



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA CON MENCIÓN EN  
GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

**TEMA:**

**Montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft  
para la obtención de energía eléctrica a través de biomasa**

**Autor:**

**Ruiz Caicedo, Johnny Pedro**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
Ingeniero en Eléctrico-Mecánica**

**Tutor:**

**Ing. Martillo Aseffe José Alfonso MSc.**

**Guayaquil, 30 de Agosto del 2018**

**Ecuador**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA CON MENCIÓN EN**  
**GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL**  
**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Ruiz Caicedo Johnny Pedro** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Eléctrico-Mecánico**

**TUTOR**

---

**Ing. Martillo Aseffe José Alfonso MSc.**

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

**Ing. Héras Sánchez, Miguel Armando, MSc.**

**Guayaquil, 30 de Agosto del 2018**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA CON MENCIÓN EN  
GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Ruiz Caicedo, Johnny Pedro**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **Montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft para la obtención de energía eléctrica a través de biomasa** previo a la obtención del título de ingeniero en Eléctrico-Mecánica ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, 30 de Agosto del 2018**

**EL AUTOR**

---

**Ruiz Caicedo Johnny Pedro**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA CON MENCIÓN EN  
GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

## AUTORIZACIÓN

Yo, **Ruiz Caicedo, Johnny Pedro**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft para la obtención de energía eléctrica a través de biomasa** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, 30 de Agosto del 2018**

**EL AUTOR:**

---

**Ruiz Caicedo, Johnny Pedro**

## Reporte Urkund

Documento: [\[ENLACE\] RUÍZ CAICEDO, J. P. \(2018\)](#)  
Presentado: 2018-08-13 (11:09:00)  
Presentado por: orlando.philco\_7@netmail.com  
Recibido: orlando.philco.vicq@univas.edu.ec  
Mensaje: ruiz.johny.ruiz@netmail.com  
4% de estas 32 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Lista de fuentes - Blogs  
Orlando Philco Aquí (orlando.philco)

| Categoría            | Enlace/nombre de archivo  |
|----------------------|---|
|                      | <a href="http://www.bio-nica.info/biblioteca/BATC%20Energia.pdf">http://www.bio-nica.info/biblioteca/BATC%20Energia.pdf</a>   |
|                      | <a href="http://energiaformentor.org/attachments/relatos/Estudio%20de%20biomasa%20en%20Ecuador.pdf">http://energiaformentor.org/attachments/relatos/Estudio%20de%20biomasa%20en%20Ecuador.pdf</a> |
| Fuentes alternativas |   |
| Fuentes no usadas    |   |

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL TEMA **Montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft para la obtención de energía eléctrica a través de biomasa** Autor: Ruíz Caicedo, Johnny Pedro Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Eléctrico-Mecánica Tutor: Ing. Maritza Aceffo José Alfonso VSC. Guayaquil, 30 de Agosto del 2018 - Ecuador

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por Ruíz Caicedo Johnny Pedro como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico-Mecánico TUTOR \_\_\_\_\_ Ing. Maritza Aceffo José Alfonso VSC. DIRECTOR DE LA CARRERA \_\_\_\_\_ Ing. Héctor Sánchez, Miguel Armandis. VSC. Guayaquil, 30 de Agosto del 2018.

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD Yo, Ruíz Caicedo, Johnny Pedro DECLARO QUE: El Trabajo de Titulación, "Montaje de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa utilizando un Gasificador", previo a la obtención del título de Ingeniero en Eléctrico-Mecánica ha sido desarrollado respetando

Reporte Urkund del Trabajo de titulación denominado; **Montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft para la obtención de energía eléctrica a través de biomasa** del estudiante **Ruiz Caicedo, Johnny Pedro**. Se encuentra al 4% de coincidencias.

Atentamente.

MSc. Orlando Philco A.

Revisor

## **Dedicatoria**

Al Divino Niño, por iluminar mi camino. A mis padres, hijos Romina y Josue quienes estuvieron siempre apoyándome para alcanzar mis objetivos, y brindándome cariño sincero e incondicional.

