien aprovechar su alto valor añadido en el mercado. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### **2.3.2. Procesos termoquímicos**

“La conversión de los biocombustibles sólidos en energía térmica se realiza principalmente por procesos termoquímicos. Se define termoquímica como la disciplina que dentro de la fisicoquímica estudia los cambios de calor en procesos de cambios químicos.” (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010).

Dentro del campo de las energías de biocombustibles, suele hacerse referencia con el termino proceso termoquímico a aquellos procesos que involucran las transformaciones de materia y las conversiones entre materia y energía, que van a permitir un aprovechamiento energético del combustible. Se habla generalmente de Pirólisis, gasificación y combustión. Son procesos pues de la misma naturaleza, e íntimamente relacionados. La principal diferencia consiste en la atmosfera en la que se realizan. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

La Pirólisis, la gasificación y la combustión de los biocombustibles sólidos son, por tanto, procesos de interacción entre dos reactivos, uno sólido y otro gaseoso. Es por ello que a estas reacciones se las denomina reacciones sólido – gas, y los reactores en que se llevan a cabo reactores sólidos – gas. Así, la combustión de madera en una hoguera es una reacción entre un sólido (la madera) y un gas (el aire, el concreto, el oxígeno). (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### **2.3.2.1. Gasificación**

Tipo de Pirólisis en la que se utiliza una mayor proporción de oxígeno a mayores temperaturas, con el objetivo de optimizar la producción del llamado “gas pobre”, constituido por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, con proporciones menores de dióxido de carbono y nitrógeno. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

Este se puede utilizar para generar calor y electricidad, y se puede aplicar en equipos convencionales, como los motores de diésel. La composición y el valor calorífico del gas dependen de la biomasa utilizada, como por ejemplo: madera, cascarilla de arroz, o cáscara de coco. Existen diferentes tecnologías de gasificación y su aplicación depende de la materia prima y de la escala del sistema. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

La gasificación tiene ciertas ventajas con respecto a la biomasa original:

- I. El gas producido es más versátil y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural;

- II. Puede quemarse para producir calor y vapor; puede alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad;
- III. Produce un combustible relativamente libre de impurezas y causa menores problemas de contaminación al quemarse.

Sin embargo, la operación de gasificación es más complicada. En principio, un gasificador simple puede ser construido en talleres metalmecánicos convencionales, pero se requiere experiencia y un prolongado período de ajuste para llevar el sistema a sus condiciones óptimas de operación. (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

### **2.3.3. Procesos Bioquímicos**

Estos procesos utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termo-químicos. (Miliarium, 2008).

Realizaremos un breve repaso sobre los principales procesos bioquímicos:

#### **2.3.3.1. Digestión anaeróbica**

La digestión de biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico) produce un gas combustible llamado biogás. En el proceso, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales) en un contenedor cerrado (el digestor) y allí se deja fermentar; después de uno días, dependiendo de la temperatura del ambiente, se habrá producido un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La materia remanente dentro del digestor es un buen fertilizante orgánico. Los digestores han sido promovidos fuertemente en China e India para usos domésticos en sustitución de la leña. También se pueden utilizar aguas negras y mieles como materia prima, lo cual sirve, además, para tratar el agua. (Miliarium, 2008)

### **2.3.3.2. Combustibles alcohólicos**

De la biomasa se pueden producir combustibles líquidos como etanol y metanol. El primero se produce por medio de la fermentación de azúcares y, el segundo por la destilación destructiva de madera. Esta tecnología se ha utilizado durante siglos para la producción de licores y, más recientemente, para generar sustitutos de combustibles fósiles para transporte, particularmente en Brasil. Estos combustibles se pueden utilizar en forma pura o mezclados con otros, para transporte o para la propulsión de máquinas. (Miliarium, 2008)

### **2.3.3.3. Biodiesel**

A diferencia del etanol, que es un alcohol, el biodiesel se compone de ácidos grasos y ésteres alcalinos, obtenidos de aceites vegetales, grasa animal y grasas recicladas. A partir de un proceso llamado “trans esterificación”, los aceites derivados orgánicamente se combinan con alcohol (etanol o metanol) y se alteran químicamente para formar ésteres grasos como el etil o metilo éster. (Miliarium, 2008)

Estos pueden ser mezclados con diésel o usados directamente como combustibles en motores comunes. El biodiesel es utilizado, típicamente, como aditivo del diésel en proporción del 20%, aunque otras cantidades también sirven, dependiendo del costo del combustible base y de los beneficios esperados. Su gran ventaja es reducir considerablemente las emisiones, el humo negro y el olor. (Miliarium, 2008)

### **2.3.3.4. Gas de rellenos sanitarios**

Se puede producir un gas combustible de la fermentación de los desechos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios. Este es una mezcla de metano y dióxido de carbono. (Miliarium, 2008)

La fermentación de los desechos y la producción de gas es un proceso natural y común en los rellenos sanitarios; sin embargo, generalmente este gas no es aprovechado. Además de producir energía, su exploración y utilización reduce la

contaminación y el riesgo de explosiones en estos lugares y disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero. (Miliarium, 2008)

## **2.4. Gasificador de Biomasa**

“La gasificación es un proceso termoquímico en el que la materia carbonada es transformada en un gas combustible con poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren promovidas por altas temperaturas en presencia de un agente gasificante.” (Sebastián Nogues, García Galindo , & Rezeau , 2010)

“La gasificación es un proceso en el que se convierte, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, una materia prima (generalmente sólida), en un gas con un moderado poder calorífico.” (Castells & Velo, La Gasificación, 2012).

Normalmente se trabaja con un 25 – 30% del oxígeno necesario para la oxidación completa. Esta característica distingue a la gasificación de otros procesos termoquímicos como la combustión (oxidación completa, generalmente con exceso de oxígeno) y la Pirólisis (descomposición térmica en ausencia de oxígeno). (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Algunas de las biomazas, normalmente residuales, que pueden usarse en los procesos de gasificación, son:

- ✓ Residuos agrícolas: paja de cereal, poda de frutales, cáscara de frutos secos, etc. Residuos forestales: corta, entresaca, poda, otros tratamientos silvícolas, monte bajo, etc.
- ✓ Residuos ganaderos: purines, cama, estiércoles, gallinaza,
- ✓ Residuos industriales: orujos, ramas y hojas, serrín, cortezas de aserraderos, rechazos orgánicos de proceso, harinas cárnicas, desperdicios de papel, algunos residuos plásticos, embalajes, etc.
- ✓ Residuos urbanos: fracción orgánica de los residuales sólidos urbanos, lodos de depuradoras de aguas residuales, neumáticos fuera de uso, residuo orgánico de las fragmentaciones.
- ✓ Mezclas de biomazas/ residuos, adecuadas.

Tras el calentamiento inicial que promueve el craqueo de los componentes de la biomasa (Pirólisis), las fracciones orgánicas ligeras se escapan de la materia sólida y se recombinan, gracias a las altas temperaturas locales, con el agente gasificante, es decir, con los gases reactivos introducidos en la zona donde se prevé que tengan lugar las reacciones de gasificación. Existe una gran variedad de agentes gasificantes como por ejemplo: hidrógeno, vapor de agua, oxígeno o aire. Los gases producidos con cada uno de ellos difieren, evidentemente, en su composición final y en sus propiedades como combustible. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

La gasificación con aire produce un gas pobre con un poder calorífico superior entre 4 y 7 MJ/Nm<sup>3</sup> (950 a 1600 Kcal/Nm<sup>3</sup>) susceptible de ser quemado en un generador de vapor, en un motor de combustión interna o en una turbina. En general no resulta económico su transporte para su uso lejos del gasificador, como por ejemplo, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrógeno. Esta mezcla de gases llamada gas de síntesis o “syngas”, tiene un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural, cuando se emplea aire como agente gasificante. La gasificación con oxígeno produce un gas de mejor calidad, con un poder calorífico superior entre 10 a 18 MJ/Nm<sup>3</sup> (2400 a 4300 Kcal/Nm<sup>3</sup>). En este caso se podría pensar en un transporte limitado incluso en su utilización como materia prima en la síntesis de compuestos orgánicos como, por ejemplo, metanol y gasolina. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

#### **2.4.1. Influencia de la composición del sólido en el proceso.**

La composición química del sólido a gasificar tiene una gran influencia en la marcha del proceso. No obstante esta composición es muy compleja y prácticamente imposible de determinar. La madera, por ejemplo, está compuesta principalmente por celulosa (30 a 40%), hemicelulosa (24 a 35%) y lignina (15 a 30%), cuyas proporciones dependen de la especie vegetal. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Una forma clásica de caracterizar este tipo de sólidos es a partir del análisis inmediato (humedad, carbono fijo, volátiles y cenizas) y del análisis elemental (C, O, N, H, S). (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

El análisis elemental de la biomasa depende básicamente de la especie vegetal presente en la vegetación, en caso de la biomasa animal, y de las impurezas que la acompañan (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

#### **2.4.2. Termoquímica de los procesos de gasificación**

En el proceso de gasificación tienen lugar una gran variedad de reacciones cuyo orden de importancia relativa depende de las condiciones de operación y del agente gasificante utilizado, pero que pueden agruparse en tres bloques o etapas en los que conceptualmente puede dividirse el proceso. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

**Pirólisis o descomposición térmica:** Mediante calor, el sólido original se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas. Al sólido se le suele denominar "char" y a los líquidos, debido a la presencia mayoritaria de alquitranes y vapores condensables, "tar". Puede incluirse aquí el proceso de secado que tiene lugar al entrar la biomasa al gasificador. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

**Oxidación o combustión:** Tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante como oxígeno o aire e implica el conjunto de reacciones de oxidación, tanto homogéneas como heterogéneas, fundamentalmente exotérmicas, mediante las que se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

**Reducción o gasificación:** La constituyen las reacciones sólido-gas o en fase gas, mediante las que el sólido remanente se convierte en gas. Se trata de reacciones fundamentalmente endotérmicas, algunas de las cuales tienen lugar en muy poca extensión, o solo tienen lugar en determinadas condiciones, como ocurre con la hidrogenación y/o reformado. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Es importante constatar que la Pirólisis, aparte de ser un proceso termoquímico en sí mismo, es también la etapa inicial de la gasificación en la que se producen los residuos

característicos. El conocimiento de esta fase es, por tanto, interesante ya sea como etapa precursora de la gasificación de un material, como por la obtención de char y biocombustibles, productos por lo general de gran aplicabilidad, para la producción de carbones activados o como combustibles. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Fuente: (Huaraz Choi, 2013 )

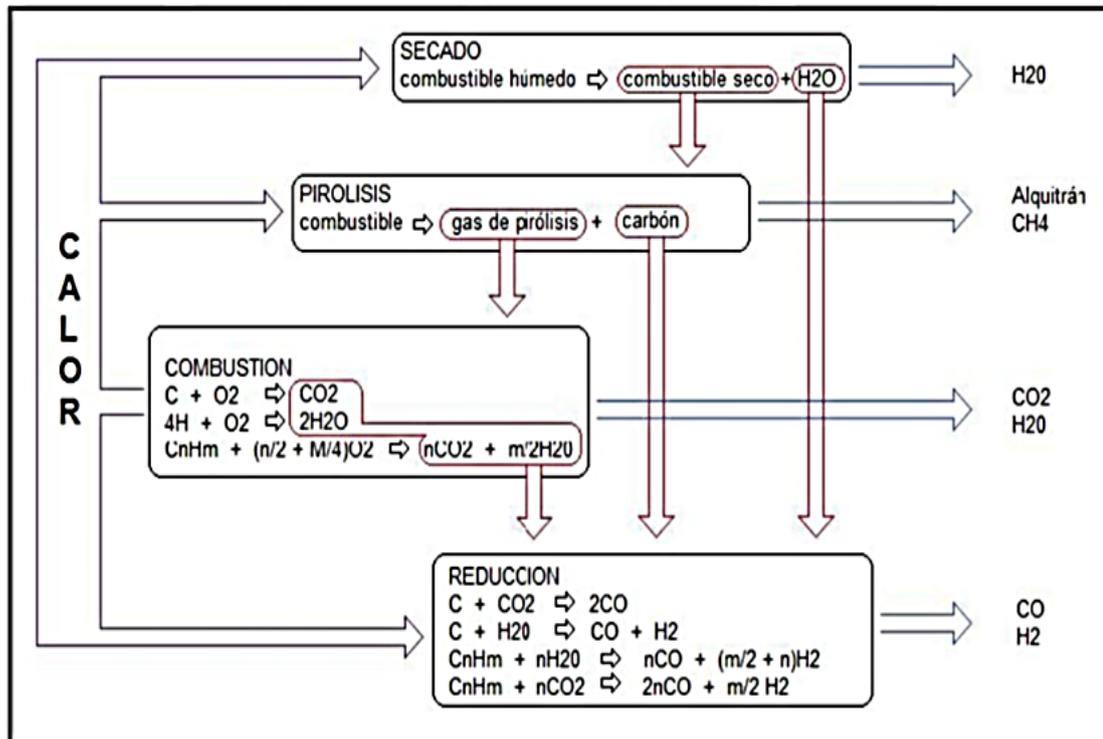


Figura. 3. Etapas de la gasificación

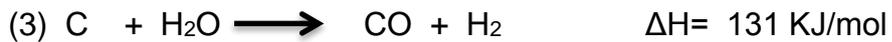
### 2.4.3. Reacciones químicas elementales de la gasificación

Cuando un sólido orgánico entra en el gasificador, se produce rápidamente la pirolisis. El sólido libera los compuestos volátiles y se forma un residuo carbonoso o char. Si bien el conjunto de reacciones es muy complejo, las reacciones limitantes de la velocidad global del proceso son las reacciones sólido – gas, por lo que son las únicas que suelen tomarse en cuenta, junto a las reacciones de formación de hidrógeno (shift), y metano (metanización) a partir de CO<sub>2</sub>. (Castells & Velo, La Gasificación, 2012)

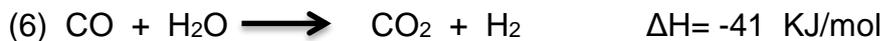
### Reacciones de combustión (reacciones exotérmicas)



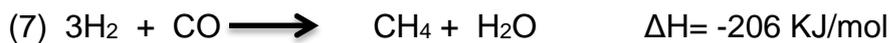
### Reacciones de Gasificación



### Reacción de formación de Hidrógeno (Shift – exotérmica)



### Reacción de formación de metano (Metanización – exotérmicas)

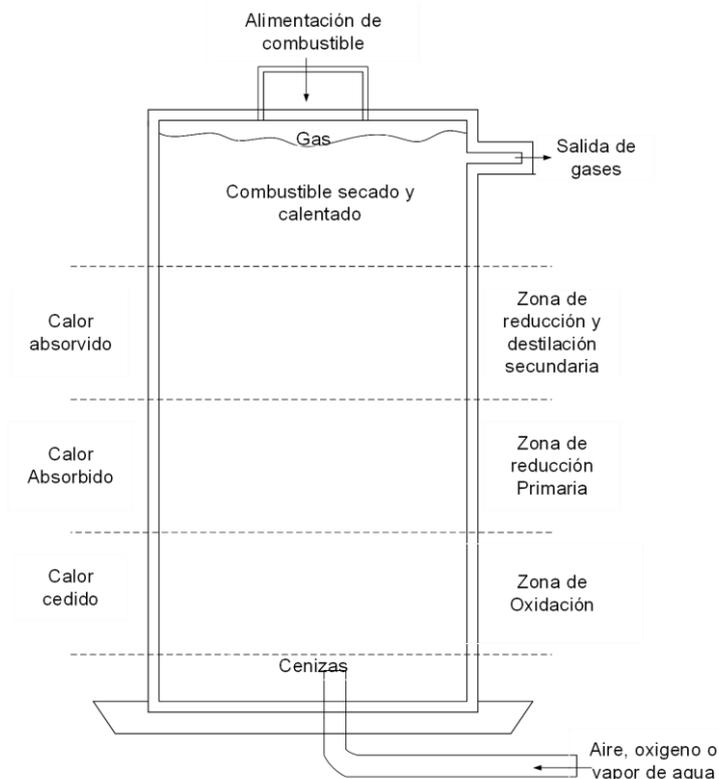


El carbono en presencia de oxígeno, tendera a combustionar (como ocurre en la reacción #1); como el oxígeno introducido en el reactor es insuficiente, se favorece a la presencia de CO por combustión incompleta (reacción #2). El exceso de carbono reacciona con los gases presentes principalmente  $CO_2$  y  $H_2O$  (reacción #3 y #4). La reacción #3 y #6 están favorecidas por la presencia de vapor de agua en el agente oxidante, por lo que la presencia de vapor favorece a la producción de hidrógeno. La presencia de metano (reacción #7), esta favorecida por las altas presiones. (Castells & Velo, La Gasificación, 2012)

La forma en que tiene lugar los diferentes procesos y reacciones depende del diseño y tipo del gasificador. En la parte inferior del reactor llamada zona de oxidación se genera el calor preciso para la reacción de combustión #1. El resto no combustionable cae al fondo en forma de cenizas. En la zona superior la zona primaria de reducción el  $\text{CO}_2$  formado y parte del carbono se combinan y dan lugar a una serie de reacciones muy complejas en las que esencialmente se forma  $\text{CO}$ . Esta es la etapa básicamente de pirolisis e inicio de la gasificación. El agua procedente de la combustión inicial se disocia en forma de  $\text{H}_2$  y más  $\text{CO}$ . (Castells & Velo, La Gasificación, 2012)

La llamada zona secundaria de reducción y destilación es más bien la etapa de gasificación propiamente dicha. En ella prosigue la formación de  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$  además de la incorporación de ciertos hidrocarburos de cadena larga. En la parte superior y cercana a la entrada de combustible, los gases calientes secan el combustible que entra en contracorriente y llevan a cabo la destilación primaria que es donde se incorporan los hidrocarburos más ligeros. (Castells & Velo, La Gasificación, 2012)

**Fuente:** (Castells & Velo, La Gasificación, 2012)



**Figura 4. Zonas de reacción de un gasificador**

#### **2.4.4. Procesos de gasificación**

El término genérico "gasificación" engloba una gran variedad de procesos en los que pueden obtenerse productos muy diversos. Basándose en el agente gasificante empleado puede establecerse una primera clasificación de los procesos de gasificación:

Con aire: La combustión parcial con el aire da lugar a una reacción exotérmica cuyo producto es un gas de bajo poder calorífico, susceptible de ser aprovechado con fines de carácter energético. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Con oxígeno: Se produce un gas de poder calorífico medio, de mayor calidad al no estar diluido con N<sub>2</sub>. Además de aplicaciones de carácter energético, puede utilizarse como gas de síntesis para la obtención de metanol. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Con vapor de agua u oxígeno (o aire): Se produce un gas enriquecido en

H<sub>2</sub> y CO que se puede utilizar como gas de síntesis para diversos compuestos (amoníaco, metanol, gasolinas, etc.). (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Con hidrógeno: Se produce un gas de alto contenido energético que, por tener altos porcentajes de metano, puede utilizarse como sustituto del gas natural. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

#### **2.5. Tipos de Gasificadores**

Los equipos utilizados para la gasificación de biomasa se dividen de manera general en: gasificadores de lecho fijo y semi-móvil, de lecho móvil, de lecho fluidizado y de flujo de arrastre. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

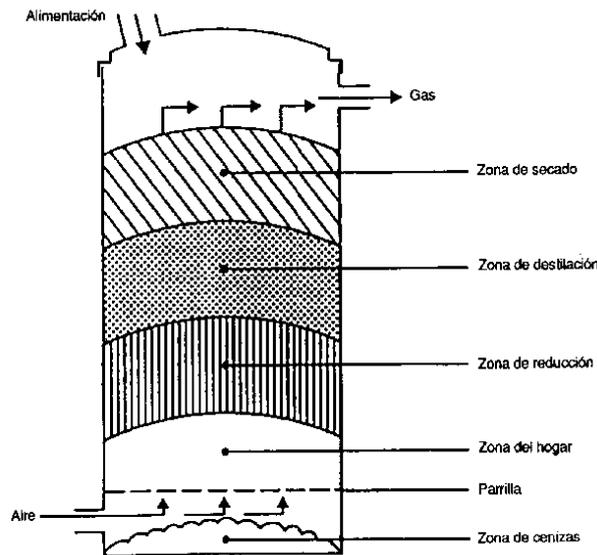
### **2.5.1. Gasificador de Lecho Fijo y Semi móvil**