A mi esposa que con sus consejos oportunos, me permitió demostrarle, que con esfuerzo y sacrificio se pueden alcanzar las metas.

## **Agradecimiento**

Quiero agradecer a Dios, porque ha sabido guiarme por el camino del bien, dándome sabiduría, inteligencia para culminar con éxito una etapa más de mi vida, y poder servir a la sociedad con mis conocimientos, para el progreso del país, el de mi familia y el mío en particular.

A mis padres, mis hijos que con su apoyo incondicional, me han enseñado que nunca se debe dejar de luchar por lo que se desea alcanzar.

Al Ing. José Martillo Aseffe Mgs tutor del presente trabajo. Por su tiempo, paciencia, tolerancia y enseñanzas a lo largo del proyecto de investigación y en el presente trabajo de grado. Por su amistad.

A los amigos de la universidad por todos los momentos compartidos y por compartir, a la “hermandad” construida. Por su amistad, tolerancia y colaboración.



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA CON MENCIÓN EN  
GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Ing. Manuel Romero Paz MSc.**

DECANO

---

**Ing. Raúl Montenegro Tejada MSc**

COORDINADOR DEL ÁREA

---

**Ing. Celso Bayardo Bohórquez Escobar MSc.**

OPONENTE



## Índice General

|  |      |
|--|------|
| Índice de Figuras.....                             | X    |
| Índice de Tablas.....                              | XII  |
| RESUMEN .....                                      | XIII |
| ABSTRACT .....                                     | XIV  |
| Capítulo I: Generalidades de la Investigación..... | 1    |
| 1.1 Introducción.....                              | 1    |
| 1.2 Planteamiento del problema.....                | 2    |
| 1.3 Justificación.....                             | 2    |
| 1.4 Objetivos .....                                | 2    |
| 1.4.1 Objetivo General.....                        | 2    |
| 1.4.2 Objetivos específicos .....                  | 2    |
| 1.5 Metodologías de investigación .....            | 3    |
| Capítulo II: Marco Teórico.....                    | 4    |
| 2.1 Tecnología de gasificación .....               | 4    |
| 2.2 Energía y potencia .....                       | 5    |
| 2.2.1 Fuentes de energía.....                      | 5    |
| 2.2.2 Formas de energía.....                       | 5    |
| 2.2.3 Oferta, demanda y consumo.....               | 7    |
| 2.2.4 Eficiencia .....                             | 7    |
| 2.2.5 Potencia.....                                | 8    |
| 2.2.6 Unidades de medición .....                   | 9    |
| 2.3 La Biomasa .....                               | 10   |
| 2.3.1 Ventajas de la Biomasa .....                 | 12   |
| 2.3.2 Consideraciones de la biomasa.....           | 13   |

|  |    |
|--|----|
| 2.4 Gasificación.....  | 13 |
| 2.4.1 Procesos bioquímicos de transformación. ....                           | 14 |
| 2.4.2 Tipos de procesos por gasificación.....                                | 18 |
| 2.4.3 Comparación entre tipos de gasificadores.....                          | 27 |
| 2.5 Fuentes de biomasa utilizadas en el país.....                            | 28 |
| 2.5.1 Cascarilla de arroz como biomasa en ecuador.....                       | 29 |
| 2.5.2 Residuo de Maíz.....   | 33 |
| 2.5.3 Constitución química y termoquímica de la tusa del maíz.....           | 35 |
| CAPITULO III.....  | 40 |
| Sistema de gasificación por biomasa a pequeña escala.....                    | 40 |
| <b>3.1 Gasificación de la biomasa</b> .....                                  | 41 |
| 3.1.2 Acondicionamiento del gas.....   | 42 |
| 3.1.3 Motores y generadores para sistema de gasificación.....                | 44 |
| <b>3.3 Propuesta de sistema de gasificación alimentado con biomasa</b> ..... | 45 |
| 3.3.1 Elección del sistema gasificador.....                                  | 45 |
| 3.3.3 Motor del sistema gasificador.....                                     | 49 |
| 3.3.4 Unidad de Control de Procesos (CPU).....                               | 51 |
| Capítulo IV:.....  | 58 |
| Montaje del gasificador.....   | 58 |
| 4.1 Lugar de instalación.....  | 58 |
| 4.2 Montaje del gasificador.....   | 58 |
| Conclusiones.....  | 65 |
| Recomendaciones.....   | 67 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 68 |

## Índice de Figuras

### Capítulo 2.

|   |    |
|---|----|
| Figura 2. 1 Fuentes de biomasa .....                                    | 11 |
| Figura 2. 2 Esquema general del proceso gasificación.....               | 14 |
| Figura 2. 3 Gasificador de corriente ascendente (Updraft) .....         | 20 |
| Figura 2. 4 Gasificador de corriente descendente o tiro invertido ..... | 22 |
| Figura 2. 5 Gasificador de Tiro Transversal (Crossdraft) .....          | 24 |
| Figura 2. 6 Gasificador de lecho fluidizado .....                       | 25 |
| Figura 2. 7 Gasificador de Flujo de Arrastre .....                      | 27 |
| Figura 2. 8 Comparativa entre tipos de gasificadores.....               | 28 |
| Figura 2. 9 Granos de arroz.....  | 30 |
| Figura 2. 10 Quema de cascarilla del arroz .....                        | 30 |
| Figura 2. 11 Características de la cascarilla del arroz .....           | 31 |
| Figura 2. 12 Procesos de combustión para cascarilla de arroz .....      | 32 |
| Figura 2. 13 Tusas o mazorcas sin grano.....                            | 34 |
| Figura 2. 14 Briquetas del maíz .....                                   | 34 |

### Capítulo 3.

|   |    |
|---|----|
| Figura 3. 1 Generador eléctrico y motor adecuado para biogás .....                        | 41 |
| Figura 3. 2 Sistema de generación eléctrica a través de biomasa (pallets de madera) ..... | 42 |
| Figura 3. 3 Motor Stirling.....   | 43 |
| Figura 3. 4 Planta de generación eléctrica compacta a pequeña escala .....                | 46 |
| Figura 3. 5 Característica del sistema GEK .....  | 47 |
| Figura 3. 6 Subsistema TOTTI.....   | 48 |
| Figura 3. 7 Generador, motor y CPU del sistema gasificador .....                          | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3. 8 tipos de motores compatibles con sistema de gasificación All Lab Power..... | 50 |
| Figura 3. 9 CPU del GEK.....  | 51 |
| Figura 3. 10 Productividad de la biomasa.....   | 53 |
| Figura 3. 11 Gasificador de lecho fluidizado de corriente descendiente .....            | 55 |
| Capítulo 4.   |    |
| Figura 4. 1 Vista superior del tanque (reactor).....                                    | 58 |
| Figura 4. 2 Revisión del tanque para reactor .....                                      | 59 |
| Figura 4. 3 Reactor preparado para pirolisis .....                                      | 60 |
| Figura 4. 4 Vista frontal del reactor .....   | 60 |
| Figura 4. 5 Reactor preparado para conexión con otros componentes. ....                 | 61 |
| Figura 4. 6 Conexiones de las mangueras de quemadores.....                              | 61 |
| Figura 4. 7 Montaje de tolva con reactor.....   | 62 |
| Figura 4. 8 Terminación del montaje con supervisión del ing. Martillo.....              | 64 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2. 1 Eficiencias típicas de procesos de conversión energética .....           | 8  |
| Tabla 2. 2 Tecnología para transformación energética y aplicaciones .....           | 16 |
| Tabla 2. 3 Indicadores de motores de combustión interna .....                       | 17 |
| Tabla 2. 4 Características de biomasa utilizadas en Ecuador .....                   | 29 |
| Tabla 2. 5 Comparativa de cascarilla del arroz vs. Diésel .....                     | 32 |
| Tabla 2. 6 Constitución de la tusa.....   | 35 |
| Tabla 2. 7 Composición elemental de la tusa en base seca .....                      | 36 |
| Tabla 2. 8 Cálculo de la fórmula molecular de la biomasa $C_x, H_y, O_z, N_n$ . ... | 36 |
| Tabla 2. 9 Poder calorífico superior de la tusa de maíz. ....                       | 37 |
| Tabla 2. 10 Propiedades químicos y termoquímicos de la tusa .....                   | 37 |
| Tabla 2. 11 Constitución del syngas generado .....                                  | 38 |
| Tabla 2. 12 Resultados de variable de salida .....                                  | 39 |
|   |    |
| Tabla 3. 1 Datos característicos del motor, según su potencia.....                  | 51 |
| Tabla 3. 2 Características del CPU.....   | 52 |
| Tabla 3. 3 Sensores del CPU.....  | 53 |
| Tabla 3. 4 Comparación entre tipos de gasificadores lecho fijo y fluidizado         | 54 |
| Tabla 3. 5 Análisis de tipo de combustible para gasificador propuesto.....          | 56 |
| Tabla 3. 6 Comparación de precios de combustible .....                              | 56 |
| Tabla 3. 7 Comparación de rendimiento de motor de 10 kW y 20 kW .....               | 57 |