Los gasificadores de lecho fijo (alimentación por lotes) y semi móvil (alimentación continua), tienen un lecho de partículas de sólidas de biomasa a través de las cuales se introduce un agente de gasificación. La fase sólida se mueve lentamente hacia la parte baja del reactor a medida que ocurre la descomposición de la biomasa. Estos reactores cuentan con una tecnología simple de operar. Su uso es apropiado para la producción de energía pequeña. Dentro de las pequeñas desventajas de estos gasificadores se encuentran la existencias de altos gradientes de temperatura en el interior del mismo, falta de uniformidad de flujo en de la fase sólida, formación de puentes y adherencia del material y caídas considerables de presión a través del lecho de material sólido. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Dependiendo de la dirección del flujo en cual se mueva el agente de reacción y su relación con la dirección del movimiento del sólido, estos gasificadores se clasifican en: gasificadores de corrientes descendentes (updraft), de corriente ascendente (downdraft) y de corriente cruzada (crossdraft). (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

#### **2.5.1.1. Gasificador de Corriente Ascendente (updraft)**

Consiste en un lecho fijo de combustible rico en carbono (biomasa o carbón) a través del cual el “agente gasificante” (como el vapor del aire) fluye en una configuración contraria al flujo del combustible. La ceniza es removida como polvo o escoria, por la parte inferior del gasificador. En la zona superior se produce el secado que es un proceso endotérmico con consumo de unas 600 Kcal/Kg de agua evaporada. La segunda zona en sentido descendente define la eliminación de agua de constitución, etapa de naturaleza exotérmica que elevaría por si solo la temperatura del sólido a 450 °C. Más abajo se considera que se entra en la zona de gasificación que consiste en dos franjas en las que en la parte superior de la zona de gasificación a 600 °C, se produce la reducción de gases como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O para formar CO y H<sub>2</sub>, consumiendo energía térmica y enfriando los gases ascendentes. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

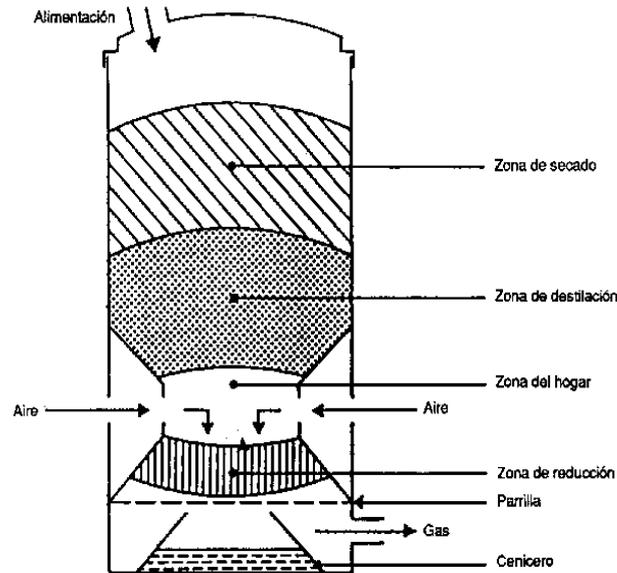


**Figura. 5. Gasificador de corriente ascendente (Updraft)**

En la zona inferior se produce el contacto de los gases de alimentación (aire, oxígeno puro, vapor de agua o mezclas de gases) con la fase final de la descomposición del combustible que suele ser carbono casi puro más la cenizas (óxidos alcalinos) y sílice; en dichas zonas se produce el calentamiento de los gases y las reacciones de oxidación de los residuos de combustibles con el oxígeno de la alimentación en reacciones exotérmicas de formación de CO y CO<sub>2</sub>. En la zona de gasificación la temperatura ronda los 600 °C, las velocidades de reacción son suficientemente elevadas como para suponer que los tiempos de permanencia del gas en la zona, son suficientes para alcanzar las condiciones próximas al equilibrio. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

### 2.5.1.2. Gasificador de Corriente Descendente (downdraft)

Gasificadores de tiro descendente han sido muy exitosos para los motores de funcionamiento debido al bajo contenido de alquitrán. Se ha encontrado una solución al problema del arrastre de alquitrán con la corriente de gas, diseñando gasificadores de tiro invertido o corriente descendente, en los cuales el aire de primera gasificación se introduce en la zona de oxidación del gasificador o por encima de ésta. El gas pobre sale por el fondo del aparato de modo que el combustible y el gas se mueven en la misma dirección, como se muestra esquemáticamente en la figura. (FAO, 2012)



**Figura. 6. Gasificador de corriente descendente o tiro invertido**

En su camino hacia abajo, los productos ácidos y alquitranes de la destilación procedentes del combustible deben pasar a través de un lecho incandescente de carbón vegetal y se transforman por ello en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano. Dependiendo de la temperatura de la zona incandescente y del tiempo de paso de los vapores con alquitrán, se logra una descomposición más o menos completa de los alquitranes. (FAO, 2012)

La principal ventaja de los gasificadores de tipo invertido radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán apropiado para aplicarlo a motores. Sin embargo, en la práctica es muy raro lograr un gas libre de alquitranes, en todo el funcionamiento del equipo: se considera normal un índice tres de relación entre los alquitranes existentes y los remanentes al final de la operación. (FAO, 2012)

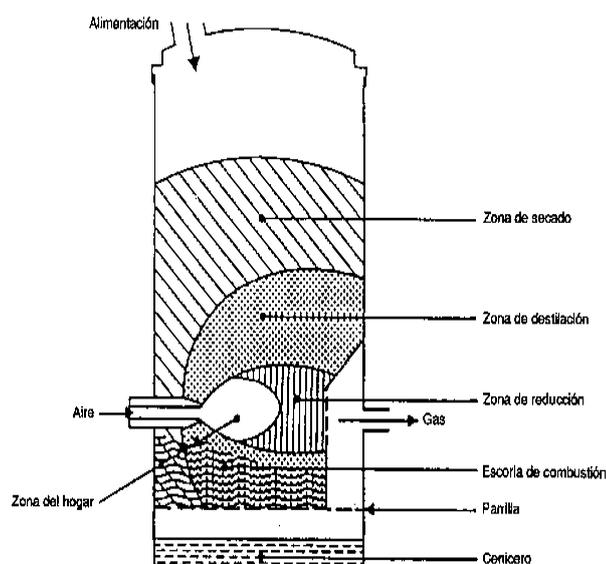
Un inconveniente importante de los equipos de tiro invertido es la imposibilidad de funcionar con una serie de combustibles no elaborados. En particular, los materiales blandos y de baja densidad ocasionan problemas de circulación y una caída excesiva de presión y, el combustible sólido hay que convertirlo en gránulos o briquetas antes de utilizarlo. Los gasificadores de tiro invertido sufren también los problemas relacionados con los combustibles de alto contenido de cenizas (formación de escoria), en mayor proporción que los gasificadores de tiro directo. (FAO, 2012)

### 2.5.1.3. Gasificador de Tiro Transversal (Crossdraft)

El principio de funcionamiento de este tipo de gasificador es similar al “downdraft”, con la diferencia fundamental que los flujos de combustible y agente oxidante, entran en el reactor en dirección perpendicular entre sí, juntándose en la zona de combustión, reaccionando y debido al tiro producido por la diferencias de presiones entre la entrada y salida del reactor, sale por el lado opuesto al que entra el oxígeno oxidante. (Khalidse, Parulekar, Aghalayam, & Ganesh, 2012)

La idea general detrás de este diseño es que los aceites alquitranados y los vapores que se despiden en la zona de destilación son muy inestables a altas temperaturas. Para llegar a la salida de gas deben pasar necesariamente a través de la zona de combustión parcial en donde una gran cantidad de productos gaseosos no condensados, serán fracturados antes de abandonar el gasificador. (Khalidse, Parulekar, Aghalayam, & Ganesh, 2012)

A pesar que el principio general detrás de esto parece relativamente fácil, en la práctica se requiere algo de ensayo y de gran habilidad para llegar a un producto de gas capaz de generar un gas libre de alquitrán en condiciones de equilibrio. (Khalidse, Parulekar, Aghalayam, & Ganesh, 2012)



Fuente: (FAO, 2012)

Figura. 7. Gasificador de Tiro Transversal (Crossdraft)

## **2.5.2. Gasificador de Lecho Fluidizado**

Los reactores de lecho fluidizado se presentan elevadas velocidades de reacción y buenas condiciones de contacto entre el agente de reacción y el material carbonizado. El sólido fluidizado se comporta como un líquido en ebullición. Las partículas se escapan con la corriente gaseosa se separan en un ciclón y son generalmente recirculadas en el lecho. Este tipo de gasificadores producen una corriente gaseosa con un contenido de alquitranes entre el de los gasificadores de lecho fijo en flujo de paralelo y los gasificadores en contracorriente. Dentro de los problemas más comunes de este tipo de reactores se encuentran la pérdida de fluidez debido a la sinterización del lecho, la cual depende de alto grado de las propiedades térmicas de la ceniza. Los gases generados a partir de biomasa, generalmente contiene altos niveles de ceniza corrosiva. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

### **2.5.2.1. Gasificador de Flujo de Arrastre**

Los gasificadores de flujo de arrastre consisten en un reactor vertical a través del cual cae la biomasa, por acción de la gravedad. En su paso por el reactor la materia prima reacciona con el agente de reacción que generalmente se introduce en contracorriente. Estos reactores trabajan a temperaturas por encima de la temperatura de fusión de la ceniza de tal manera que esta se obtiene en forma de escoria. Las altas presiones y temperaturas alcanzadas, facilitan el alcance de muy altos desempeños, aunque la eficiencia térmica es ligeramente baja debido a que el gas producido debe ser enfriado antes de ser filtrados. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

Las altas temperaturas, garantizan la ausencia de breas y metano, a pesar de que las necesidades de aire primario son mayores que para otro tipo de gasificadores. Todos los gasificadores de flujo arrastrado remueven la mayor parte de la ceniza en forma de escoria debido a que la temperatura de funcionamiento es más alta que la temperatura de fusión de ceniza. Una pequeña porción de la ceniza producida se convierte en polvo volátil o una mezcla oscura de ceniza. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)

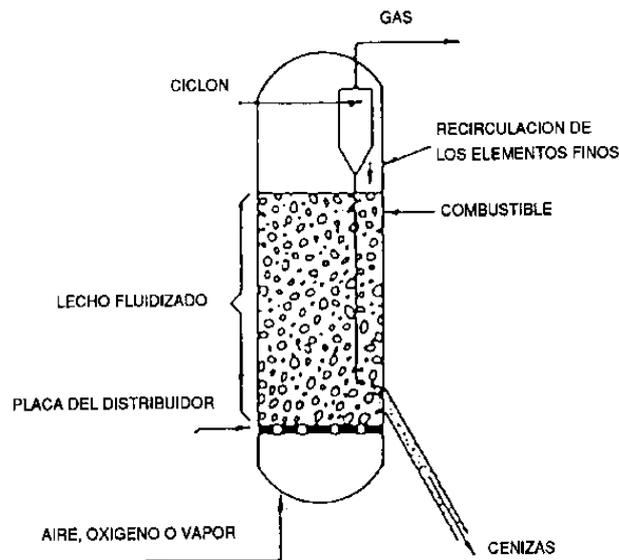


Figura 8. Gasificador de Flujo de Arrastre

## 2.6. Comparación de los Gasificadores de Lecho Fijo y Fluidificado

Para realizar una comparación entre los gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado debemos conocer las características que nos brindan los dos, datos que conoceremos en la siguiente tabla:

Tabla. 5. Resumen de las características de los gasificadores

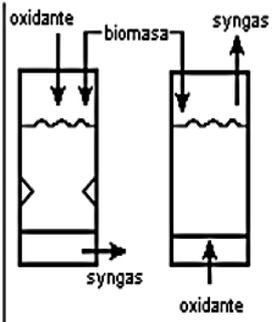
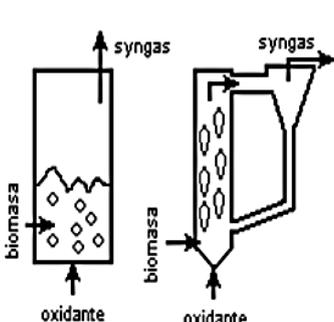
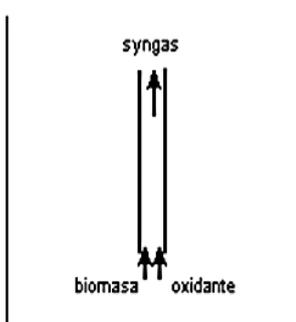
	Características típicas de los gasificadores empleados (propulsados por aire)						
	Temperatura (°C)		Alquitrán	Partícula	Capacidad Máx (th <sup>-1</sup> )	MWe <sup>(a)</sup>	
	Reacción	Gas Salida				Min.	Máx.
<i>Lecho Fijo</i>							
Downdraft	1.000	800	m. bajo	moderado	0,5	0,1	1
Updraft	1.000	250	m. alto	moderado	10	1	10
Contracorriente	900	900	m. alto	alto	1	0,1	2
<i>Lecho Fluidizado</i>							
Reactor único	850	800	normal	alto	10	1	20
Lecho F. rápido	850	850	bajo	m. alto	20	2	50
Lecho circulante	850	850	bajo	m. alto	20	2	100
Lecho arrastrado	1.000	1.000	bajo	m. alto	20	5	100
Reactores gemelas	800	700	alto	alto	10	2	50

Fuente: Tratamiento y valoración energética de residuos  
 Autor: (Castells X. E., 2005)

Las principales ventajas del lecho fijo son la alta eficiencia en la conversión de carbono contenido en la alimentación, el amplio rango de contenido de cenizas que puede tener el sólido y la posibilidad de fundirlas. Además los gasificadores downdraft producen un gas limpio con altos contenidos de alquitranes. (Castells X. E., 2005)

Los de lecho fijo tienen una amplia distribución de temperatura, lo que puede favorecer la aparición de puntos calientes y fusión de cenizas. Así mismo, esta característica confiere a los lechos fijos una baja capacidad específica y hacen que requieran largos periodos de puesta en marcha, al tiempo que limita su potencial de pasar a mayores escalas de tamaños. (Castells X. E., 2005)

**Tabla. 6. Cuadro comparativo entre los diferentes tipos de gasificadores**

					
	corriente paralela	contra corriente	densa	circulante	
T°C	700-1200	700-900	<900	<900	1500
Breas	baja	muy alta	intermedia	intermedia	ausente
Control	fácil	muy fácil	intermedio	intermedio	muy complejo
Potencia	<5MW	<20MW	10<MW<100	>20 MW	>100 MW
Combustible	muy crítico	crítico	poco crítico	poco crítico	partículas muy finas

**Fuente:** Manual de un gasificador

**Autor:** Huaraz Choi, 2013

Los lechos fluidizados presentan una buena transferencia de masa y calor entre la fase sólida y gaseosa, con una mejor distribución de temperaturas, alta capacidad específica y rápido calentamiento en la puesta en marcha. Toleran bien amplias variaciones en la calidad del combustible y una amplia distribución de partículas. (Castells X. E., 2005)

Las desventajas de los lechos fluidizados son el alto contenido de polvo en la fase gas y el conflicto entre las temperaturas requeridas para obtener una alta eficiencia de conversión y los bajos puntos de fusión de cenizas. Este punto es de especial relevancia en la gasificación de biomasa debido a que la presencia de compuestos alcalinos en las cenizas les confiere un menor punto de fusión comparado con las cenizas de carbón. (Castells X. E., 2005).

### **III. CAPITULO 3.**

#### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

##### **3.1. Metodología de la Investigación**

###### **3.1.1. Tipos y Enfoques Metodológicos**

En la mecánica del tema de estudio se puede distinguir dos enfoques metodológicos:

###### **3.1.1.1. Enfoque Cualitativo.**

Se usó el enfoque cualitativo en el análisis de los diferentes tipos y sistemas de gasificación, generándose una alternabilidad para cada tipo de proceso, por lo que se buscó realizar una evaluación profunda de cada tipo de gasificación y del estudio de las propiedades físicas y químicas del olote de maíz.

###### **3.1.1.2. Enfoque Cuantitativo.**

Se aplicó el enfoque cuantitativo a los datos experimentales que permitieron realizar el balance de materia y energía, y a partir de ellos diseñar el gasificador para obtener los parámetros óptimos de funcionamiento del proceso.

###### **3.1.2. Métodos y Técnicas**

###### **3.1.2.1. Métodos de investigación**

Los métodos utilizados en la investigación, son los siguientes:

- **Investigación de campo**

Se aplica la investigación de campo, cuando se recorrió por dos de los centros de acopio que se encargan del almacenamiento y secado del grano de maíz ubicado en

la parroquia San Carlos perteneciente al cantón Quevedo, en donde realizan sus actividades económicas.

- **Investigación Descriptiva.**

Se emplea la investigación descriptiva al analizar y describir la realidad actual de los centros de acopio del grano de maíz, y problemas existente en el medio ambiente.

- **Investigación de Biblioteca**

Se emplea la investigación de biblioteca al estudiar los diferentes tipos de gasificadores que se podía utilizar para el proceso de gasificación del olote del maíz.

### **3.1.2.2. Técnicas de investigación**

Las técnicas de investigación empleadas fueron la observación, entrevista y encuesta.

Se observa que en el cantón Quevedo hay un gran número de centros de acopios dedicados al almacenamiento y secado del grano del maíz, de los cuales todos usan GLP como combustible para el secado. Para obtener la información de estos establecimientos donde se presenta el problema de la compra del GLP, se realizó entrevistas y encuestas que permitieron conocer de forma directa la problemática económica derivada de la compra del GLP.

## **3.2. Ingeniería de Procesos**

### **3.2.1. Selección de un equipo de gasificación.**

Para utilizar un gasificador para la conversión de biomasa en una fuente intermedia de energía, tenemos que conocer de una forma muy detallada cual es el tipo o sistema de gasificación que pueda trabajar y adaptarse a nuestro recurso biomásico. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, 2007)

La elección del gasificador se debe basar en tres aspectos principales:

- ✓ El tipo y la cantidad de biomasa que se dispone
- ✓ La aplicación final que se pretende, es decir, que necesidades energéticas se pueden cubrir.
- ✓ Y un grupo de factores varios (medioambientales y económicos).

Cuanto mejor este cuantificada la biomasa disponible, y más detallado sea el conocimiento sobre las características físicas y químicas, más sencilla y rápida será la etapa de elección de la tecnología. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, 2007)

### 3.2.1.1. Tipo de biomasa

El tipo de biomasa que se utiliza en el estudio va hacer los desechos del maíz (olote), que va a servir como recurso biomásico, del cual tenemos que tener conocimiento de sus características físicas y químicas. El olote de maíz a utilizar es oriundo de la provincia de los Ríos, del cantón Quinsaloma, de la semilla del maíz duro seco. A cual se le realizo la determinación de las siguientes propiedades físicas, mientras que las propiedades químicas se tomaron de la base de datos de biomasa y residuos Phyllis 2, que clasifico al olote de maíz como combustible sólido recuperado dándole un numero de ID 979, datos que servirán de guía en el presente trabajo.

**Tabla. 7. Principales propiedades físicas del olote del maíz**

<b>Densidad aparente</b>	292.41Kg/m <sup>3</sup>
<b>Humedad</b>	65.15%
<b>Granulometría</b>	2.8 cm

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla. 8. Propiedades químicas del olote del maíz.**

Propiedad	Unidad	Valor		
		Arkansas	seco	daf
<b>▼ Propiedades de los Combustibles</b>				
<b>▼ Análisis inmediato</b>				
El contenido de humedad	% en peso (ar)		← Edición	
El contenido de cenizas	% en peso		1.00	
<b>▼ Último análisis</b>				
Carbono	% en peso		48.80	49.29
Hidrógeno	% en peso		5.38	5.43
Nitrógeno	% en peso		0.40	0.40
Oxígeno	% en peso		44.42	44.87
Total (con haluros)	% en peso		100.00	100.00
<b>▼ Valores caloríficos</b>				
El poder calorífico superior (PCS)	MJ / kg		17.00	17.17
HHV <sub>mitne</sub>	MJ / kg		18.36	18.55
<b>▼ Los análisis químicos</b>				
<b>▼ Composición bioquímica</b>				
Celulosa	% en peso (en seco)		52.00	
La hemicelulosa	% en peso (en seco)		32.00	
La lignina	% en peso (en seco)		15.00	
Cenizas totales + bioquímica	% en peso (en seco)		100.00	

**Fuente:** Base de datos de biomasa y residuos Phyllis 2.

**Autor:** 7<sup>o</sup> Programa Marco de la UE y Proyecto BRISK

### 3.2.1.2. Aplicación del gas obtenido

En el estudio científico queremos ver la viabilidad al poder sustituir el GLP que usan las empresas que dan servicio de secado al grano del maíz, por el gas pobre (syngas) obtenido de la gasificación.

## Selección del gasificador

Haciendo un análisis de los aspectos principales para la elección del gasificador (ver tabla 9), hemos concluido que el gasificador Down-draft es el que se va a utilizar; debido a que produce un gas de síntesis de buen poder calorífico que permite su uso en secadores agroindustriales, además genera un gas pobre de bajo contenido de alquitrán, ayudando a que el mantenimiento del equipo sea más fácil; También permite que el olote de maíz pueda ser utilizado en él, debido a que el olote si se puede pre tratar para que cumple con los parámetros de humedad y tamaño de partícula uniforme requeridos para el gasificador Down - Draft.

**Tabla. 9. Comparación de Gasificadores**

	Lecho Fijo		Lecho Fluidizado
	Updraft	Downdraft	
Biomasa con alto contenido de humedad (25 - 50%)	Si	no	No
tamaño del combustible uniforme	Poco critico	Critico	No critico
Contenido de Alquitranes en gas	Alto	Bajo	Moderado
Productos comerciales de generación de electricidad de pequeña escala (<100KWe)	Mediana mente adecuado	Adecuado	No Adecuado

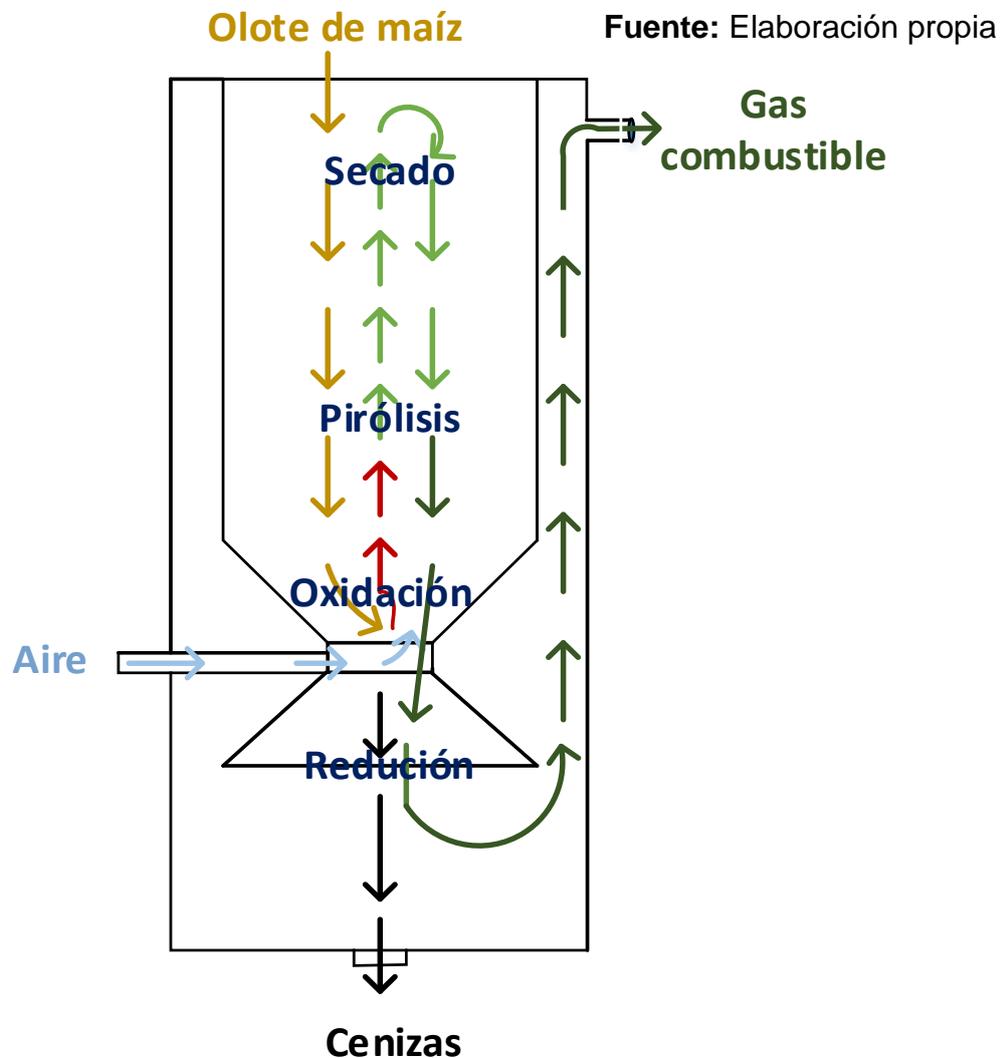
**Fuente:** La gasificación

**Autor:** (Castells & Velo, La Gasificación, 2012)

### **3.2.2. Diseño del Gasificador**

Para dar comienzo al diseño del gasificador hay que tomar en cuenta las corrientes, tanto a la entrada del gasificador, como en la salida del mismo, dentro de las corrientes de entrada tenemos al olote de maíz y el aire que se necesita para que se dé la gasificación, y como corrientes de salida tenemos el gas combustionable producto de

la gasificación, y las cenizas que son el residuo de todo el proceso de gasificación, partiendo de ese conocimiento podremos realizar un pequeño diagrama del equipo.



**Figura. 9. Diagrama de las Corriente de un Gasificador Down-Draft**

El gasificador Down draft está conformado por tres partes que son el zona del cenicero, la zona de la garganta de oxidación y la zona de pirolisis y secado (ver figura 10). De los cuales se tendrá que dimensionar las tres partes y para ello comenzaremos con la zona de suma importancia para que se dé la gasificación como es la zona de la garganta de oxidación.

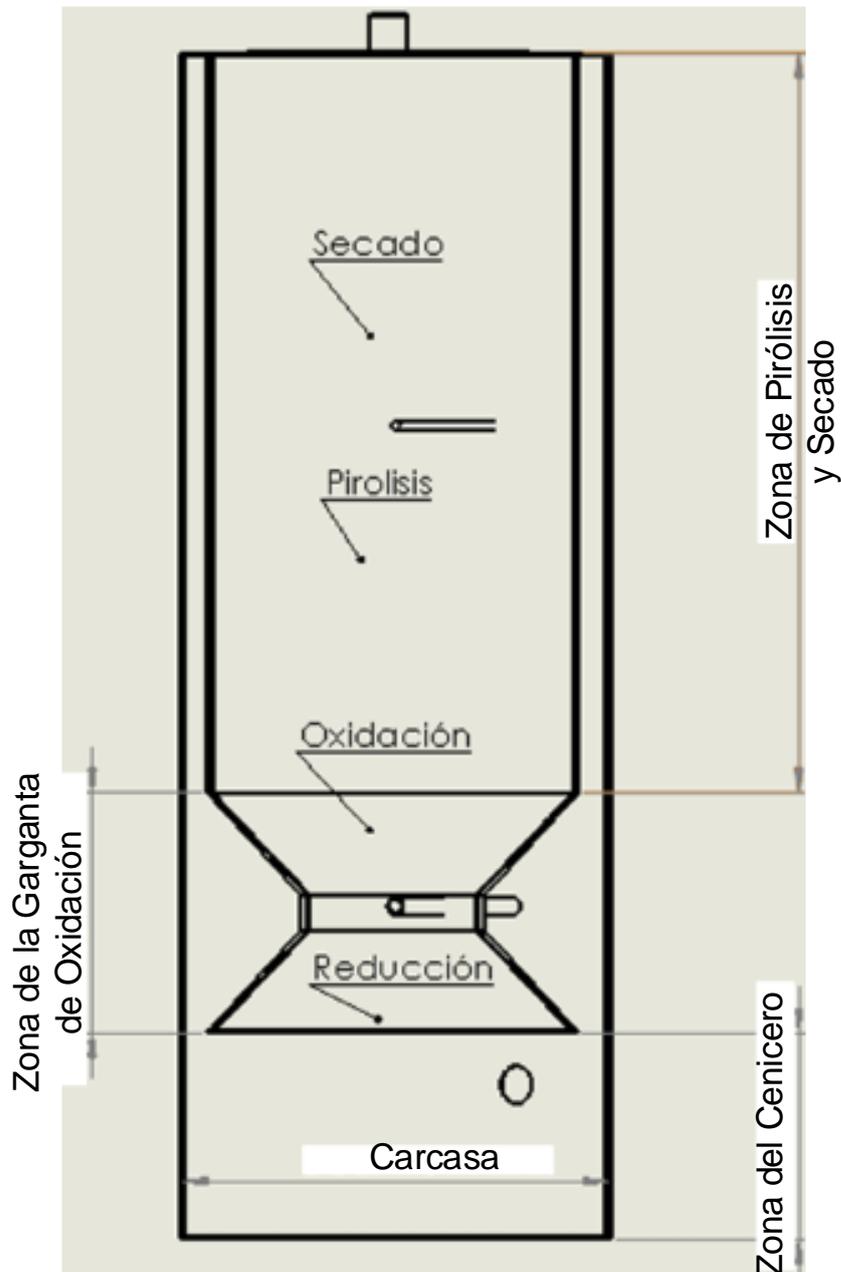


Figura 10.- Gasificador Down-Draft con sus respectivas zonas

### 3.2.2.1. Determinación del área de la zona de la garganta de oxidación

El lugar en donde se realiza la reacción de combustión es en la garganta de oxidación, razón por la cual, a esta área se la llama también área total de reacción.

Fuente: Elaboración Propia

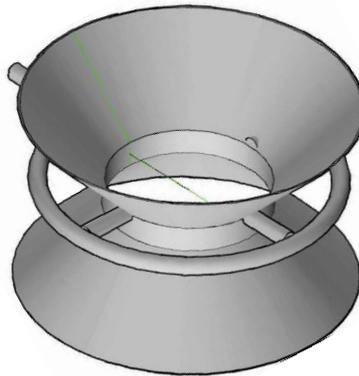


Figura. 11. Garganta de oxidación

### Capacidad de tratamiento de la biomasa.

El flujo másico de olote de maíz a utilizar para la experimentación es de 24.5 kg por hora. Se escoge esta cantidad de olote de maíz, debido a que se tenía a disposición dos tanques que se utilizan para almacenar lubricantes de 90 cm de altura por 57 cm de diámetro y se los utilizó para que formen parte de la carcasa del equipo, por lo que los cálculos para el diseño del equipo partieron de las dimensiones de la carcasa.

### Capacidad específica de procesado.

Según Groenvelt y Van Swaij (1980), Kaupp y Goss. (1981), y Van Swaij (1981). "La capacidad específica de gasificación en la zona de la garganta varía entre 1800 y 3600 Kg/h-m<sup>2</sup>", por otro lado gracias a la experiencia que han obtenido el Grupo de Procesos Termoquímicos de la Universidad de Zaragoza – España (GPT – Unizar., 2005), en la construcción de gasificadores downdraft tipo garganta, han determinado un rango óptimo en lo que se trata a capacidad específica de procesado de 1200 y 1300 kg/h.m<sup>2</sup>, cuyos valores ha dado excelentes resultados; razón por la cual se trabaja con una capacidad específica de procesado de 1250 kg/h.m<sup>2</sup>.

$$A_{tr} \approx \frac{\text{Biomasa} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{hora}} \right) * K(\text{relación volumetrica})}{\text{Capacidad específica de procesado "C}_{pe} " \left( \frac{\text{Kg}}{\text{h} - \text{m}^2} \right)} \quad (\text{ec. \#3})$$

En donde:

$A_{tr}$  Es el área total de reacción en  $m^2$

$K$  Es la relación volumétrica que hay entre el volumen del olote de maíz y el volumen total del almacenamiento en el equipo. En el punto 3.2.2.4. Se explicara su cálculo.

$$A_{tr} \approx \frac{\frac{24.5Kg}{hora} * 63.3127}{\frac{1250 Kg}{h m^2}} = 1.24$$

### 3.2.2.2. Determinación del diámetro en la zona de oxidación.

Para poder determinar el diámetro de la zona de oxidación primero se determina las áreas tanto de la zona de pirólisis como la de la zona de oxidación.

$$A_{tr} = A_{zp} + A_{zox} \quad (\text{ec. \#4})$$

$$A_{zox} = A_{ag} + 2 * A_c \quad (\text{ec. \#5}) \qquad A_{zp} \approx \frac{\pi}{2} * D_{zp} * H_{zp} \quad (\text{ec. \#6})$$

$$A_c = \pi (r_{zp} + r_{ag}) * G \quad (\text{ec. \#7}) \qquad A_{ag} \approx \frac{\pi}{2} * D_{ag} * H_{ag} \quad (\text{ec. \#8})$$

**En donde:**

$A_{zp}$  Área de la zona de Pirólisis en  $m^2$ .

$A_{zox}$  Área de la zona de la garganta de oxidación en  $m^2$ .

$A_{ag}$  Área del anillo de la garganta en  $m^2$ .

$A_c$  Área del cono de la garganta en  $m^2$ .

$D_{zp}$  Diámetro de la zona de Pirólisis en m.

$D_{ag}$  Diámetro del anillo de la garganta en m.

$H_{zp}$  Altura de la zona de Pirólisis en m.

$H_{ag}$	Altura del anillo de a garganta en m.
$G$	Generatriz del cono en m.
$r_{zp}$	Radio de la zona de pirolisis en m.
$r_{ag}$	Radio del anillo de la garganta en m.

Para poder determinar estas áreas primero se debe saber cuáles son sus respectivos diámetros, datos que obtendremos con las siguientes formulas:

$$D_{zp} \approx 2D_{ag} \text{ (ec. \#9)}$$

$$H_{zp} = \frac{2 * m * K}{C_{ep} * \pi * D_{zp}} - \frac{2 A_{zox}}{\pi * D_{zp}} \text{ (ec. \#10)}$$

En donde:

$C_{ep}$	Es la capacidad especifica de procesado
$m$	La masa de olote de maíz por hora.

Como se mencionó anteriormente el diseño del equipo partiría de las dimensiones de la carcasa, por lo que para saber cuál es el diámetro de la zona de pirolisis, se procedió a dejar 3.5 cm de espacio entre la carcasa y el tanque de Pirólisis, por lo que el diámetro del tanque de pirolisis será de 50 cm y de este valor se procede a determinar los demás datos con las siguientes ecuaciones. La altura del anillo de la garganta se calcula a partir del diámetro de la tubería de la entrada del aire porque es en esta zona donde va a entrar el aire.

Diámetro de la tubería de entrada del aire	0.0254	m
	1	in

Tabla. 10. Dimensionamiento de las zonas que se compone el gasificador

Área de zp.	0.79 m <sup>2</sup>	Área de a.g.	0.02 m <sup>2</sup>	Área de tronco de cono	0.22 m <sup>2</sup>
D <sub>zp</sub>	0.50 m	D <sub>ag</sub>	0.25 m	R <sub>zp</sub>	0.25 m
H <sub>zp</sub>	1.00 m	H <sub>ag</sub>	0.05 m	R <sub>ag</sub>	0.12 m
π	3.14	Π	3.14	Generatriz	0.19 m
Área zona de oxidación	0.46 m <sup>2</sup>			Altura del cono	0.14 m

Fuente: Elaboración propia  
 Autor: Cristhian Almeida Murillo

**Angulo de inclinación del tronco del cono:** 30° parámetro óptimo

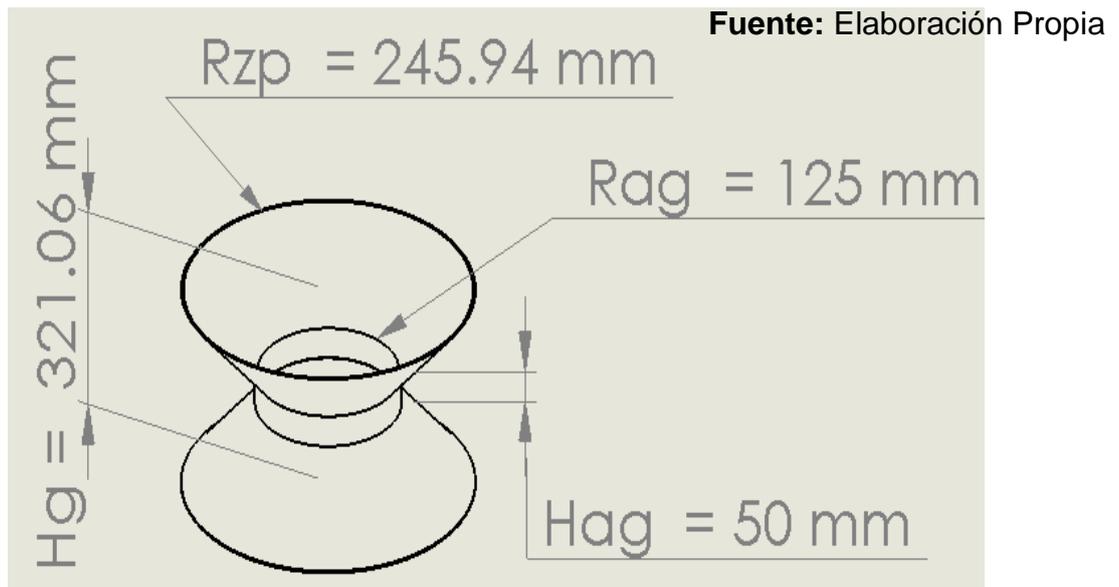


Figura. 12. Garganta de oxidación con sus respectivas medidas.

### 3.2.2.3. Determinación del volumen de las zonas del gasificador

$$V_{zp} \approx \frac{\pi}{4} * D_{zp}^2 * H_{zp} \quad (\text{ec. \#11})$$

$$V_c = \frac{\pi}{3} * H_c * (R_{zp}^2 + R_{ag}^2 + R_{zp} * R_{ag}) \quad (\text{ec. \#12})$$

$$V_{ag} \approx \frac{\pi}{4} * D_{ag}^2 * H_{ag} \quad (\text{ec. \#13})$$

**Volumen z.p.** 0.196 m<sup>3</sup>    **Volumen a.g.** 0.002 m<sup>3</sup>    **Volumen c.** 0.016 m<sup>3</sup>

### 3.2.2.4. Determinación del volumen y densidad del olote del maíz.

Para los gasificadores Down-Draft el tamaño de la biomasa es crítico por lo que este debe ser pequeño y uniforme, por este motivo se procedió a cortar en partes iguales el olote del maíz en forma de cilindro y tomar sus dimensiones para determinar el volumen y la densidad.

**Tabla. 11. Valores de masa, volumen y densidad del olote del maíz**

Masa		Volumen		Densidad	
<b>m1</b>	0.0023 Kg	<b>V1</b>	7.1E-06 m <sup>3</sup>	<b>ρ1</b>	325 Kg/m <sup>3</sup>
<b>m2</b>	0.0021 Kg	<b>V2</b>	4.9E-06 m <sup>3</sup>	<b>ρ2</b>	428 Kg/m <sup>3</sup>
<b>m3</b>	0.0022 Kg	<b>V3</b>	7.1E-06 m <sup>3</sup>	<b>ρ3</b>	311 Kg/m <sup>3</sup>
<b>m4</b>	0.0028 Kg	<b>V4</b>	8.0E-06 m <sup>3</sup>	<b>ρ4</b>	350 Kg/m <sup>3</sup>
<b>m5</b>	0.0023 Kg	<b>V5</b>	6.9E-06 m <sup>3</sup>	<b>ρ5</b>	335 Kg/m <sup>3</sup>
<b>m6</b>	0.0039 Kg	<b>V6</b>	1.2E-05 m <sup>3</sup>	<b>ρ6</b>	325 Kg/m <sup>3</sup>
<b>m7</b>	0.0027 Kg	<b>V7</b>	8.6E-06 m <sup>3</sup>	<b>ρ7</b>	313 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Promedio</b>	0.0026 Kg	<b>Promedio</b>	7.8E-06 m <sup>3</sup>	<b>Promedio</b>	341 Kg/m <sup>3</sup>

**Fuente:** Elaboración propia

**Autor:** Cristhian Almeida Murillo

Una vez determinado el volumen del olote del maíz y el volumen total del de almacenamiento del olote del maíz se pueden determinar el valor de la relación volumétrica “K”.

$$K \approx \frac{V_{\text{olote de maíz}}}{V_{\text{total de almacenamiento}}} \quad (\text{ec. \#14})$$

Reemplazando los valores en la ecuación #14 obtenemos un valor de K igual a 63.21

### 3.2.2.5. Determinación del poder calorífico.

El poder calorífico puede obtenerse experimentalmente en un calorímetro (bomba calorimétrica) o mediante fórmulas aproximadas que utilizan la composición química más el contenido de cenizas y humedad. Estos procedimientos fueron realizados por un grupo de personas pertenecientes al Centro de Investigación Energética de los

Países Bajos, creando una base de datos para la biomasa y los residuos llamado Phyllis 2, en el podemos obtener los datos del análisis de la biomasa o materiales de desecho o valores medios de un grupo de materiales.

El valor para el poder calorífico inferior de la biomasa seca y su ceniza es de 17.73 MJ/ Kg de olote de maíz.

El poder calorífico inferior del gas se lo calculara a partir de los datos de la experimentación que lo veremos más adelante en el balance de energía.