## **RESUMEN**

El presente trabajo de titulación plantea la propuesta de montaje de un sistema gasificador de biomasa a pequeña escala, el mismo que puede ser utilizado como un equipo didáctico, capaz de generar electricidad si se conecta con un motor de combustión adecuado para gas pobre o syngas. El objetivo principal de este trabajo es describir un estado de arte de la gasificación por biomasa. También se aporta con el montaje de un sistema de gasificación por biomasa a pequeña escala, el cual servirá para la enseñanza de obtención de energía a través de fuentes renovables no convencionales. Se emplea metodologías de investigación como referencia Bibliográfica y Documental, en la cual se recopilan artículos científicos relacionados con resultados de tratamiento de la información para sistemas a pequeña escala de gasificación por biomasa, también se aplica el método Descriptivo por cuanto se describe un sistema de generación eléctrica a través de un gasificador por biomasa. El cual utiliza el método empírico para aplicar procedimientos de montaje tanto eléctrico como mecánicos. La contribución de este trabajo es el montaje de un sistema didáctico de gasificación por biomasa para generar energía eléctrica que servirá para proceso de enseñanza en la carrera de Ingeniería en Electricidad, Agropecuaria, Agroindustria de la FETD.

**PALABRAS CLAVES: GASIFICADOR DIDÁCTICO, BIOMASA, GENERADOR, MOTOR COMBUSTIÓN, ENERGÍA RENOVABLE**

## **ABSTRACT**

The present titration work proposes the assembly of a small-scale biomass gasification system, which can be used as teaching equipment, capable of generating electricity if it is connected with a combustion engine suitable for lean gas or syngas. The main objective of this work is to describe a state of art of gasification by biomass. It is also provided with the assembly of a system of gasification by biomass on a small scale, which will serve for the education of obtaining energy through non-conventional renewable sources. It uses research methodologies such as Bibliography and Documentary, in which they are collected scientific articles related to information processing results for small-scale systems of biomass gasification, the Descriptive method is also used inasmuch as an electric generation system is described through a biomass gasifier. And employs empirical method to apply electrical and mechanical assembly procedures. The contribution of this work is the assembly of a didactic system of gasification by biomass to generate electrical energy that will serve for teaching process in the career of Engineering in Electricity, Agriculture, Agribusiness of the FETD

**KEYWORDS: DIDACTIC GASIFIER, BIOMASS, GENERATOR, COMBUSTIÓN ENGINE, RENEWABLE ENERGY**

## **Capítulo I: Generalidades de la Investigación**

### **1.1 Introducción**

El presente trabajo de titulación pretende aportar con el estudio y montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft para obtener energía a través de biomasa. La combustión de biomasa en aplicaciones a pequeña escala está ganando cada vez más atención como un medio para la electrificación rural en áreas de países en desarrollo donde la extensión de la red nacional sería demasiado costosa (Míguez, 2013).

El término biomasa define una amplia categoría de compuestos caracterizados por una matriz orgánica y producida por organismos vivos (vegetales o animales). En general, la biomasa se origina directa o indirectamente del proceso de fotosíntesis y, por lo tanto, constituye una importante fuente de energía renovable derivada del sol.