### **3.2.3. Condiciones de operación**

#### **3.2.3.1. Presión y Temperatura**

Revisando la bibliografía disponible nos indica que la temperatura que alcanza el gasificador Down-draft operando con biomasa es de 700 a 1000°C Para nuestro equipo piloto de gasificación fijaremos una temperatura de gasificación de 850°C.

La presión de trabajo, es un parámetro muy importante porque influye en la obtención del gas, por tal motivo la presión de trabajo empleada en el equipo es de 1 atmosfera, el cual nos brinda un gas pobre o syngas de excelente características.

#### **3.2.3.2. Determinación del espesor y tipo de lámina del equipo**

Una vez Fijada la temperatura y presión de trabajo se determinar el espesor y tipo de lámina que se va a utilizar. El tipo de lámina se va a determinar por la temperatura que alcanzara el equipo que es de 850°C lo que se hizo fue buscar un material que tenga un punto de fusión por encima de la temperatura de trabajo. La lámina usada es de acero negro.

Como la presión de trabajo es de una atmosfera se trabajara con una lámina que normalmente se usa para la construcción de equipos industriales cuyo espesor es de 3 milímetros.

### 3.2.3.3. Relación Equivalente del Oxígeno en el Procesos de Gasificación

La relación equivalente es la relación que hay entre el oxígeno utilizado para la gasificación sobre el oxígeno requerido para la combustión completa. La cantidad de oxígeno utilizado en el proceso de gasificación; determina los productos y la temperatura de las zona de reacción.

En el caso de la gasificación este cociente puede variar aproximadamente dentro del intervalo 0,2 al 0,4. Con una relación equivalente menor de 0,2 disminuye la fracción molar del N<sub>2</sub> y CO por el contrario aumenta la fracción molar de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Así también con una relación equivalente mayor de 0,4 aumenta la fracción molar del CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub> por el contrario disminuya la fracción molar del CO y H<sub>2</sub>. Para el gasificador trabajaremos con un rango de 0,3. (Reed & Das, 1998)

Los cálculos de la cantidad de oxígeno necesaria para la gasificación se encuentran en el anexo 1 en la página 101

En las siguientes tablas se muestran los resultados de las condiciones de operación en el diseño del equipo.

Tabla. 12. Condiciones de operación		
		Unidades
Flujo sobre hora del lote de maíz:	24.5	Kg/hora
Temperatura	850	°C
Presión	1	Atm
Relación equivalente	30	%

**Fuente:** Elaboración Propia

<b>Tabla. 13. Relación estequiometria</b>		
		<b>Unidades</b>
Moles de O <sub>2</sub>	1.002	Mol - Kg
Moles de aire:	4.773	Mol - Kg
Densidad del olote de maíz	340.978	Kg / m <sup>3</sup>
Flujo de aire en condiciones normales :	0.1069	Nm <sup>3</sup> /Kg de olote
Masa de aire real:	41.294	Kg aire / hora
Flujo volumétrico de aire real:	32.011	m <sup>3</sup> aire / hora
Densidad del aire en condiciones normales	1.290	Kg aire / m <sup>3</sup> aire

**Fuente:** Elaboración Propia

<b>Tabla.14. Dimensionamiento total</b>		
<b>Partes del Gasificador</b>		<b>Unidades</b>
Altura de la zona de pirolisis y secado	1,068	m
Altura de la zona de oxidación	0,323	m
Altura de la zona de reducción	0,187	m

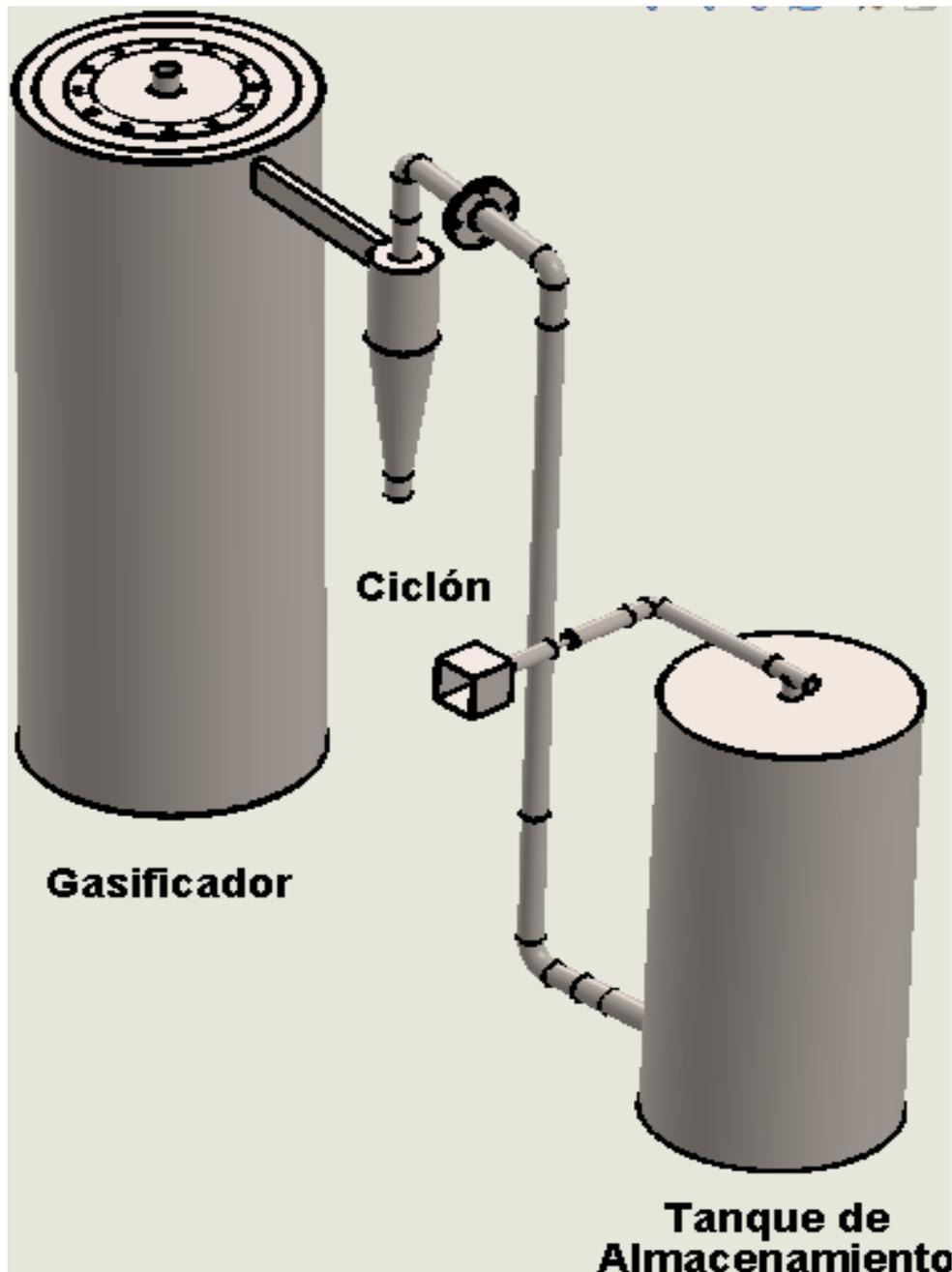
**Fuente:** Elaboración Propia

El gas pobre o syngas producido en el gasificador no se lo puede utilizar directamente en motores de combustión interna o equipos en donde el combustible debe cumplir con parámetros óptimos de calidad, debido a que el gas pobre producido contiene partículas de cenizas y alquitranes, que fueron arrastradas por el gas en el proceso de gasificación, que causan problemas graves en estos equipos. Por tal motivo se han

diseñado un sistema de filtros, ciclones y tanques lavadores del gas pobre, que buscan eliminar las partículas de cenizas y alquitranes del gas pobre.

En el presente estudio se propuso la construcción de un ciclón para la eliminación de las partículas de cenizas presentes en el gas pobre y un tanque de almacenamiento para el gas pobre.

**Fuente:** Elaboración Propia

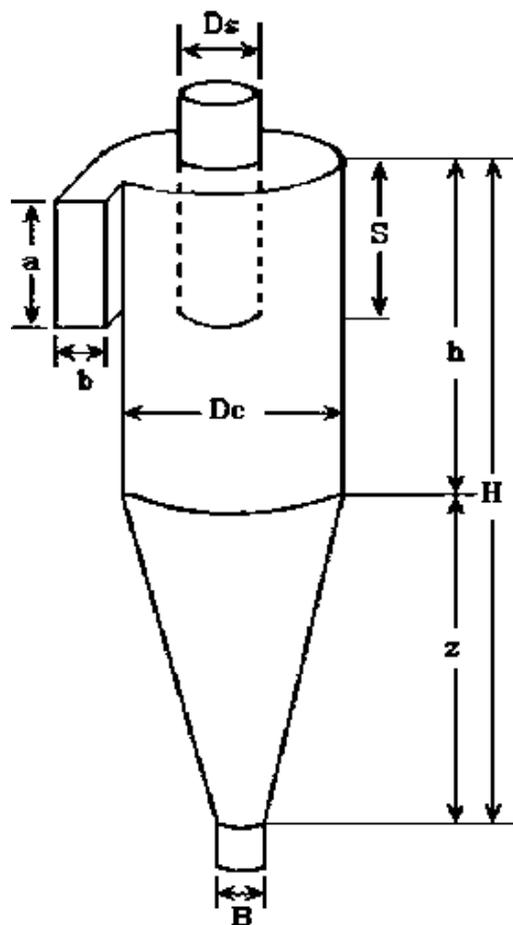


**Figura. 13. Sistema de Gasificación para la eliminación de partículas de cenizas, presentes en el gas pobre.**

### 3.2.4. Dimensionamiento del ciclón.

El ciclón es un equipo que sirve para poder remover partículas sólidas de una corriente de aire o gas. Su principio de funcionamiento radica en la separación de las partículas mediante la acción de una fuerza centrífuga que imprime al gas un movimiento en espiral descendente. El ciclón se compone básicamente de un cilindro, un cono invertido, una entrada de gas sucio (gas pobre) y dos salidas; una para las partículas sólidas en cual puede ser de longitud variable y la salida de gas limpio que se encuentra en la parte superior del cilindro. (Miliarium, 2008)

El tipo de ciclón a utilizar para eliminar partículas sólidas del gas pobre es del tipo de Ciclón de Alta Eficiencia Stairmand, porque permite remover partículas de 5  $\mu\text{m}$  con una eficiencia de hasta el 90%. (Miliarium, 2008)



Fuente: (Miliarium, 2008)

Figura. 14. Ciclón de Alta Eficiencia Stairmand

Para el diseño del ciclón se empleara el siguiente cuadro de las características de los ciclones de alta eficiencia.

<b>Tabla. 15. Características de los ciclones de alta eficiencia</b>				
<b>Dimensión</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Tipo de ciclón</b>		
		<b>Stairmand</b>	<b>Swift</b>	<b>Echeverri</b>
<b>Diámetro del ciclón</b>	$D_c/D_c$	1	1	1
<b>Altura de entrada</b>	$K_a=a/D_c$	0.5	0.44	0.5
<b>Ancho de entrada</b>	$K_b=b/D_c$	0.2	0.21	0.2
<b>Altura de salida</b>	$S/D_c$	0.5	0.5	0.625
<b>Diámetro de salida</b>	$D_s/D_c$	0.5	0.4	0.5
<b>Altura parte cilíndrica</b>	$h/D_c$	1.5	1.4	1.5
<b>Altura parte cónica</b>	$z/D_c$	2.5	2.5	2.5
<b>Altura total del ciclón</b>	$H/D_c$	4	3.9	4
<b>Diámetro salida partículas</b>	$B/D_c$	0.375	0.4	0.375
<b>Número de vórtices</b>	N	5.5	6	5.5

**Fuentes:** Theoretical Study of Cyclone Design.  
**Autor:** (Miliarium, 2008)

Para poder determinar el diámetro del cilindro del ciclón se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_c = \sqrt{A_e / (K_a * K_b)} \quad (\text{ec. \#15})$$

En donde:

$D_c$	Diámetro del cilindro del ciclón en m.
$A_e$	Área de entrada al ciclón en $m^2$
$K_a$ y $K_b$	Son las constantes para la determinación del alto y ancho a la entrada del ciclón que se observan en la tabla 14 para el tipo de ciclón a usar, en este caso $K_a = 0.5$ y $k_b = 0.2$ .

Y para poder determinar el área de entrada de ciclón se emplea la siguiente ecuación.

$$A_e = \frac{\text{Flujo de gas pobre al ingreso del cilón en } m^3/\text{seg}}{\text{Velocidad del gas pobre al ingreso del ciclón en } m/\text{seg}} \quad (\text{ec. \#16})$$

Revisando la bibliografía disponible, recomienda utilizar velocidades de ingreso del gas al ciclón mayores a 10 m/s, motivo por el cual que para el diseño del ciclón se fija una velocidad de entrada 12 m/s. Para determinar el flujo del gas al ingreso del ciclón se realizó un pequeño experimento de gasificación, que consiste en pesar 600 gramos de olote de maíz cortado en pequeños cilindros e introducirlos en una cantina para hervir agua, una vez cerrada la cantina se la coloca sobre una superficie caliente ( en este caso se la coloco sobre un fogón con carbones encendidos), al momento de que la cantina gana calor se produce la descomposición de las moléculas del olote del maíz por acción del calor liberando un gas pobre por el tubo de salida de agua de la cantina, con un anemómetro digital se procede a tomar la velocidad de salida del gas y se toma la dimensiones del tubo de salida del agua de la cantina para poder obtener el valor del flujo del gas ( ver foto en el anexo A-3). Mediante esta experimentación determinamos un valor aproximado de gas pobre al ingreso de ciclón de  $0.02154 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

Reemplazando los valores del flujo de gas pobre y la velocidad del mismo al ingreso del ciclón se tiene un área de entrada de " $A_e = 1.795 \cdot 10^{-8}$ ". Introduciendo este valor en la ecuación #15, tenemos que el diámetro del cilindro del ciclón es de 134 mm. Una vez determinado el diámetro del cilindro del ciclón procedemos a determinar las demás partes.

- **Determinación de las partes del ciclón**

**Altura de entrada al ciclón.**

$$a = 0.5 * D_c \quad (\text{ec. \#17})$$

$$a = 0.5 * 134$$

$$a = 67 \text{ mm}$$

**Ancho de la entrada del ciclón.**

$$b = 0.2 * D_c \quad (\text{ec. \#18})$$

$$b = 0.2 * 134$$

$$b = 26.8 \text{ mm}$$

**Altura de la salida del ciclón**

$$s = 0.5 * D_c \quad (\text{ec. \#19})$$

$$s = 0.5 * 134$$

$$s = 67 \text{ mm}$$

**Diámetro de la salida del ciclón**

$$D_s = 0.5 * D_c \quad (\text{ec. \#20})$$

$$D_s = 0.5 * 134$$

$$D_s = 67 \text{ mm}$$

**Altura de la parte cilíndrica del ciclón**

$$h = 1.5 * D_c \quad (\text{ec. \#21})$$

$$h = 1.5 * 134$$

$$h = 201 \text{ mm}$$

### **Altura de la parte cónica del ciclón**

$$z = 2.5 * D_c \quad (\text{ec. \#22})$$

$$z = 2.5 * 134$$

$$z = 335 \text{ mm}$$

### **Altura total del ciclón**

$$H = 4 * D_c \quad (\text{ec. \#23})$$

$$H = 4 * 134$$

$$H = 536 \text{ mm}$$

### **Diámetro de salida de partículas**

$$B = 0.375 * D_c \quad (\text{ec. \#24})$$

$$B = 0.375 * 134$$

$$B = 50.25 \text{ mm}$$

#### **3.2.5. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.**

El tanque de almacenamiento como su nombre lo indica tiene la finalidad de almacenar el gas pobre producido en el gasificador, mediante tiempos determinados, estos tiempos pueden ser para que el gas pobre alcance su temperatura de ignición, o para poder disminuir el flujo de gas pobre a la entrada del secador agroindustrial. Para realizar el diseño del tanque de almacenamiento primero se debe determinar cuánto de gas pobre se produce, cuyo valor se obtuvo de una pequeña experimentación.

Los valores obtenidos en la experimentación previa nos indica que con 600 g de olote del maíz se produjo aproximadamente  $0.02154 \text{ m}^3/\text{s}$  del gas pobre, este flujo de gas pobre se generó solamente en un periodo de 5 minutos en que se combustiono los 600 g de olote de maíz. De tal manera que la dimensión del tanque de almacenamiento es de 0.40 m de diámetro y 1 metro de altura, lo que da una capacidad de

almacenamiento de 0.1257 m<sup>3</sup> posibilitando el almacenamiento del gas pobre por un periodo corto a presión de 1 atmosfera.

**Fuente:** Elaboración Propia



**Figura. 15. Tanque de almacenamiento**

### 3.3. Materiales a usar

2 Planchas de acero negro de 3 mm de espesor.

2 Tanques de acero que se usan para almacenar lubricantes

40 Pernos y Tuercas

1 Tubo de 2 in Ø de acero inoxidable de 3 mm de espesor, 4 m de largo.

1 Tubo Cuadrado de 5 mm de espesor y 2 m de largo.

1 Tubo de ½ in Ø y 55 cm de largo

1 Tubo de 1 in Ø y 80 cm de largo

- 1 Válvula bola Giacomini de 2 in Ø
- 2 Válvula bola Giacomini de 1 ½ in Ø
- 1 Válvula bola Giacomini de 1 in Ø
- 1 Válvula bola Giacomini de 3/4 in Ø
- 2 Tapón de acero inoxidable de 2 in Ø
- 3 Neplos de acero inoxidable de 1 ½ in Ø de 10 cm de largo.
- 4 lb de electrodos 6011
- 2 Discos para pulir
- 1 Malla de acero inoxidable de 3 mm de espesor, 60 x 60 cm
- 1 Plancha de caucho de 15 mm de espesor, 1 x 1 m
- 3 Sondas termopares tipo K
- 1 Termómetro digital para el acople de sondas termopares
- 1 Anemómetro digital
- 1 Blower de 3 in Ø en la salida
- 1 Antorcha
- 1 Llave boca, corona N° 11

### **3.4. Manual de operaciones**

1. Preparar el olote del maíz para su utilización como recurso biomásico teniendo en cuenta que cumpla con las propiedades físico químicas (contenido de humedad y tamaño de partícula principalmente), que se necesitan para la gasificación.

2. Una vez preparado el olote del maíz para la gasificación, pesar 24.5 Kg del mismo para su utilización.
3. Abrir la tapa superior e inferior del gasificador para su utilización.
4. introducir los 24.5 kg de olote del maíz x la parte superior y proceder a cerrar la tapa.
5. Abrir la tapa de la entrada de la antorcha e introducir la antorcha encendida hasta encender el olote del maíz, Unas ves encendido proceder a sacar la antorcha y cerrar la tapa de la entrada de la antorcha.
6. Abrir la entrada del aire al gasificador y encender el blower, regular el flujo del aire con la válvula.
7. Cerrar la tapa inferior del gasificador y abrir el tapón de la tapa superior de gasificador, mantener cerrada la válvula que conecta el gasificador con el tanque de lavado del gas.
8. Tomar los valores de las temperaturas del equipo, tanto en la zona de oxidación, como la de la salida del gas.
9. La temperatura de la zona de oxidación debe estar entre los 800°C a 1000°C, y cuando la temperatura de salida del gas alcance 70°C proceder a abrir la válvula que conecta en tanque de lavado del gas con el gasificador.
10. Cerrar el tapón de la tapa superior del gasificador.
11. Tomar la temperatura del tanque y esperar que este alcance los 40°C para abrir la válvula que conecta al quemador para la demostración.

12. Cuando la temperatura del gas a la salida del gasificador haya llegado a los 100°C y ya no se encienda el gas en el quemador al acercar la antorcha la gasificación abra terminado.
13. Se procede a cerrar la válvula que conecta al gasificador con el tanque de lavado del gas y abrimos el tapón de la parte superior hasta que se termine de consumir por completo el olote del maíz.
14. Cuando deje de salir humo por la parte superior del gasificador se apagara el blower y se deja enfriar el equipo para poder sacar la cenizas para su posterior pesado.

#### IV. CAPITULO 4.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

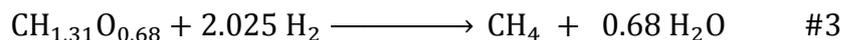
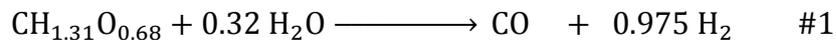
#### 4.1. Balance de materia

Mediante la realización de las experimentaciones en el equipo de gasificación, se ha obtenido los datos representativos de las prueba que nos permite determinar el parámetro óptimo de funcionamiento del equipo y realizar un balance de materia de las corrientes de entrada y salida del mismo, estos balances se rigen bajo las reacciones que se dan en el interior del equipo y que veremos a continuación.

#### Reacción de combustión

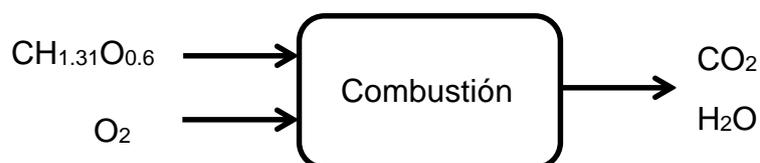
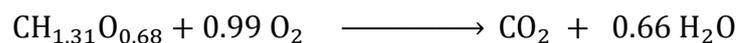


#### Reacciones de Gasificación



$$\text{Entra} + \text{Forma} = \text{Sale} + \text{Acumula} \quad (\text{ec. \#25})$$

#### Reacción de Combustión



Para la reacción de combustión que se da en la zona de oxidación solo se dispone de 7,35Kg de olote del maíz.

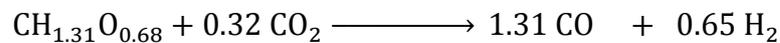
$$7,35 \text{ kg CH}_{1.31}\text{O}_{0.68} \frac{1 \text{ mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}}{24,2 \text{ Kg/mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}} * \frac{0,99 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}} * \frac{32 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{ O}_2}{1 \text{ mol O}_2} = 9,622 \text{ Kg O}_2$$

$$9,622 \text{ kg O}_2 \frac{1 \text{ mol O}_2}{32 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{ O}_2} * \frac{1 \text{ mol CO}_2}{0,99 \text{ mol O}_2} * \frac{44 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{ CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} = 13,364 \text{ Kg CO}_2$$

$$9,622 \text{ kg O}_2 \frac{1 \text{ mol O}_2}{32 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{ O}_2} * \frac{0,66 \text{ mol H}_2\text{O}}{0,99 \text{ mol O}_2} * \frac{18 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{ H}_2\text{O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} = 3,608 \text{ Kg CO}_2$$

Los kilogramos de dióxido de carbono y vapor de agua formados en la reacción de combustión; y la cantidad de calor que hay dentro del gasificador, hacen que el olote de maíz presente en la zona de pirólisis se descomponga en moléculas más pequeñas por efecto del calor dando los siguientes productos:

#### Reacción #1



Del dióxido producido en la reacción de combustión solo reacciona el 43,35 % con el olote del maíz.

$$5,786 \text{ Kg CO}_2 \frac{1 \text{ mol de CO}_2}{44 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{CO}_2} * \frac{1 \text{ mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}}{0,32 \text{ mol de CO}_2} * \frac{24,2 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}}{1 \text{ mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}} = 9,943 \text{ kg CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}$$

$$5,786 \text{ kg CO}_2 \frac{1 \text{ mol CO}_2}{44 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{C O}_2} * \frac{1,31 \text{ mol CO}}{0,32 \text{ mol CO}_2} * \frac{28 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{CO}}{1 \text{ mol CO}} = 15,076 \text{ Kg CO}$$

$$5,786 \text{ kg CO}_2 \frac{1 \text{ mol CO}_2}{44 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{C O}_2} * \frac{0,65 \text{ mol H}_2}{0,32 \text{ mol O}_2} * \frac{2 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{H}_2}{1 \text{ mol H}_2} = 0,538 \text{ Kg H}_2$$

### Reacción # 2



Del Vapor de agua producido en la reacción de combustión solo reacciona el 28,57% con el olote del maíz.

$$1,031 \text{ Kg H}_2\text{O} \frac{1 \text{ mol de H}_2\text{O}}{18 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{H}_2\text{O}} * \frac{1 \text{ mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}}{0,32 \text{ mol de H}_2\text{O}} * \frac{24,2 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}}{1 \text{ mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}} = 4,331 \text{ kg CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}$$

$$1,031 \text{ kg H}_2\text{O} \frac{1 \text{ mol H}_2\text{O}}{18 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{H}_2\text{O}} * \frac{1 \text{ mol CO}}{0,32 \text{ mol H}_2\text{O}} * \frac{28 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{CO}}{1 \text{ mol CO}} = 5,013 \text{ Kg CO}$$

$$1,031 \text{ kg CO}_2 \frac{1 \text{ mol CO}_2}{44 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{C O}_2} * \frac{0,975 \text{ mol H}_2}{0,32 \text{ mol O}_2} * \frac{2 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{H}_2}{1 \text{ mol H}_2} = 0,352 \text{ Kg H}_2$$

### Reacción # 3



De la cantidad total de hidrogeno producido en la reacción 1 y 2 solo reacciona el 27,65% con el olote del maíz.

$$0,247 \text{ Kg H}_2 \frac{1 \text{ mol de H}_2}{2 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{H}_2} * \frac{1 \text{ mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}}{2,025 \text{ mol de H}_2} * \frac{24,2 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}}{1 \text{ mol CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}} = 1,46 \text{ kg CH}_{1.31}\text{O}_{0.68}$$

$$0,247 \text{ kg H}_2 \frac{1 \text{ mol H}_2}{2 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{H}_2} * \frac{1 \text{ mol CH}_4}{2,025 \text{ mol H}_2} * \frac{16 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{CH}_4}{1 \text{ mol CH}_4} = 0,965 \text{ Kg CH}_4$$

$$0,247 \text{ kg H}_2 \frac{1 \text{ mol H}_2}{2 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{H}_2} * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{O}}{2,025 \text{ mol H}_2} * \frac{18 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \text{H}_2\text{O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} = 0,738 \text{ Kg H}_2\text{O}$$

En el balance de materia se tienen compuestos que no reaccionan en su totalidad como es el caso del dióxido de carbono, hidrógeno y vapor de agua que salen como exceso junto al metano y monóxido de carbono que se genera en la gasificación, produciéndose un gas conformado por dichos componentes. El Sobrante de olote del maíz sale como ceniza de la parte inferior del equipo. En la siguiente tabla observaremos el resumen del balance de materia:

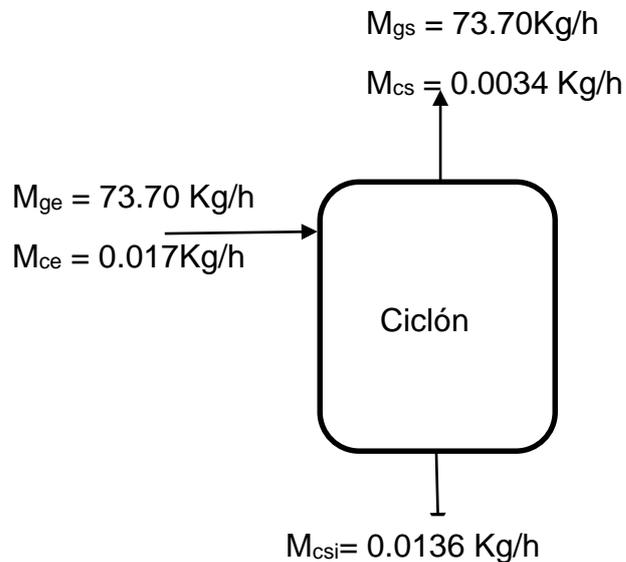
Tabla. 16. Resumen del balance de materia

BALANCE	ENTRA	FORMA	CONSUME	SALE
	Kg	Kg	Kg	Kg
C H <sub>1.31</sub> O <sub>0.68</sub>	24.500	0.000	23.083	1.417
O <sub>2</sub>	10.655	0.000	9.622	1.033
CO <sub>2</sub>	0.000	13.364	5.786	7.577
H <sub>2</sub> O	0.000	4.346	1.031	3.315
H <sub>2</sub>	0.000	0.890	0.247	0.644
CO	0.000	20.089	0.000	20.089
CH <sub>4</sub>	0.000	0.965	0.000	0.965
N <sub>2</sub>	40.085	0.000	0.000	40.085
SUBTOTAL	75.240	39.654	39.769	75.124
TOTAL	114.893		114.893	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1. Balance de materia en el ciclón

El balance en el ciclón se lo pudo realizar mediante diferencia de pesos.



## 4.2. Balance de Energía

Mediante el siguiente balance de energía se conocerá el calor generado en el gasificador.

$$Q = \sum n\Delta H_r + \sum_{25^\circ\text{C}}^{850^\circ\text{C}} H_s - \sum_{25^\circ\text{C}}^{25, 100^\circ\text{C}} H_e \quad (\text{ec. \#26})$$

$$\sum \Delta H_r = \Delta H_{r\text{combustion}} + \Delta H_{r1} + \Delta H_{r2} + \Delta H_{r3} \quad (\text{ec. \#27})$$

$$\Delta H_r = \sum x_i * \Delta H_{f(\text{productos})} - \sum x_i * \Delta H_{f(\text{reactivos})} \quad (\text{ec. \#28})$$

En donde:

$\Delta H_r$  Es la diferencia entalpia de reacción entre sus reactantes y productos.

$H_s$  Es la entalpia de los componentes de salida.

$H_e$  Es la entalpia de los componentes a la entrada.

$Q$  Calor generado en el equipo de gasificación.



**Tabla. 17. Calor de reacción en la reacción de combustión**

Reactantes									
	Estado de la materia	$X_i$ mol	$n_i = m_i/P.M.$ mol - Kg	$H_f$ Kcal/mol-Kg	$H_c$ Kcal/mol-Kg	$H_f^*X_i$ Kcal/mol-Kg	$\sum \Delta H_f^*X_i$ Kcal/mol-Kg	$\Delta H_{rc}$ Kcal/mol-Kg	$n_i^*\Delta H_{rc}$ Kcal
CH <sub>1.31</sub> O <sub>0.68</sub>	Solido	1.00	0.304	-134,304.70	-4,495.00	-134,304.70	-134,304.70	CH <sub>1.31</sub> O <sub>0.68</sub>	
O <sub>2</sub>	Gaseoso	0.99	0.301	0.00	0.00	0.00			
Producto de la combustión									
	Estado de la materia	$X_f$ mol	$n_f = (n_i^*X_f)$ mol - Kg	$H_f$ Kcal/mol-Kg	$H_c$ Kcal/mol-Kg	$H_f^*X_f$ Kcal/mol-Kg	$\sum \Delta H_f^*X_f$ Kcal/mol-Kg	2,106.28	639.72
CO <sub>2</sub>	Gaseoso	1.00	0.304	-94,051.80	0.00	-94,051.80	-132,198.41		
H <sub>2</sub> O	Gaseoso	0.66	0.200	-57,797.90	0.00	-38,146.61			

Fuente: Elaboración Propia



**Tabla. 18. Calor de reacción en la 1° reacción de gasificación.**

Reactantes									
	Estado de la materia	Xi	ni= mi/P.M.	Hf	Hc	Hf*Xi	∑ΔHf*Xi	ΔHr1	ni*ΔHr1
		mol	mol - Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg		
C H1.31 O0.68	Sólido	1.00	0.411	-134,304.70	-4,495.00	-134,304.70	-164,403.29	C H1.31 O0.68	53,331.03
CO2	Gaseoso	0.32	0.131	-94,058.10	0.00	-30,098.59			
Productos									
	Estado de la materia	Xf	nf= (ni*Xf)	Hf	Hc	Hf*Xf	∑ΔHf*Xf	129,798.72	53,331.03
		mol	mol - Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg		
CO	Gaseoso	1.31	0.538	-26,415.70	-67,603.16	-34,604.57	-34,604.57		
H2	Gaseoso	0.65	0.267	0.00	-68,317.40	0.00			

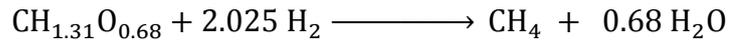
Fuente: Elaboración Propia



**Tabla. 19. Calor de reacción en la 2° reacción de gasificación.**

Reactantes									
	Estado de la materia	Xi	ni= mi/P.M.	Hf	Hc	Hf*Xi	∑ΔHf*Xi	ΔHr2	ni*ΔHr2
		mol	mol - Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg		
C H1.31 O0.68	Sólido	1.00	0.411	-134,304.70	-4,495.00	-134,304.70	-152,800.03	C H1.31 O0.68	48,563.54
H2O	Gaseoso	0.32	0.131	-57,797.90	0.00	-18,495.33			
Productos									
	Estado de la materia	Xf	nf= (ni*Xf)	Hf	Hc	Hf*Xf	∑ΔHf*Xf	118,195.46	48,563.54
		mol	mol - Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg		
CO	Gaseoso	1.31	0.538	-26,415.70	-67,603.16	-34,604.57	-34,604.57		
H2	Gaseoso	0.65	0.267	0.00	-68,317.40	0.00			

Fuente: Elaboración Propia



**Tabla. 20. Calor de reacción en la 3° reacción de gasificación.**

Reactantes									
	Estado de la materia	Xi	ni= mi/P.M.	Hf	Hc	Hf*Xi	ΣΔHf*Xi	ΔHr3	ni*ΔHr3
		mol	mol - Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg		
CH1.31 O0.68	Sólido	1.00	0.060	-134,304.70	-4,495.00	-134,304.70	-134,304.70	CH1.31 O0.68	4,649.97
H2	Gaseoso	2.03	0.122	0.00	-68,317.40	0.00			
Productos									
	Estado de la materia	Xf	nf= (ni*Xf)	Hf	Hc	Hf*Xf	ΣΔHf*Xf	77,123.69	4,649.97
		mol	mol - Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg	Kcal/mol-Kg		
CH4	Gaseoso	1.00	0.060	-17,878.44	-212,798.00	-17,878.44	-57,181.01	77,123.69	4,649.97
H2O	Gaseoso	0.68	0.041	-57,797.90	0.00	-39,302.57			

Fuente: Elaboración Propia

$$H_s = n_s * C_{ps} * \Delta T_s \quad (\text{ec. \#29})$$

**Tabla. 21. Determinación de la entalpía de los componentes de salida**

Componentes a la salida	Estado de la materia	ni	Calor específico (Cp)	ΔT (250 - 850)	ΔHs = ni*Cp*ΔT
		mol - Kg		Kcal/mol-Kg °C	°C
O2	Gaseoso	0.032	4,576.82	600	88,662.84
CO2	Gaseoso	0.172	6,559.08	600	677,566.30
H2O	Gaseoso	0.184	5,197.29	600	574,353.43
H2	Gaseoso	0.322	4,188.89	600	808,746.68
CO	Gaseoso	0.717	4,372.21	600	1,881,487.34
CH4	Gaseoso	0.060	7,241.30	600	261,957.32
N2	Gaseoso	2.863	4,329.55	600	7,437,776.14
Comp.	Estado de la materia	mc	ΔT	Cp	Hcen = mc*CP* ΔT
		Kg	°C	Kcal/Kg °C	KJ
Cenizas ©	sólido	1.400	814	0.34	1.16
					11,730,826.81

Fuente: Elaboración Propia

Para la determinación del calor de los componentes de salida se toma en cuenta los compuestos que conforman el gas y la ceniza eliminada por la parte inferior del gasificador, los calores específicos utilizados se sacaron de la tabla B-2 del libro de Felder. Cuyos cálculos se encuentran adjunto en el anexo A-2.

$$H_e = n_e * C_{pe} * \Delta T_e \text{ (ec. #30)}$$

**Tabla. 22. Determinación de la entalpia de los componentes de la entrada**

Componentes a la entrada	Estado de la materia	ni	Calor específico (Cp)	ΔT	ΔHe = ni*Cp*ΔT
		mol - Kg	Kcal/mol-Kg °C	°C	Kcal
C H1.31 O0.68	Gaseoso	24.5 Kg	5373.17 Kcal/Kg	25 - 25	0.00
Aire	Sólido	1.432	0.007	250 - 25	2.25
					2.25

**Fuente:** Elaboración Propia

La temperatura de ingreso del aire debe estar en un rango de 200°C a 300°C para un menor consumo calorífico por parte del mismo; a parte el gasificador es de flujo descendente por lo que el gas sale por la parte inferior de la garganta y el gas al ponerse en contacto con una superficie de menor temperatura se condensa, reduciendo el poder calorífico del gas de salida. Se trabaja con un valor intermedio de temperatura de 250°C para los cálculos del balance de energía.

De la ecuación #26 se procede a reemplazar los valores para hallar el calor generado en el equipo de gasificación.

$$Q = 107,184.27 \text{ Kcal} + 11'730,826.81 \text{ Kcal} - 2.25 \text{ Kcal}$$

$$Q = 11'838,008.82 \text{ Kcal}$$

$$Q = 49,719.64 \text{ MJ}$$

El calor generado en la conversión del olote del maíz en un gas combustible, o calor liberado al medio ambiente por el gasificador es de 49,719.64 MJ por hora de proceso.

Para la determinación del poder calorífico inferior (PCI) del gas se necesitan tener los porcentajes volumétricos de los compuestos que conforman el gas, los cuales veremos a continuación:

**Tabla. 23. Porcentajes volumétricos de los componentes del gas**

Componentes	%
O2	1.40
CO2	10.28
H2O	4.50
H2	0.87
CO	27.26
CH4	1.31
N2	54.38

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el PCI del gas que se ha obtenido se empleará la siguiente ecuación expuesta por Nogueira y Silva (2004).

$$PCI_{Gas} = 0.126 Y_{CO_2} + 0.358 Y_{CH_4} + 0.108 Y_{H_2} \quad \text{MJ/Nm}^3 \quad (\text{ec. \#31})$$

En donde  $Y_{CO_2}$ ,  $Y_{CH_4}$ , etc. Son las concentraciones molares o porcentajes volumétricos del gas obtenido.

$$PCI_{Gas} = 0.126 (10.28) + 0.358 (1.31) + 0.108 (27.26)$$

$$PCI_{Gas} = 4.7083 \text{ MJ/Nm}^3$$

$$PCI_{Gas} = 4.7083 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1.2727 \text{ Kg}} = 3.6994 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}}$$

## Pérdidas de Calor en el Ciclón

La temperatura del gas disminuye en el ciclón motivo por el cual el gas pierde calor.

$$Q_p = m_g * C_{pg} * \Delta T_g \quad (\text{ec. \#32})$$

En donde:

$Q_p$  Calor perdido o transferido en Kcal.

$m_g$  masa del gas Kg/ hora

$\Delta T_g$  Diferencia de temperatura en el equipo °C

$C_{pg}$  Calor específico del gas Kcal/mol-Kg °C

La temperatura de entrada al ciclón es de 600°C y la de la salida del mismo es de 100°C por lo que tendremos una diferencia de temperatura de 500°C.

Para poder realizar el respectivo cálculo primero tenemos que conocer el calor específico del gas con la siguiente ecuación.

$$C_{pg} = \sum_{i=1}^r z_i * C_{pi} \quad (\text{ec. \#33})$$

En donde

$Z_i$  Fracción molar de los componentes

$C_{pi}$  Calor específico de los componentes Kcal/mol-kg °C

$r$  Número total de componentes de la mezcla del gas.

**Tabla. 24. Determinación del calor específico del gas en el ciclón**

Componentes	Ni	zi	Cpi	Cpi*zi	Cp
	Mol-Kg		Kcal/mol-Kg °C	Kcal/mol-Kg °C	Kcal/Kg °C
O2	0.032	0.17%	2974.47	5.093	162.975
CO2	0.172	0.91%	4125.21	37.674	1657.635
H2O	0.184	0.98%	3363.68	32.855	591.387
H2	0.319	1.69%	2774.07	46.963	93.925
CO	0.717	3.80%	2860.97	108.817	3046.869
CH4	16.000	84.85%	4323.43	3668.447	58695.146
N2	1.432	7.59%	2839.30	215.558	6035.624
Total	18.857				70283.560

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez obtenido el calor específico del gas se procede a calcular el calor perdido en el ciclón.

$$Q_p = 20.11 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 70283.56 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} * -500^\circ\text{C}$$

$$Q_p = - 706'701,195.8 \text{ Kcal/h}$$

### **Pérdidas de Calor en el Tanque de Almacenamiento**

La temperatura del gas disminuye en el tanque de almacenamiento motivo por el cual el gas pierde calor.

$$Q_p = m_g * C_{pg} * \Delta T_g \quad (\text{ec. \#34})$$

La temperatura de entrada del tanque de almacenamiento es de 74°C debido a que el gas también pierde calor al pasar por la tubería que conectan al ciclón con el tanque de almacenamiento, y la de la salida del mismo es de 52.6°C por lo que tendremos una diferencia de temperatura de 21.4°C.

Similar al ciclón se procede a calcular el calor específico del gas a las temperaturas indicadas en el tanque.