La biomasa se puede convertir en energía eléctrica a través de varios métodos. El más común es la combustión directa de material de biomasa, como residuos agrícolas o materiales leñosos. Otras opciones incluyen gasificación, pirólisis y digestión anaeróbica. La gasificación produce un gas de síntesis con contenido de energía utilizable calentando la biomasa con menos oxígeno de lo necesario para la combustión completa.

La pirólisis produce bio-aceite al calentar rápidamente la biomasa en ausencia de oxígeno. La digestión anaerobia produce un gas natural renovable cuando la materia orgánica se descompone por bacterias en ausencia de oxígeno.

La biomasa también se puede convertir en líquidos o gases para producir electricidad o combustibles para el transporte. El etanol se produce típicamente por fermentación y destilación, en un proceso muy parecido al que se usa para hacer cerveza. Los aceites de soya y canola se pueden convertir químicamente en un combustible líquido llamado biodiesel. Estos



combustibles pueden usarse en motores convencionales con poca o ninguna modificación. (Siliceo, 2014).

La biomasa se puede convertir en un gas calentándolo bajo presión y sin oxígeno en un "gasificador". El estiércol también se puede convertir usando un digestor. El gas puede quemarse para producir calor, vapor o electricidad.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Escaso aprovechamiento de fuentes renovables no convencionales a partir de residuos de la mazorca de maíz (tusa) como biomasa de un sistema de gasificación para obtener electricidad.

## **1.3 Justificación**

Tanto la combustión solo de biomasa como la combustión de biomasa a pequeña o gran escala se pueden considerar totalmente comerciales y se pueden integrar con la infraestructura existente. Las tecnologías combinadas de calor y energía (Combined Heat and Power, CHP) basadas en la combustión / gasificación de biomasa tienen un gran potencial para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> porque utilizan fuentes de energía renovables, como los combustibles de biomasa.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Estudiar los sistemas de gasificación por biomasa y realizar el montaje de un sistema gasificador downdraft a pequeña escala para la FETD.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Describir características de la biomasa ideal para un sistema de gasificación.
2. Caracterizar parámetros del proceso de gasificación por biomasa.

3. Efectuar el montaje del sistema gasificador downdraft pequeña escala alimentado por biomasa.

### **1.5 Metodologías de investigación**

Las metodologías empleadas en el presente trabajo de titulación son:

Bibliográfica y documental, por cuanto se revisará fuentes documentales y bases de datos digitales, donde se recopila de artículos científicos relacionados los resultados de la obtención de energía eléctrica a través de recursos renovables no convencionales, como es el caso de la biomasa.

Descriptivo por cuanto se caracteriza la operación de los procesos térmicos en la obtención de gas como fuente combustible para un sistema de generación eléctrica a pequeña escala.

Sintético-Analítico por cuanto se esquematiza la aportación de todo el sistema de gasificación y también se analiza la especificación y características que tendría el motor y generador para suministrar energía eléctrica a pequeña escala.

## Capítulo II: Marco Teórico

### 2.1 Tecnología de gasificación

La energía del sol es utilizada por las plantas para sintetizar materia orgánica mediante el proceso de fotosíntesis. Esta materia orgánica (biomasa) puede dar lugar a subproductos que tienen la posibilidad de encontrar aplicación en el sector energético. Entre estas aplicaciones podemos destacar las puramente térmicas: producción de electricidad, biogás y biocombustibles. (Blog Universidad de Jaén, s.f.)

La biomasa ha sido siempre la energía renovable cuantitativamente más importante, debido a la posibilidad de recursos fácilmente disponibles y sus múltiples aplicaciones.

En la actualidad, la aplicación de la tecnología de gasificador para la producción de electricidad a pequeña escala parece justificarse solo en muy pocos casos. Cada nueva planta sería una instalación única hecha a medida, su termo-conversión genera bajas emisiones de Dióxido de Azufre  $\text{SO}_2$  y óxidos de Nitrógeno  $\text{NO}_x$  y es la única fuente de energía renovable capaz de sustituir a los combustibles fósiles.

En el mundo el potencial de energía a partir de la biomasa se estima en 70 Giga toneladas equivalentes de petróleo por año (Gtep/año) y en la actualidad ella proporciona entre el 7-14 % de la energía consumida, con posibilidades de incremento entre un 6-9 % en los próximos 20 años (Demirbas, Balat, & Balat, 2009).

Las principales condiciones previas para que una planta de gasificación funcione con éxito son:

- Existencia de grandes obstáculos (económicos o ambientales) para el uso de otros combustibles (fósiles o renovables) o formas de energía.
- Disponibilidad alta y constante de combustible de biomasa apropiado y barato.

- Disponibilidad de un conjunto de conocimientos técnicos y administrativos para el mantenimiento y la operación.
- Suficiente potencial económico de los usuarios de electricidad para cubrir al menos los costos.

A continuación, se especifican conceptualizaciones de energía y potencia eléctrica

## **2.2 Energía y potencia**

La energía es un concepto que se relaciona con varios procesos (como quemar combustibles o propulsar máquinas), así como con las observaciones de dichos procesos. La energía se define científicamente como la capacidad de hacer trabajo.

### **2.2.1 Fuentes de energía**

Existen diferentes fuentes de energía, las cuales se pueden clasificar en dos grupos:

1. Fuentes renovables: no se agotan por su uso, como la energía del viento y del sol. El agua y la biomasa también se incluyen en esta categoría, aunque son renovables bajo la condición de que la fuente se maneje en forma apropiada, por ejemplo, las cuencas hidrológicas y plantaciones de árboles (BUN-CA, 2002).
2. Fuentes no-renovables: están disponibles en cantidades limitadas y se agotan por su uso, como los combustibles fósiles (carbón mineral, petróleo, gas natural). Estas tienen la característica de que, una vez utilizadas para la generación de energía, no se pueden volver a usar.

### **2.2.2 Formas de energía**

El manual sobre energía renovable BUN-CA (2002) indica que la energía tiene diferentes formas, entre las cuales podemos citar las de mayor importancia:

- **Energía cinética:** la de un objeto en movimiento como, por ejemplo, el agua de un río. La velocidad y masa del objeto determinan, en gran parte, la cantidad de su energía cinética. Cuanto más rápido fluye el agua, más energía estará disponible.
- **Energía potencial:** la de la posición de un objeto con respecto relativo a la tierra. Esta forma está almacenada y se convierte en energía cinética cuando el objeto se cae. Por ejemplo, el agua en un embalse tiene el potencial de caerse y, cuanto más alta la presa, más energía potencial contiene el agua.
- **Energía térmica (calor):** una forma de energía cinética causada por el movimiento de los átomos o las moléculas en un material sea sólido, gaseoso o líquido. Su cantidad es determinada por la temperatura del material, entre más alta la temperatura, más energía está disponible. Por ejemplo, en la combustión de madera u otros materiales se genera calor. • **Energía química:** la almacenada en átomos y moléculas; por ejemplo, en materiales combustibles y baterías (acumuladores).
- **Energía eléctrica:** más conocida como electricidad; es el flujo de los electrones en un material conductor, como un cable eléctrico (BUN-CA, 2002).
- **Energía electromagnética (radiación):** la que todos los objetos emiten en diferentes cantidades. La luz es una forma visible de radiación.
- **Energía mecánica (o energía rotacional):** la de rotación de un eje girando. Esta se produce, por ejemplo, en una turbina hidráulica propulsada por el agua. Transformación de energía “Utilizar” la energía significa, transformar una forma de ella en otra. Por ejemplo, aprovechando la fuerza del viento, se convierte la energía cinética en mecánica, la cual, luego se puede convertir en eléctrica. Para obtener iluminación, se convierte la eléctrica en electromagnética o radiación. Igualmente, “generar” energía significa convertir una forma de ella en otra; por ejemplo, la cinética de agua en movimiento a mecánica, en un sistema hidráulico. (BUN-CA, 2002)

Los términos “utilizar” y “generar” energía, científicamente no son correctos porque ella no se puede crear ni destruir. Se puede transformar de una forma a otra, pero no se “gasta” y su cantidad total se mantiene igual en cualquier proceso. Lo anterior es la base de la Primera ley de la termodinámica. (Arcia, 2013)

### **2.2.3 Oferta, demanda y consumo**

En el análisis de la utilización de energía en el nivel nacional o sectorial se pueden distinguir tres conceptos:

- Oferta de energía: se requiere de ella para aplicaciones como iluminación, cocción, procesos industriales y transporte. La oferta energética puede ser diferente de un lugar a otro, dependiendo de condiciones locales como el clima y las costumbres, y según los diferentes tipos de usuarios (viviendas, industrias, transporte, etc.).