**Tabla. 25. Determinación del calor específico del gas en el tanque de almacenamiento**

Componentes	Ni	Zi	Cpi	Cpi*zi	Cp
	Mol – Kg		Kcal/mol-Kg °C	Kcal/mol-Kg °C	Kcal/Kg °C
O2	0.032	0.17%	149.47	0.256	8.190
CO2	0.172	0.91%	186.99	1.708	75.136
H2O	0.184	0.98%	171.52	1.675	30.156
H2	0.319	1.69%	147.52	2.497	4.995
CO	0.717	3.80%	148.30	5.641	157.935
CH4	16.000	84.85%	178.47	151.432	2422.918
N2	1.432	7.59%	148.45	11.270	315.570
Total	18.857				3014.900

Fuente: Elaboración propia.

$$Q_p = 20.11 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 3014.9 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} * -21.4^\circ\text{C}$$

$$Q_p = - 1'297,474.27 \text{ Kcal/h}$$

#### 4.2.1. Eficiencia del Gasificador

Para las aplicaciones de los gasificadores se han tomado en cuenta dos conceptos diferentes de eficiencia, se hablara de la eficiencia térmica y de la eficiencia de potencia. (Coronado Rodriguez, Luz Silveira, & Arauzo Perez, 2006)

Eficiencia Térmica.- Es aquella en donde se aprovecha la energía térmica de los gases, un ejemplo de ello es cuando los gases son quemados directamente en un horno. (Coronado Rodriguez, Luz Silveira, & Arauzo Perez, 2006)

$$E_{ft} = \frac{7.10514 * Q_g + m_g * C_{pg} * \Delta T_g}{m_{bio} * PCI_{bio}} \quad (\text{ec. \#40})$$

En donde:

$Q_g$	Calor o potencia generada por el gas. (MJ/h)
$m_{bio}$	Masa de entrada de biomasa al gasificador Kg
$PCI_{bio}$	Poder calorífico inferior de la biomasa MJ/Kg de biomasa
$m_g$	Masa del gas producido en Kg
$C_{pg}$	Calor específico del gas MJ/Kg °C
$\Delta T_g$	Diferencia de temperatura del gas a la salida

Eficiencia de potencia.- Es aquella donde el gas es empleado en aplicaciones de potencia; es cuando el gas debe ser acondicionado (remoción de partículas sólidas y alquitranes), para su posterior uso. Un ejemplo es cuando se lo utiliza en motores de combustión interna y turbinas a gas. (Coronado Rodriguez, Luz Silveira, & Arauzo Perez, 2006)

$$E_{fp} = \frac{7.10514 * Q_g}{m_{bio} * PCI_{bio}} \quad (\text{ec. \# 41})$$

En donde:

$Q_g$	Calor o potencia generada por el gas. (MJ/h)
$m_{bio}$	Masa de entrada de biomasa al gasificador Kg
$PCI_{bio}$	Poder calorífico inferior de la biomasa MJ/Kg de biomasa

La eficiencia que vamos a calcular será la eficiencia de potencia debido a que el gas será ocupado como combustible para secar grano de maíz.

$$E_{fp} = \frac{7.10514 * 48.7137 \text{ MJ/h}}{24.5 \frac{\text{Kgbiomasa}}{\text{hr}} * 17.73 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} \text{ de biomasa}} = 79.68 \%$$

### 4.3. Resultados de la experimentación.

Se procedió a realizar tres pruebas o corridas en el equipo de gasificación con el objetivo de recopilar los resultados para un análisis exhausto de sus parámetros óptimos de funcionamiento

#### Datos del equipo de la Prueba #1

Hora de encendido de la biomasa en el interior del gasificador: 1: 12 pm

Masa de olote: 6.1 Kg

#### Datos iniciales

Temperatura de la garganta de oxidación: 610 °C

Temperatura del gas en el tanque de almacenamiento: 30.2 °C

Temperatura del gas en la zona de pirolisis y secado: 59.3 °C

Temperatura del gas a la salida del tanque de almacenamiento: 26.5 °C

Hora en que el gas alcanza la temperatura de encendido: 2: 25 pm

Flujo de aire a la entrada de la garganta de oxidación: 0.1 m/s

**Tabla. 26. Datos de la prueba #1**

Pruebas		1	2	3
T <sub>gox</sub>	° C	800.3	853.5	834.0
T <sub>gta</sub>	° C	-	-	-
T <sub>gzp</sub>	° C	75.8	75.3	80.3
T <sub>gsta</sub>	° C	-	-	-
V <sub>sg</sub>	m/s	-	-	-

Fuente: Elaboración Propia

Hora de finalización de la prueba: 3: 05 pm

**Nota.-** En esta prueba se tuvo problemas para hacer que el gas llegue al tanque de almacenamiento debido a la velocidad del aire (0.1 m/s), a la entrada de la garganta de oxidación. Se pudo obtener el gas de bajo poder calorífico pero en el equipo principal por la parte superior.

### Datos del equipo de la Prueba # 2

Hora de encendido de la biomasa en el interior del gasificador: 5: 25 pm

Masa de olote: 6.2 Kg

#### Datos iniciales

Temperatura de la garganta de oxidación: 683 °C

Temperatura del gas en el tanque de almacenamiento: 38.8 °C

Temperatura del gas en la zona de pirolisis y secado: 68 °C

Temperatura del gas a la salida del tanque de almacenamiento: 28.7 °C

Hora en que el gas alcanza la temperatura de encendido: 5: 35 pm

Flujo de aire a la entrada de la garganta de oxidación: 23 m/s

**Tabla. 27. Datos de la prueba #2**

Pruebas		1	2	3	4	5	6
<b>T<sub>gox</sub></b>	° C	1110.5	1110.0	1123.0	1116.8	1111.0	1114.3
<b>T<sub>gta</sub></b>	° C	50.2	58.7	58.8	58.5	58.7	57.0
<b>T<sub>gzp</sub></b>	° C	88.8	88.8	88.8	90.5	90.9	119.8
<b>T<sub>gsta</sub></b>	° C	40.3	42.0	42.0	42.8	42.0	41.8
<b>V<sub>sg</sub></b>	m/s	5.4	5.6	5.6	5.4	5.3	5.5

**Fuente:** Elaboración Propia

Hora de finalización de la prueba: 6: 25 pm

### Datos del equipo de la Prueba # 3

Hora de encendido de la biomasa en el interior del gasificador: 3: 52 pm

Masa de olote: 24.5 Kg

#### Datos iniciales

Temperatura de la garganta de oxidación: 683 °C

Temperatura del gas en el tanque de almacenamiento: 38.5 °C

Temperatura del gas en la zona de pirolisis y secado: 42.5 °C

Temperatura del gas a la salida del tanque de almacenamiento: 33.8 °C

Hora en que el gas alcanza la temperatura de encendido: 4: 13 pm

Flujo de aire a la entrada de la garganta de oxidación: 23 m/s

**Tabla. 28. Datos de la prueba #3**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{gox}$	° C	1107	1107	1110	1121	1113	1122	1124.7	1127	1112	1109
$T_{gta}$	° C	39.7	40.3	42.0	42.8	46.2	46.4	48.3	49.6	50.7	52.1
$T_{gzp}$	° C	88.8	88.8	88.8	89.3	90.5	92.3	92.9	94.6	99.7	99.7
$T_{gsta}$	° C	33.8	33.6	33.8	35.1	35.9	36.4	36.8	36.5	36.7	37.7
$v_{sg}$	m/s	5.1	5.3	5.1	5.6	5.4	5.6	5.1	5.4	5.2	5.1

**Fuente:** Elaboración Propia

Hora de finalización de la prueba: 5: 03 pm

**Nota.-** Los datos tomados en cada prueba se hicieron en un intervalo de 5 minutos.

#### **4.4. Análisis de Resultados**

Previo al análisis hay que tener muy en cuenta las siguientes consideraciones.

El contenido de humedad del olote del maíz también es un factor determinante para la calidad del gas producido, debido a que hay un consumo de energía innecesaria por parte del agua contenida en la biomasa, porque el agua requiere cerca de 2300 KJ/Kg para vaporizarse y 1500 KJ/Kg para subir hasta 700 °C que es la temperatura que se necesita que se alcance en la zona de pirolisis, generando un gasto de energía al proceso, ocasionando que disminuya el rendimiento del gasificador y aumentando la cantidad de alquitranes producidos.

El gas obtenido es una mezcla de moléculas de hidrogeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etc. Que se produce en la zona de pirolisis por la descomposición de las grandes moléculas de celulosa, hemicelulosa y lignina, en moléculas de tamaño medio y carbono; estas moléculas de tamaño medio caen a la zona de oxidación y se descomponen en moléculas aún más pequeñas que son las que forman parte del gas obtenido.

Dentro de los parámetros óptimos a considerar para la obtención de un gas combustible de excelente propiedades en el sistema de gasificación es, el tiempo de permanencia de las moléculas de tamaño medio en la zona de oxidación y la temperatura de dicha zona; porque a tiempos de permanencias demasiados cortos o temperaturas bajas de la zona de oxidación estas moléculas tenderían a escapar a partes de menor temperatura del sistema de gasificación y condensarse en formas de alquitranes.

En el análisis de resultados hay que recalcar que los cálculos del diseño se hicieron tomando en cuenta condiciones ideales de operación, por lo que se realizara una comparación entre los datos de diseño y los datos obtenidos en las pruebas, para verificar concordancia entre estos datos.

Mediante la comparación de estos datos, se puede analizar las variaciones y sus causas que pueden surgir en el desempeño del sistema de gasificación.

El balance de materia indica que la cantidad de gas producido es de 33.623 Kg por hora, pero en la práctica se obtuvo en 50 min de operación del equipo, y el resto del tiempo (10 min), se producen gases inquemados que no sirven como combustible, por lo que en los 50 minutos de operación solo se producirá 28.019 Kg/ 50 min.

**Tabla 29. Comparación entre datos experimentales y analíticos del sistema de gasificación.**

Datos	Unidades	Analíticos	Experimentales
Masa de gas	Kg/50min	28.019	16.759
Masa de cenizas	Kg/h	73.708	52.4
Humedad de biomasa pre - tratada	%	20	25
Temp. de gasificación	°C	850	1000-1110

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar existe una amplia variación en los datos obtenidos en la experimentación, debido a que la humedad de la biomasa es mayor a la que se usó como referencia, ocasionando un mayor consumo de energía en el sistema y bajando la calidad del gas, otro factor que hay que considerar es la temperatura de gasificación, se alcanzaron temperaturas mayores de 850 °C provocando un mayor craqueo y reduciendo a partículas más pequeñas las moléculas de celulosa, hemicelulosa y lignina; disminuyendo el tiempo de permanencia y generándose más cantidades de alquitranes y aceites condensables que salen por la parte inferior del gasificador y por las fugas de la tubería. Que la podremos ver en la figura 16 que se encuentra en la parte inferior.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 16. Alquitranes y aceites condensados de la parte inferior del gasificador**

En términos generales los gasificadores se pueden usar para brindar combustible a motores de combustión interna, a calderas, equipos de secado, etc. En la investigación se ha destinado a el gas pobre (syngas), como sustituto del gas licuado del petróleo en el proceso de secado del grano, por eso se procederá a realizar una análisis energético de los gases expuestos.

Mediante la investigación realizada a las empresas del cantón Quevedo que se dedican a secar el grano de maíz se pudo saber que la cantidad promedio de grano de maíz que secan por periodo es de 2000 Kg, por lo que se procedió a calcular la cantidad de GLP necesario para poder secar 2000 Kg de grano de maíz.

$$Q_{sm} = PCI_{GLP} * m_{GLP} \quad (\text{ec. \#35})$$

$Q_{sm}$  Calor necesario para secar 2000 Kg de grano de maíz

$PCI_{glp}$  Poder calorífico inferior de GLP en MJ/Kg

$m_{GLP}$  Masa de gas licuado de petróleo Kg

El calor necesario para secar 2000Kg de grano de maíz es 174.06 MJ/h y el PCI del GLP es el siguiente 49.404250 MJ/Kg.

$$m_{GLP} = Q_{Sm}/PCI_{GLP} \quad (\text{ec. \#36})$$

$$m_{GLP} = \frac{174.06 \text{ MJ/h}}{49.404250 \text{ MJ/Kg}}$$

$$m_{GLP} = 3.5231 \text{ Kg/h de GLP}$$

Ahora calcularemos la cantidad de gas necesario para secar los 2000 Kg de grano de maíz.

$$Q_{sm} = PCI_{gas} * m_{gas} \quad (\text{ec. \#37})$$

$$m_{gas} = Q_{Sm}/PCI_{gas} \quad (\text{ec. \#38})$$

$$m_{gas} = \frac{174.06 \text{ MJ/h}}{3.6994 \text{ MJ/KG}}$$

$$m_{gas} = 47.4349 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{ de gas}$$

Mediante la experimentación realizada se pudo comprobar que 1Kg de olote de maíz produce 0.53747 m<sup>3</sup> de gas, por lo que podemos decir que 47.4349 Kg/h de gas se producen a partir de:

$$m_{\text{olote de maíz}} = 69.34518 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \text{ de olote del maíz}$$

Que sería la cantidad de olote de maíz necesaria para igualar a la misma cantidad de energía producida por el GLP para secar los 2000 Kg grano de maíz.

$$\text{Relación masica} = \frac{\text{Kg de olote de maíz para secar 2000Kg de grano de maíz}}{\text{Kg de GLP para secar 2000Kg de grano de maíz}} \quad (\text{ec. \#39})$$

$$\text{Relación masica} = \frac{69.34518 \text{ KG de olote de maíz}}{3.5231 \text{ Kg de GLP}} = 19.683 \frac{\text{Kg olote de maíz}}{\text{Kg GLP}}$$

Mediante esta relación podemos decir que se necesitan 19.683 Kg de olote de maíz para igualar la cantidad de energía producida por 1 Kg de GLP.

#### **4.5. Costo del Sistema de Gasificación.**

En este punto veremos el costo de todo el sistema de gasificación desde su diseño, selección y construcción del equipo, hasta todos accesorios involucrados, así como las tubería, codos, uniones, válvulas y bridas; considerando el tiempo de construcción y montaje.

Para poder realizar el análisis del costo del equipo se procedió a cotizar los precios de los materiales a utilizar, así como también los lugares donde se podría realizar la construcción y montaje del equipo.

##### **4.5.1. Costo Total de Fabricación.**

El costo total de fabricación es la suma de todos los costos sean estos de forma directa e indirecta que contribuyeron a la fabricación del gasificador.

Costo de fabricación = Mano de obra directa + Materia prima directa + costos indirectos de fabricación

$$C.F. = M.O.D. + M.P.D. + C.I.F. \text{ (ec. \#42)}$$

A continuación daremos una pequeña explicación acerca de los costos directos e indirectos de fabricación, con sus respectivos valores.

#### **4.5.1.1. Costos directos de fabricación.**

Es el costo de los recursos disponibles que se incorporan en la construcción del sistema de gasificación. El costo directo de fabricación como su nombre lo dice afecta directamente al precio final del sistema de gasificación y está constituido por los siguientes rubros:

##### **4.5.1.1.1. Mano de obra directa**

Es el esfuerzo físico y mental que realizan el soldador, encargado del ensamblaje y el ayudante, con el fin de transformar los materiales utilizados en los respectivos equipos pertenecientes al sistema de gasificación. Para este proyecto el costo de la mano de obra empleado para la construcción del sistema de gasificación es de: \$ 600.00 USD.

##### **4.5.1.1.2. Materia prima directa**

Es el costo de los materiales usados para la construcción del sistema de gasificación, estos valores se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla. 30. Costo de los materiales utilizados para el equipo de Gasificación**

<b>Unid.</b>	<b>Material</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio Total</b>
2	Planchas de acero negro de 3 mm de espesor.	\$ 42.23	\$ 84.46
2	Tanques de acero que se usan para almacenar Lubricantes	\$ 10.00	\$ 20.00
40	Pernos y Tuercas	\$ 0.12	\$ 4.80
1	Tubo de 2 in Ø de acero inoxidable de 3 mm de Espesor, 4 m de largo.	\$ 26.21	\$ 26.21
1	Tubo Cuadrado de 5 mm de espesor y 2 m de largo.	\$ 18.93	\$ 18.93
1	Tubo de ½ in Ø y 55 cm de largo	\$ 5.00	\$ 5.00
1	Tubo de 1 in Ø y 2 m de largo	\$ 16.02	\$ 16.02
1	Válvula bola Giacomini de 2in Ø	\$ 32.74	\$ 32.74
1	Válvula bola Giacomini de 1 ½ in Ø	\$ 20.35	\$ 20.35
1	Válvula bola Giacomini de 1in Ø	\$ 9.31	\$ 9.31
1	Válvula bola Giacomini de 3/4 in Ø	\$ 6.36	\$ 6.36
2	Tapón de acero inoxidable de 2 in Ø	\$ 2.00	\$ 4.00
3	Neplos de acero inoxidable de 1 ½ in Ø de 10 cm De largo.	\$ 2.00	\$ 6.00
4	lb de electrodos 6011	\$ 2.91	\$ 11.64
2	Discos para pulir	\$ 3.50	\$ 7.00
1	Malla de acero inoxidable de 3 mm de espesor, 60 x 60 cm	\$ 8.00	\$ 8.00
1	Plancha de caucho de 15 mm de espesor, 1 x 1 m	\$ 32.00	\$ 32.00
3	Sondas termopares tipo K	\$ 10.00	\$ 30.00
1	Termómetro digital para el acople de sondas Termopares	\$ 92.00	\$ 92.00
1	Anemómetro digital	\$ 50.00	\$ 50.00
1	Blower de 3 in Ø en la salida	\$ 80.71	\$ 80.71
1	Antorcha	\$ 10.00	\$ 10.00
1	Llave boca y corona numero 11	\$ 2.00	\$ 2.00
1	Manguera de negra de 2 in * 1 m	\$ 1.36	\$ 1.36
1	Reductor de manguera de PVC 3 in a 2 in	\$ 1.43	\$ 1.43
1	Reductor de manguera de PVC 2 in a 1 in	\$ 1.31	\$ 1.31
2	Abrazadera 2 - 1 para 2 in	\$ 0.37	\$ 0.74
1	Abrazadera 3 - 1 para 2 in	\$ 0.46	\$ 0.46
4	Teflón	\$ 0.53	\$ 2.12
<b>Fuente:</b> Elaboración propia		<b>Total</b>	<b>\$ 584.95</b>

El costo de la materia prima directa es de \$ 584.95 USD

#### 4.5.1.2. Costos indirectos de fabricación.

Son los costos de los recursos que no forman parte de la construcción del sistema de gasificación, pero que se necesitan para que el mismo sea construido. Dentro de este rubro tenemos los costos de la ingeniería del proyecto

**Tabla. 31. Costos de la ingeniería del proyecto.**

		Tiempo utilizado (horas)	Valor económico (hora)	Costo total USD.
<b>Estudiante</b>	Investigación	112.00	3.43	384.16
	Calculo	82.00	3.43	281.26
	Cotización	16.00	3.43	54.88
<b>Movilización</b>		No aplica	No aplica	150.00
<b>Artículos de oficina</b>		No aplica	No aplica	67.00
<b>Servicios básicos</b>		No aplica	No aplica	117.00
<b>Otros</b>		No aplica	No aplica	80.00
<b>TOTAL</b>				<b>1,134.30</b>

Fuente: Elaboración Propia

El costo indirecto de fabricación es de: \$1,248.62 USD.

Hay que tener presente que la dificultad de construir un gasificador es baja, por lo que se podría construir en talleres metalmecánicos convencionales, pero se requiere experiencia y un prolongado período de ajuste para llevar el sistema a sus condiciones óptimas de operación por tal razón buscamos para construir el equipo a la empresa Jatun Huayra Cía. Ltda. De la ciudad de Quevedo.

**Tabla. 31. Cuadro resumen de los costos de gasificación**

<b>Proyecto:</b>	Gasificador de desechos de maíz	
<b>Constructor:</b>	Cristhian Almeida Murillo	
<b>Materiales</b>		Dólares
Total		<b>\$ 584.95</b>
<b>Mano de obra</b>		Dólares
Total	Soldador	\$ 300.00
	Ayudante	\$ 150.00
	Encargado de ensamblar	\$ 150.00
		<b>\$ 600.00</b>
<b>Ingeniería del proyecto</b>		Dólares
Total		<b>\$ 1,134.30</b>
<b>Valor Total</b>		<b>\$ 2,318.30</b>

Fuente: Elaboración propia

El costo total de fabricación es de 2,318.30 dólares.

#### 4.6. Rentabilidad del Proyecto

La importancia de cada proyecto radica en su rentabilidad, motivo por el cual el presente proyecto se enfocó en la sustitución del GLP como combustible para los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano de maíz, por el gas producido en el gasificador a partir de desechos del maíz.

Para poder determinar la rentabilidad del proyecto debemos saber el valor económico del GLP como combustible, en el uso mensual de una de los centros de acopio del cantón Quevedo que almacenan y secan el grano de maíz. Sabiendo previamente que el costo de GLP es de \$ 5.01 USD por cada 15 Kg para fines de secado de grano.