Se puede satisfacer una necesidad específica de energía con diferentes fuentes e, igualmente, no todas las necesidades se pueden satisfacer por falta de fuentes o presupuesto.

- Demanda por energía: necesidad de fuentes que puedan satisfacer las necesidades de energía. Depende de factores como población, nivel de desarrollo económico, disponibilidad de tecnología, etc. Igual a éstas, no siempre se puede satisfacer la demanda por energía.
- Consumo de energía: utilización real de fuentes; también llamada “demanda expresada” (BUN-CA, 2002).

### **2.2.4 Eficiencia**

En todas las transformaciones de energía, se pierde una parte de ella debido a su conversión parcial en una forma que no se puede aprovechar, generalmente en calor. La fracción de la energía utilizable, como resultado de un proceso de conversión, y su insumo se llama la eficiencia del proceso, la cual, generalmente, se representa como un porcentaje.

En la fórmula siguiente se expresa de la siguiente manera:

$$Eficiencia = \frac{\text{egreso de energía utilizable}}{\text{insumo de energía}} \times 100\% \quad (\text{Ecuación 1})$$

Cuanta más alta sea la eficiencia, menos energía se pierde. La siguiente tabla 2.1 muestra las eficiencias típicas para algunos procesos de conversión.

Tabla 2. 1 Eficiencias típicas de procesos de conversión energética

| Equipo                           | Eficiencia típica (%) |
|----------------------------------|-----------------------|
| Motor de diesel                  | 30 - 45               |
| Motor eléctrico                  | 80 - 95               |
| Turbina hidráulica               | 70 - 99               |
| Bombillo eléctrico incandescente | 5                     |
| Estufa de LPG                    | 60 - 70               |
| Estufa de leña                   | 12 - 30               |

Fuente. (BUN-CA, 2002)

### 2.2.5 Potencia

Este es un concepto muy relacionado con el de energía. Se define como la capacidad de suplir una cierta cantidad de energía durante un período de tiempo definido. Esto se ilustra así: cuando se aplica un proceso de conversión de energía, estamos interesados en dos cosas:

- La cantidad de energía convertida.
- La velocidad a cuál se convierte.

Esta velocidad a la cual se convierte, se llama técnicamente potencia (P), expresada como energía por tiempo (segundo):

$$Energía = potencia \times tiempo \quad \circ \quad Potencia = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Por ejemplo, un tanque de gasolina de un vehículo contiene una cantidad dada de energía. Este se puede usar en un cierto período de tiempo, o sea,

el proceso de combustión puede ser corto o largo. Cuanto más corto el período, más alta es la potencia (BUN-CA, 2002).

### **2.2.6 Unidades de medición**

Existen diferentes unidades aplicadas para la expresión cuantitativa de energía y potencia. La unidad científica y más usada para energía es el Joule (o julio, abreviado como J). Otras unidades usadas son, por ejemplo, caloría, toneladas de carbón equivalente (TCe) y el British Thermal Unit (BTU). Existen factores específicos para convertir las diferentes unidades en otras (BUN-CA, 2002).

La unidad para potencia es el Watt (o vatio, abreviado como W). Este es definido como 1 Joule por segundo ("J/s"). Otra unidad que se usa frecuentemente es el caballo de fuerza (HP). Un Joule y un Watt son medidas muy pequeñas comparadas con las cantidades transformadas en la mayoría de las aplicaciones energéticas. Por eso, se usan múltiplos de 1.000; por ejemplo, 1.000 watt es equivalente a 1 kilowatt o 1 kW.