En un día laboral los centros de acopio de almacenamiento y secado del grano de maíz, realizan dos veces el secado en un periodo que va desde 7 horas y media a 8 horas y 20 minutos, dependiendo de la humedad del grano del maíz varia este tiempo. La cantidad de GLP que se necesita para secar 2000Kg de grano de maíz es de 3.5231 Kg/hora.

$$3.5231 \frac{\text{KG GLP}}{\text{hora}} * \frac{8 \text{ horas}}{1 \text{ periodo}} * \frac{2 \text{ periodos}}{1 \text{ dia}} * \frac{26 \text{ dias laborales}}{1 \text{ mes laboral}} * \frac{12 \text{ meses laborales}}{1 \text{ año}} * \frac{\$ 5.01}{15 \text{ Kg}}$$

$$= \$ 5,874.16 \text{ dolares/año}$$

El costo anual en el consumo de GLP para el secado de grano de maíz es de \$ 5,874.16 dólares.

El Grano de maíz se comercializa a las empresas alimenticias con un contenido de humedad de 13 % y con 1 % de impurezas a un valor económico de \$15.90 dólares por cada 45.36 Kg de grano de maíz.

Los centros de acopio de grano de maíz del cantón Quevedo compran el grano de maíz a los agricultores con un porcentaje de humedad de 30% al 32% de humedad a un valor económico de \$10.00 dólares por cada 45.36 Kg. Por lo que tienen que secar el grano hasta la humedad necesaria para su comercialización a las empresas alimenticias, el costo por secar 1 kg de grano de maíz en un secador circular artesanal (ver foto en anexo 4), es de \$ 0.016426 centavo de dólar, valores obtenidos de una entrevista con el centro de acopio Coronado Domínguez, ubicado en la parroquia San Carlos del cantón Quevedo.

Los centros de acopio consultados del cantón Quevedo secan anualmente 1,248 toneladas métricas de grano de maíz promedio, lo que representan un valor económico de \$ 20,499.65 dólares anuales y un consumo anual de GLP de 17,587.31 Kg.

Con la construcción del gasificador el consumo de olote de maíz anual seria de 346,171.12 Kg para satisfacer la demanda anual de las 1,248 toneladas métricas de grano de maíz secadas en los centros de acopio del cantón Quevedo.

El olote de maíz es un recurso desechado y no tiene valor económico ponderado, por lo que su valor sería puesto por los mismos centros de acopio que compran el grano de maíz en el cantón Quevedo, que sería un valor mínimo. Para el estudio del proyecto se fijó un precio de \$ 0.005 centavo de dólar por cada kilogramo de olote de maíz, lo que representa un valor anual de \$ 1,730.86 dólares por los 346,171.12 Kg anuales de olote de maíz.

**Tabla.32. Comparación de consumo entre combustibles para un secador circular artesanal**

Meses	Gas Licuado de Petróleo		Olote de Maíz	
	Consumo en Kg	Valor económico en USD	Consumo en Kg	Valor económico en USD
Enero	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Febrero	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Marzo	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Abril	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Mayo	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Junio	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Julio	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Agosto	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Septiembre	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Octubre	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Noviembre	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
Diciembre	1465.61	\$ 489.51	28847.60	\$ 144.24
<b>Fuente: Elaboración Propia</b>		<b>\$ 5,874.16</b>		<b>\$ 1,730.86</b>

La diferencia anual en el costo del combustible para un secador circular artesanal es de \$ 4,143.31 utilizando el gasificador Down-Draft. Con el sistema de gasificación se ahorra el valor por la compra del GLP anual, y que ese ahorro cubriría el gasto del sistema de gasificación en no más de 6 meses, pero debido a los costos por mantenimiento y operación del equipo el ahorro se daría en el año posterior al de implementación del gasificador Down-Draft.

#### 4.7. Comprobación de la Hipótesis

1.- Con el diseño de un gasificador de desechos del maíz se ayuda al desarrollo productivo de los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del

almacenamiento y secado del grano de maíz mediante mecanismos y parámetros óptimos de funcionamiento.

Esta hipótesis es válida, debido a que con un diseño de un gasificador adecuado y ajustado a las características de biomasa que ellos deseen utilizar, potencia no solo su economía, sino también la innovación y la investigación para los usos de diferentes desechos que no son usados, pudiendo aprovechar su capacidad calorífica.

2.-La fabricación de un gasificador de desechos del maíz reduce los gastos a los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan del almacenamiento y secado del grano de maíz por la compra de GLP.

Esta hipótesis es válida, debido que con la fabricación de una gasificador de desechos de maíz se ahorra el valor por la compra del GLP anual, a los centros de acopio que se encargan de almacenar y secar el grano del maíz, y que ese ahorro cubriría el gasto del sistema de gasificación en no más de 6 meses de funcionamiento del equipo de gasificación.

3.-Las características físicas y químicas que poseen los desechos del maíz son óptimas para obtener un gas combustible con buen poder calorífico.

Esta hipótesis es válida, debido a que el olote de maíz cumple con las características físicas y químicas para el funcionamiento en un gasificador Down – draft, brindándonos un gas combustible con un poder calorífico que permite su utilización en secadores circulares artesanales.

4.-La creación de un manual de operación permite un correcto desempeño y manejo del sistema de gasificación de desechos del maíz.

Esta hipótesis es válida, debido que en ausencia de un manual no se podría encender correctamente el equipo y no se podría producir el gas de manera eficiente.

## CONCLUSIONES

El desarrollo productivo de los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan de almacenar y secar el grano de maíz se ve potenciado gracias a el diseño de un gasificador para desechos del maíz, no solo porque les ayuda económicamente, sino también les abre las puertas a la innovación y búsquedas de nuevas fuentes de combustible biomásicos que no son tomados en cuenta y que su valor económico no está ponderado, dando un nuevo impulso económico al desarrollo de sus actividades.

El GLP como combustible nos brinda grandes beneficios debido a tener un alto poder calorífico, pero su uso a niveles industriales genera grandes gastos a los centros de acopio del cantón Quevedo que se encargan de almacenar y secar el grano de maíz, por lo que la fabricación de un equipo de gasificación de desechos de maíz que genere un gas combustible es muy rentable debido a que el gasto anual que representaría la compra de GLP, cubrirían los gastos de fabricación del equipo, generando ganancia con el pasar de los años.

El gasificador Down – Draft es uno de los equipos que mejor se adapta a las características químicas y físicas del olote del maíz como recurso biomásico, debido que nos permite obtener gases con menos contenido de alquitranes, y también permite generar un gas pobre que alcanza potencias de 4 a 7 mega watts permitiendo una variedad de usos para el gas producido.

El olote del maíz utilizado como un recurso biomásico para la generación de gas pobre mediante el proceso de gasificación brinda ventajas ambientales, un ejemplo de ello, es que el olote del maíz ayuda a reducir los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera, al actuar como recipiente y pudiendo aumentar la concentración de carbono en los suelos.

## RECOMENDACIONES

Para un buen rendimiento del sistema de gasificación se recomienda trabajar dentro de los parámetros óptimos de gasificación que son humedad de la biomasa del 20%, temperatura de la zona de oxidación mayor a 800 °C y un mayor tiempo de permanencia de las moléculas de tamaño medio de la biomasa.

Realizar limpiezas periódicamente del sistema de gasificación, porque se pueden ocasionar obstrucciones en la tubería por los alquitranes que se han producido en el proceso, se recomienda realizar una limpieza al mes. Evitar las pérdidas de gas por las uniones de la tubería. Ya que el gas al ponerse en contacto con una superficie de menor temperatura se condensa y terminaremos ensuciando el área de trabajo por las pérdidas del gas.

Para la utilización del gasificador para motores de combustión interna o equipos que utilicen combustibles que cumplan con altos estándares de calidad, es recomendable usar un sistema de filtros (filtro de mangas son los que mejores resultados han dado), que eliminen en su mayor parte el alquitrán presente en el gas pobre producido.

Se incentiva a que se siga investigando e innovando los sistemas de gasificación, debido a que es una tecnología que ofrece mucho en perspectivas medio ambientales, y que mientras mejor sea su eficiencia mayor será su uso.

Experimentar con diferentes tipos de desechos agrícolas en la utilización de los sistemas de gasificación, aprovechando así su poder calorífico y generar beneficios a diferentes sectores industriales con la implementación de los sistemas de gasificación.

## GLOSARIO

**Pirólisis.** Descomposición química de la materia orgánica, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. (Wikipedia, 2014)

**Lignocelulosa.-** La combinación de la lignina, hemicelulosa y celulosa que forma el marco estructural de las paredes celulares de plantas. (Wikipedia, 2014)

**Caroteno.-** Sustancia amarilla, roja o naranja del grupo carotenoide con función antioxidante, que se encuentra principalmente en las plantas, como la zanahoria, el boniato, los vegetales de hojas verde oscuro y en muchas frutas, granos y aceites. (Academic, 2012)

**Amiláceo.-** (Del griego amydon, almidón). Que contiene almidón. (Dery, 2005 - 2011) (Academic, 2012)

**Prótidos.-** O proteínas son principios inmediatos orgánicos formados por carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. (Academic, 2012)

**Lípidos.-** Son biomoléculas orgánicas formadas básicamente por carbono e hidrógeno y generalmente también oxígeno; pero en porcentajes mucho más bajos. Además pueden contener también fósforo, nitrógeno y azufre. (Valdez Valencia, 2006)

**Syngas (Gas Pobre).-** Es un gas combustible, mezcla que consiste principalmente de hidrógeno, monóxido de carbono, y muy a menudo de dióxido de carbono. El nombre proviene de su uso como productos intermedios en la creación de gas natural sintético (SNG) y para la producción de amoníaco o metanol. (Wikipedia, 2014)

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Academic. (13 de enero de 2012). Enciclopedia Universal. Obtenido de Enciclopedia Universal: [http://enciclopedia\\_universal.esacademic.com/](http://enciclopedia_universal.esacademic.com/)
- Castells, X. E. (2012). Biomasa y Bioenergía. En X. E. castells, Energía, agua, medio ambiente, territorialidad y sostenibilidad (Vol. 1, págs. 739 - 762). Madrid - España, España: Díaz Santos.
- Castells, X. E., & Velo, E. (2012). La Gasificación. En X. E. Castells, & E. Velo, Tratamiento y valorización energética de Residuos (pág. 90). Madrid: Diaz de Santos
- Centro de Investigación Energética de los Países Bajos. (1 de junio de 2014). Phyllis2, la base de datos para la biomasa y los residuos,. Obtenido de Phyllis2, la base de datos para la biomasa y los residuos,: <https://www.ecn.nl/phyllis2>
- Coronado Rodriguez, C., Luz Silveira, J., & Arauzo Perez, J. (2006). Aspectos Constructivos y Estudio Economico, Financiero de un Gasificador de Biomasa Lignocelulosica Down-Drat de 100Kg/h . Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2006, 5 - 7 .
- Dery, B. ( 2005 - 2011). El Diccionario Visual. Obtenido de Infovisual: [http://www.infovisual.info/01/049\\_es.html](http://www.infovisual.info/01/049_es.html)
- FAO. (21 de Agosto de 2012). Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 22 de Mayo de 2013, de Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s03.htm#2.5>. diseño de gasificadores de tiro invertido
- Huaraz Choi, C. Y. (2013 ). Diseño de un gasificador de 25 KW para aplicaciones domesticas usando como combustible cascarilla de arroz. Lima: Pontefeci catolica.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. (2007). Biomasa: Gasificación. Madrid: IDAE.

- Khaldse, A., Parulekar, P., Aghalayam, P., & Ganesh, A. (2012). Modified Thermodynamic Equilibrium Model for Biomass Gasification: A Study of the Influence of Operating Conditions. ACS Publications, 26.
- Lopez, C., Ulloa, C., Ramirez, J., & Ramirez, J. (2011). Diseño de un gasificador de cascarilla de arroz. Cali - Colombia: Universidad Autonoma de Occidente.
- Miliarium. (24 de Julio de 2008). Miliarium, Ingenieria civil y Medio Ambiente. Recuperado el 22 de Mayo de 2013, de Miliarium, Ingenieria civil y Medio Ambiente : <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Energia/EnergiasRenovables/Biomasa/Welcome.asp>
- Paliwal, R., Granados, G., Lafitte, H. R., & Marathée, J. P. (2001). El maíz en los trópicos mejoramiento y producción. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.
- Podolski, W., Schmalzer, D., Conrad, V., Lowenhaupt, D., Klunder, H., Klunder, E., . . . Benson, C. (2008 - 1934). Energy, Resources, Conversion, and utilization. En W. Podolski, D. Schmalzer, V. Conrad, D. Lowenhaupt, H. Klunder, E. Klunder, . . . C. Benson, Perry's Chemical Engineers' (pág. 61). United States of America: McGraw-Hill.
- Reed, T. B., & Das, A. (1998). Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. En R. T. Solar Energy Research Institute, & A. Das, Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Solar Energy Research Institute (págs. 33 - 70). Golden, Colorado.
- Rincón, S., Gómez, A., & Klose, W. (2011). Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Kassel - Alemania: Kassel university press GmbH.
- San Camilo Comercializadora de Granos S.A. . (17 de Marzo de 2010). San Camilo. Recuperado el 24 de Abril de 2014, de <http://www.sancamilo.com.ec/maiz.html>
- Sebastián Nogues, F., García Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). Energia de Biomasa (Vol. 1). Zaragoza - España, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.

Valdez Valencia, A. F. (16 de diciembre de 2006). Monografias. Obtenido de monografias: <http://www.monografias.com/trabajos16/lipidos/lipidos.shtml>

Wikipedia. (29 de junio de 2014). Wikipedia The Free Encyclopedia. Obtenido de Wikipedia The Free Encyclopedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)

ANNELEXOSS

## ANEXO 1

### A. Cálculos Previos en el Diseño del Gasificador

Mediante una profunda investigación de los parámetros para el diseño de un gasificador, se procedió a realizar los cálculos necesarios para diseñar el equipo de gasificación, para el desarrollo de cada cálculo se usó el programa de Microsoft Excel, a partir de esos cálculos se realizó un pequeño simulador que se adjuntara a la tesis.

Cantidad de olote de maíz por hora: 24.5 Kg/hr

Tabla. 33. Análisis elemental del olote de maíz

Elementos	Unidad	Base seca	Base húmeda
Carbono	% en peso	48,8	49,29
Hidrogeno	% en peso	5,38	5,43
Nitrógeno	% en peso	0,4	0,4
Oxigeno	% en peso	44,42	44,87

Fuente: Elaboración Propia

Teniendo el análisis elemental del olote del maíz, podremos sacar la composición química del olote de maíz. Para ello debemos dividir el porcentaje en peso de base seca por su peso molecular. Una vez realizado ese cálculo se procede a dividir cada elemento sobre el valor de carbono que nos dio. A continuación presentamos la tabla de los cálculos:

Tabla. 34. Composición Química del olote de maíz

Elemento	Símbolo	Composición molar del olotes del maíz	Composición química del olote del maíz	Representación
Carbono	C	4.07	1.00	CH <sub>1.32</sub> O <sub>0.68</sub>
Hidrogeno	H	5.38	1.32	
Nitrógeno	N	0.03	0.01	
Oxigeno	O	2.78	0.68	

Fuente: Elaboración Propia.

Al nitrógeno no se lo toma en cuenta en la composición química del olote del maíz por encontrarse en una cantidad muy pequeña.

### B. Cálculo Del Oxígeno Necesario Para Una Combustión En El Gasificador

Como base de cálculo tomaremos 1 hora.



Tabla. 35. Estequiometria de la reacción de oxidación

Entran					Salen				
Reactantes	Kg	P.M.	Xi	ni= mi/P.M.	Producto de la combustión	P.M.	Xf	nf= (ni/Xf)*xf	Kg
		Kg/kmol - Kg	mol	mol - Kg		Kg/kmol - Kg	mol	mol - Kg	
CH <sub>1.31</sub> O <sub>0.68</sub>	24.500	24.2	1.000	1.012	CO <sub>2</sub>	44	1.000	1.012	44.545
O <sub>2</sub>	32.073	32.0	0.990	1.002	H <sub>2</sub> O	18	0.660	0.668	12.027

Fuente: Elaboración Propia

Para poder saber la cantidad de masa de aire que se necesita, tendríamos que saber el peso molecular medio del aire, a continuación la calcularemos.

**Tabla. 36. Determinación de la masa molar media del aire**

	mi	Relación % en el aire	Moles parciales
<b>O<sub>2</sub></b>	16	21%	6,72
<b>N<sub>2</sub></b>	14	79%	22,12
<b>Masa molar media del aire</b>			28,84 Kmol /
<b>Fuente: Elaboración propia</b>			kg de aire

Las moles de O<sub>2</sub> necesarios serán el oxígeno requerido que se necesita para la combustión.

Para obtener las moles estequiométricas de aire se procede a dividir por 0.21, considerando que la composición del aire es de 21% de oxígeno.

**Moles estequiométricas de O<sub>2</sub>:** 1.002 Kmoles de O<sub>2</sub>

**Moles estequiométricas de aire:** 4.773 Kmoles de aire

**Masa estequiométricas de aire:** 557,9596 Kg de aire

Hay que recordar que en la gasificación solo se necesita el 30% del aire total que se necesita en una combustión, por eso se multiplicara la masa de aires por el 30%.

<b>Relación equivalente de gasificación:</b>	30%
<b>Flujo sobre hora de la olote:</b>	24.500 Kg de olote/hora
<b>Masa de aire estequiométrico:</b>	137.645 Kg de aire
<b>Masa de aire Real:</b>	41.294 Kg de aire
<b>Flujo volumétrico de aire real:</b>	32.011 m3/hora
<b>Mole de Oxígeno real para la combustión en el gasificador</b>	0.301
<b>Densidad del aire</b>	1.290 Kg/m3

### C. Diseño de la zona de oxidación

La zona de oxidación es el corazón del equipo, una de las funciones importante de esta zona es la de generar calor, aparte de transformar y oxidar los productos condensables de la zona de pirolisis, por ello se ha tomado en cuenta las experiencia pasadas de investigadores de la academia suecas de ciencias, para llegar a las siguientes conclusiones. (FAO, 2006)

- 1.- La entrada del aire por la tubería debe tener una velocidad de entre 25 a 30 m/s. (FAO, 2006)
- 2.- La inclinación de la garganta debe estar comprendida entre un ángulo de 60 a 45° grados. (FAO, 2006)
- 3.- La altura de la reducción de la garganta deben ser mayor a 20 cm. (FAO, 2006)
- 4.- La altura de la entrada del tubo de aire debe estar encima de los 10 cm del estrechamiento máximo. (FAO, 2006)

La Academia Sueca de Ciencias Técnicas (43) presenta también datos empíricos respecto a la altura de las toberas sobre el estrechamiento mínimo, el diámetro del anillo de abertura de las toberas y también las toberas apropiadas para distintas capacidades. (FAO, 2006)

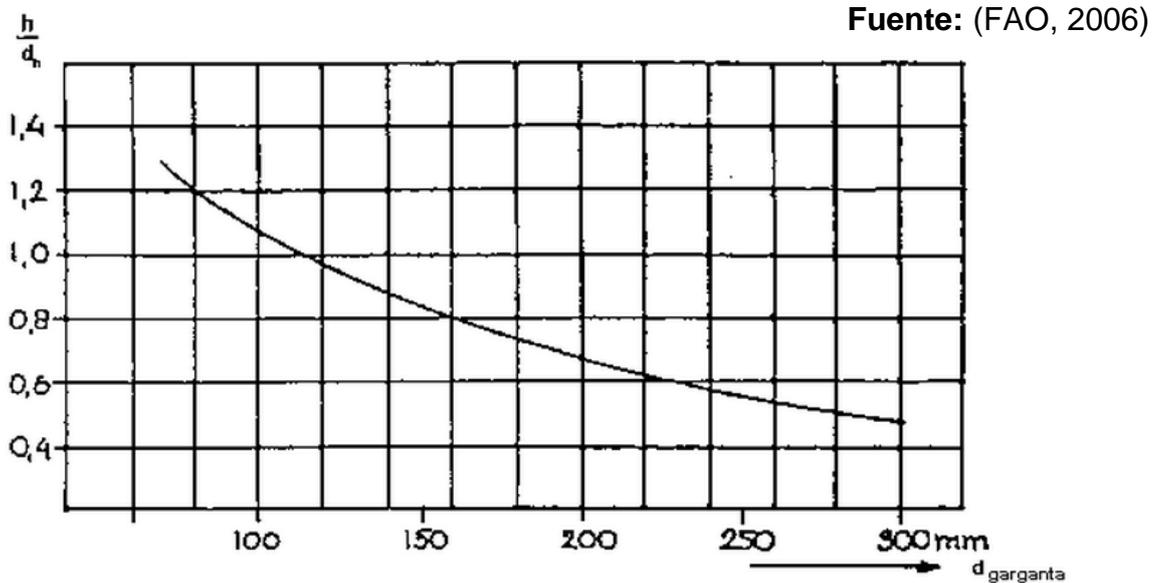


Figura16. Distancia de la tubería de entrada del aire sobre el estrechamiento de la garganta.

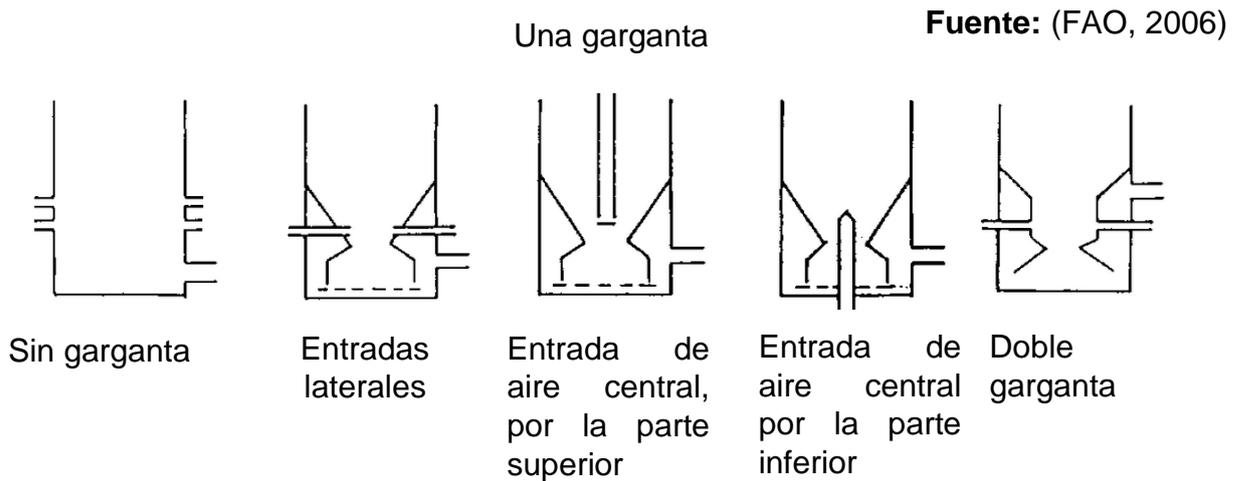
Tabla. 37. Relación entre los diámetros de la garganta y tubería de entrada de aire.

Diámetro del anillo de la garganta (mm)	Diámetro de la tubería (mm)	# de entradas de aire
70	10.5	3
80	9	5
90	10	5
100	11	5
120	12.7	5
130	13.5	5
150	15	5
170	14.3	7
190	16	7
220	18	7
270	22	7
300	24	7

Fuente: (FAO, 2006)

Autor: (FAO, 2006)

Los gasificadores son una tecnología antigua que tuvo su apogeo en la segunda guerra mundial cuando el acceso a derivados del petróleo era limitado, por ello se desarrollaron diseños de diferentes tipos gargantas para los gasificadores Down-draft, que veremos a continuación:



**Figura. 17. Diferentes tipos de gargantas para gasificadores Down-draft**

A medida que se trabaja con la biomasa se genera polvos que son arrastrados por el gas, Nordström realizó investigaciones sobre la dimensión y distribución por tamaño del polvo del gas del generador, cuyos resultados se reproducen en el Cuadro 2.8. Es posible separar alrededor del 60% al 70% de este polvo, de la corriente de gas, por medio de un ciclón bien diseñado. El resto (partículas de polvo de diámetro menor) tiene que eliminarse por otros medios. (FAO, 2006)

**Tabla. 38. Distribución por tamaños del polvo en el gas**

<b>Tamaño de las partículas de polvo m 10<sup>-6</sup></b>	<b>Porcentaje en el gas %</b>
más de 1 000	1,7
1 000 - 250	24,7
250 - 102	23,7
102 - 75	7,1
75 - 60	8,3
menos de 60	30,3
pérdidas	4,2

Fuente: (FAO, 2006)

Autor: (FAO, 2006)

## ANEXO 2

### Balances de materia y energía

Se realizó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel los diferentes cálculos de los balances de materia y energía, en donde con solo introducir la cantidad de biomasa por hora. Obtenemos los siguientes resultados.

**Tabla. 39. Balance de materia en la reacción de combustión**

$CH_{1.31}O_{0.68} + 0.99 O_2 \longrightarrow CO_2 + 0.66 H_2O$									
Entran					Salen				
Reactantes	Kg	P.M.	Xi	ni= ni/P.M.	Producto de la combustión	P.M.	Xf	nf= (ni*Xf)	Kg
		Kg/mol -Kg	mol	mol - Kg		Kg/mol -Kg	mol	mol - Kg	
<b>C H1.31 O0.68</b>	7.350	24.2	1.000	0.304	<b>CO2</b>	44	1.000	0.304	13.364
<b>O2</b>	9.622	32.0	0.990	0.301	<b>H2O</b>	18	0.660	0.200	3.608

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla. 40. Balance de materia en la 1° reacción de gasificación**

$CH_{1.31}O_{0.68} + 0.32 CO_2 \longrightarrow 1.31 CO + 0.65 H_2$										
Solamente el 43.29% de CO2 reacciona con el olote del maíz que entra en proceso de pirolisis										0.131
Entran					Salen					
Reactantes	Kg	P.M.	Xi	ni= ni/P.M.	Producto	P.M.	Xf	nf= (ni*Xf)	Kg	
		Kg/mol -Kg	mol	mol - Kg		Kg/mol -Kg	mol	mol - Kg		
<b>C H1.31 O0.68</b>	9.943	24.2	1.000	0.411	<b>CO</b>	28.01	1.310	0.538	15.076	
<b>CO2</b>	5.786	44.0	0.320	0.131	<b>H2</b>	2.02	0.650	0.267	0.538	

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla. 41. Balance de materia en la 2° reacción de gasificación**

$CH_{1.31}O_{0.68} + 0.32 H_2O \longrightarrow CO + 0.975 H_2$										
Solamente el 28.57% de H2O reacciona con el olote del maíz que entra en proceso de pirolisis										0.0573
Entran					Salen					
Reactantes	Kg	P.M.	Xi	ni= ni/P.M.	Producto	P.M.	Xf	nf= (ni*Xf)	Kg	
		Kg/mol -Kg	mol	mol - Kg		Kg/mol -Kg	mol	mol - Kg		
<b>C H1.31 O0.68</b>	4.331	24.2	1.000	0.179	<b>CO</b>	28.01	1.000	0.179	5.013	
<b>H2O</b>	1.031	18.0	0.320	0.057	<b>H2</b>	2.02	0.975	0.174	0.352	

**Tabla. 42. Balance de materia en la 3° reacción de gasificación**

$CH_{1.31}O_{0.68} + 2.025 H_2 \longrightarrow CH_4 + 0.68 H_2O$									
Solamente el 27,65% de H2 reacciona con el olote del maíz que entra en proceso de pirolisis								0.12209211	
Entran					Salen				
Reactantes	Kg	P.M.	Xi	ni= niP.M.	Producto	P.M.	Xf	nf= (ni*Xf)	Kg
		Kg/mol -Kg	mol	mol - Kg		Kg/mol -Kg	mol	mol - Kg	
CH1.31 O0.68	1.459	24.2	1.000	0.060	CH4	16.00	1.000	0.060	0.965
H2	0.247	2.0	2.025	0.122	H2O	18.00	0.680	0.041	0.738

Fuente: Elaboración Propia

Las tablas del balance de energía ya fueron puestas en el capítulo tres. Pero para realizar el balance de energía se necesitaba hacer el cálculo del calor específico de cada componente.

**Determinación de los calores específicos.**

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Para determinar los calores específicos se usa la siguiente fórmula sacada del libro de Felder de la tabla b-2. La diferencia de temperatura es de los siguientes valores 850°C – 250°C.

**Tabla. 43. Determinación del calor específico de los componentes a la salida.**

Componentes	ΔT	a	b	c	d	Cp.	
	°C					J/mol °C	Kcal/mol-Kg °C
O2	600	29.10	1.16E-02	-6.08E-06	1.311E-09	19149.40	4576.82
CO2	600	36.11	4.23E-02	-2.89E-05	7.464E-09	27443.19	6559.08
H2O	600	33.46	6.88E-03	7.60E-06	-3.593E-09	21745.47	5197.29
H2	600	28.84	7.65E-05	3.29E-06	-8.698E-10	17526.32	4188.89
CO	600	28.95	4.11E-03	3.55E-06	-2.22E-09	18293.33	4372.21
CH4	600	34.31	5.45E-02	3.66E-06	-1.10E-08	30297.61	7241.30
N2	600	29.00	2.20E-03	5.72E-06	-2.871E-09	18114.86	4329.55

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla. 44. Resumen del balance de energía**

$\sum ni^* \Delta Hr$	107,184.27	Kcal	$\sum ni^* \Delta Hr$	450.17	MJ
$\sum \Delta Hs$	11,730,826.81	Kcal	$\sum \Delta Hs$	49,269.47	MJ
$\sum \Delta He$	2.25	Kcal	$\sum \Delta He$	0.01	MJ
<b>Q</b>	<b>11,838,008.82</b>	<b>Kcal</b>	<b>Q</b>	<b>49,719.64</b>	<b>MJ</b>

Fuente: Elaboración Propia.

## **ANEXOS 3**

### **Fotos del Proyecto**



**Foto de un secador circular artesanal de un centro de acopio de maíz de la parroquia San Carlos - Quevedo**



**Foto de un secador circular artesanal de un centro de acopio de maíz de la parroquia San Carlos – Quevedo**



**Foto de Prueba experimental en la cantina de agua**

### **Fotos de la Construcción del Gasificador**

Una vez determinados todos los cálculos en el diseño del equipo que se presentan en el capítulo 2 se procedió a construir el equipo. A continuación veremos las imágenes de cada componente construido en un taller metalmecánicos.



**Cono inverso de la garganta de reducción**



**Tanque de pirolisis y secado**



**Ensamblaje entre el tanque y la garganta**



**Malla de acero inoxidable para retener la tusa del maíz**



**Ensamblaje de la malla a la parte inferior de la garganta**



**Colocación de la entrada de aire en la garganta.**



**Ciclón, tubería y tapas del gasificador**



**Ciclón con sus respectivas tuberías de entrada y salida**



**Ensamblaje de las tuberías de gas y tapas del gasificador.**



**Carcasa del gasificador con su respectiva patas y tuberías.**



**Montaje completo del gasificador.**



**Tubería que conecta al ciclón con el tanque de lavado del gas.**



**Tanque de almacenamiento del gas, con su respectivo quemador.**



**Ultimando detalles de pulida del sistema de gasificación**



**Sistema de gasificación finalizado.**



**Gasificador con sus sensores de temperatura y ventilador.**



**Introducción de la antorcha para el encendido del equipo**



**Olote de maíz en el interior del gasificador.**



**Combustión del gas producido por el gasificador.**

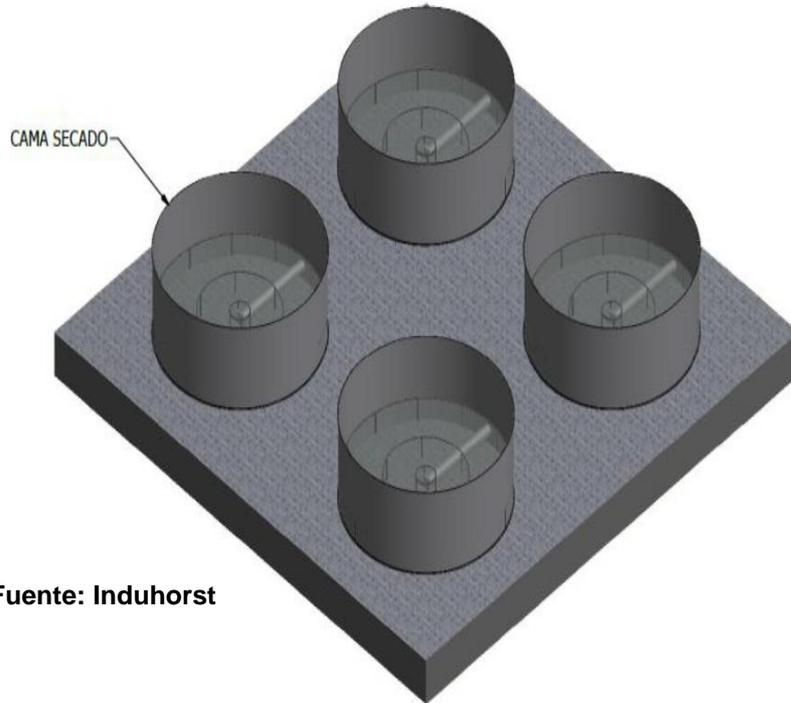


**Aceites y alquitranes condensados debido a fugas del gas #1**



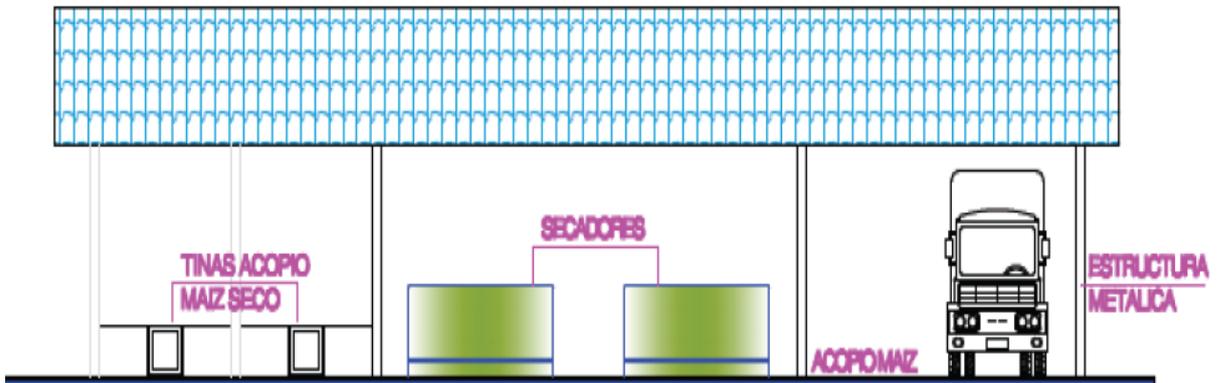
**Aceites y alquitranes condensados debido a fugas del gas #2**

**Anexo 4**  
**Plano de una Secadora circular artesanal**



Fuente: Induhorst

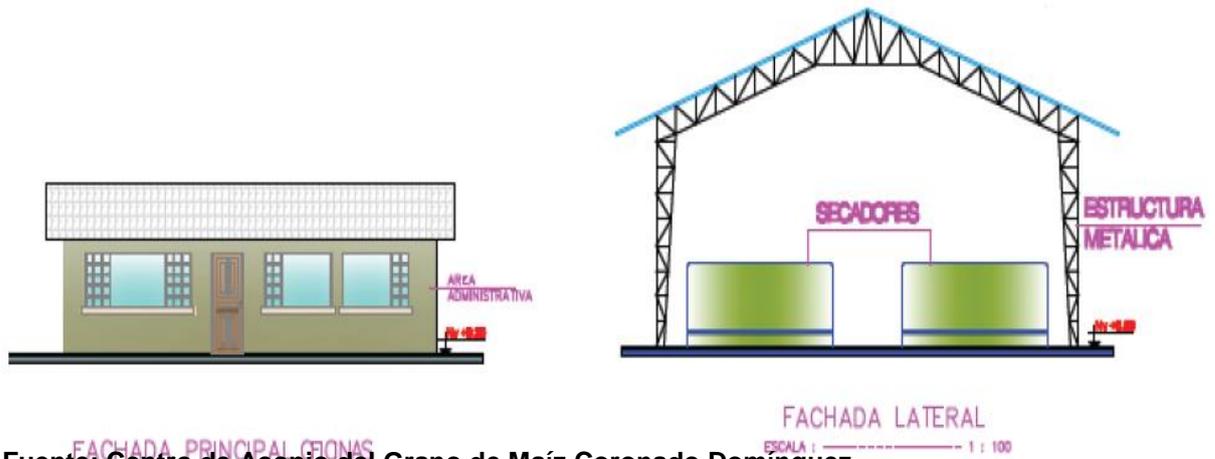
**Plano de un centro de acopio con bodegas para maíz seco.**



FACHADA PRINCIPAL  
ESCALA : ----- 1 : 100

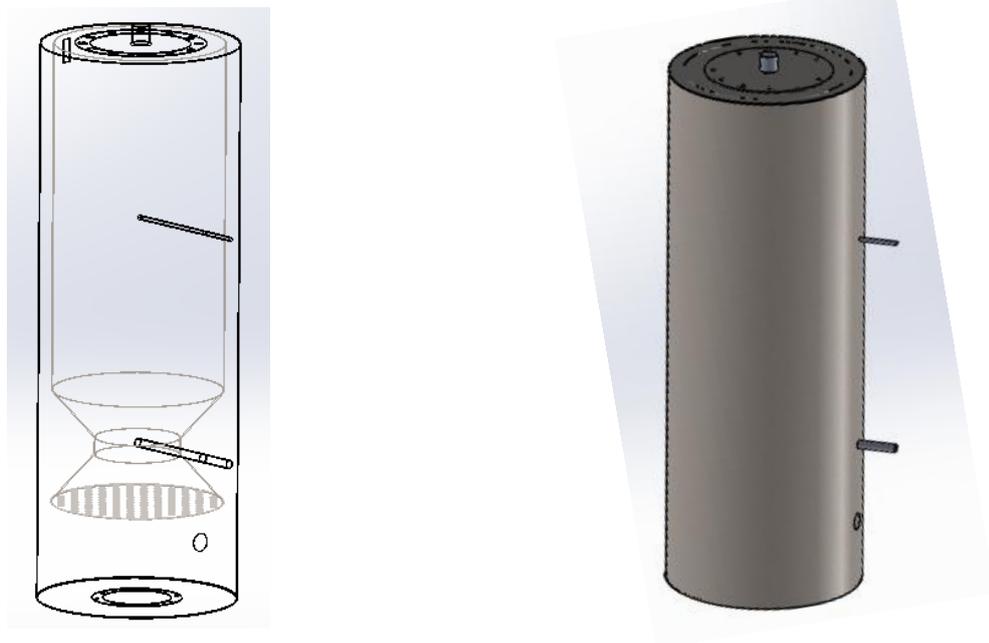
Fuente: Centro de Acopio del Grano de Maíz Coronado Domínguez  
Autor: Mg. Geovanny Neptalí Coronado Domínguez

## Plano de un Centro de Acopio con Bodegas para Maíz Seco.

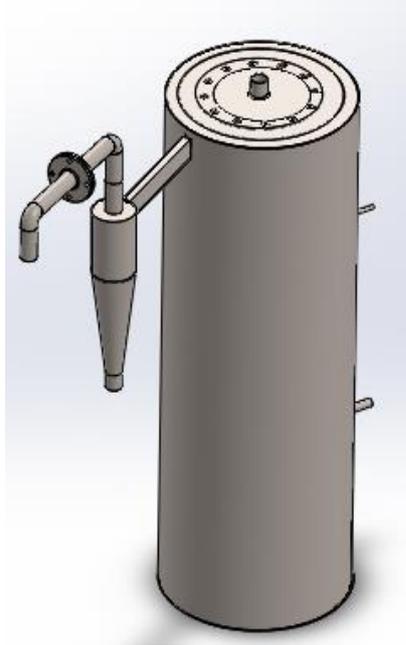


Fuente: Centro de Acopio del Grano de Maíz Coronado Domínguez  
Autor: Mg. Geovanny Neptalí Coronado Domínguez

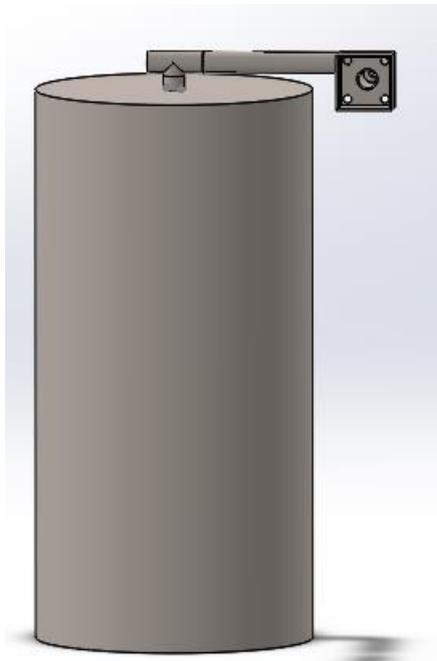
## Planos del equipo de gasificación



### Esquema del gasificador



### Esquema del gasificador con su respectivo ciclón



### Esquema del tanque de almacenamiento con su respectivo quemador.