Para expresar la cantidad de energía eléctrica o electricidad, generalmente, se usa la unidad watt/hora (o vatio/hora, Wh). Un watt/hora es equivalente a la cantidad de energía convertida, durante una hora por un equipo con una potencia de 1 watt. Para sistemas de baja tensión, como los fotovoltaicos, también se puede expresar la energía eléctrica en amperios/hora (Ah), equivalentes a la generación o utilización de una corriente de 1 amperio durante una hora. (BUN-CA, 2002)

Para baterías, generalmente se indica la capacidad de acumulación en amperios/hora. La relación entre las dos unidades de energía eléctrica es la siguiente:

$Wh = V \cdot Ah$ ; donde V es la tensión o el voltaje del sistema.



Dado que las fuentes renovables dependen de los recursos naturales, la potencia firme puede ser considerablemente más baja que la capacidad instalada, lo cual desfavorece su competitividad en el mercado eléctrico, a diferencia de la generación con base en combustibles fósiles que puede operar ofreciendo “potencia firme” en cualquier momento, excepto en los tiempos de parada por mantenimiento. (BUN-CA, 2002).

### **2.3 La Biomasa**

La biomasa se usa para calefacción de instalaciones, generación de energía eléctrica y calor y energía combinados. El término biomasa abarca una gran variedad de materiales, incluida la madera de diversas fuentes, residuos agrícolas y desechos animales y humanos.

En comparación con muchas otras opciones de energía renovable, la biomasa tiene la ventaja de ser ‘despachable’, lo que significa que es controlable y está disponible cuando es necesario, similar a los sistemas de generación eléctrica de combustibles fósiles. Sin embargo, la desventaja de la biomasa para la generación de electricidad es que el combustible necesita ser adquirido, entregado, almacenado y pagado. Además, la combustión de biomasa produce emisiones, que deben controlarse y controlarse cuidadosamente para cumplir con las regulaciones ambientales.

Los siguientes materiales se incluyen en cambio en la definición:

- Especies leñosas y herbáceas derivadas de cultivos agrícolas y cultivo de bosques.
- Residuos agrícolas y forestales (paja, maleza, cortezas, etc.).
- Residuos agroindustriales (cáscara de arroz, residuos de aceitunas, bagazo, etc.).
- Residuos de ganado (estiércol animal, etc.).
- Fracción orgánica de desechos sólidos municipales, también llamada fracción húmeda.

Como se puede ver, la mayoría de estas especies tiene origen vegetal y también en lo que respecta a los residuos del ganado, se debe tener en

cuenta que las verduras son el elemento básico de la alimentación animal. Algunos ejemplos de fuentes de biomasa se muestran en la Figura 2.1

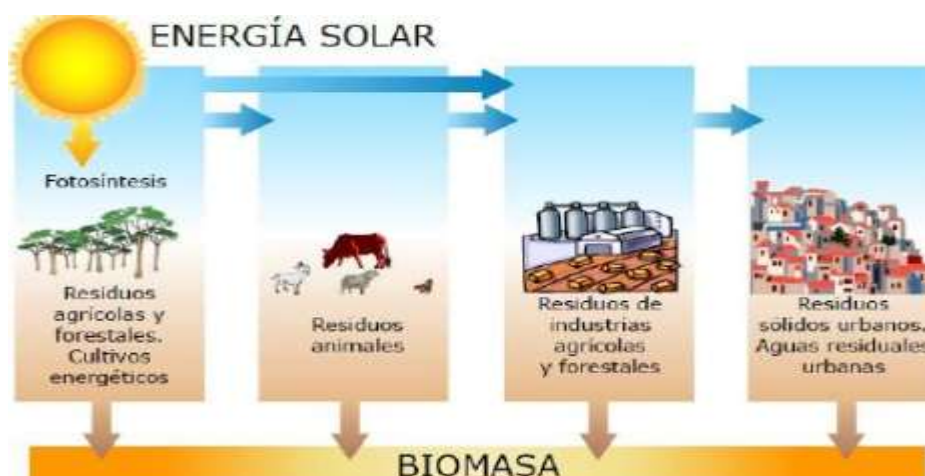


Figura 2. 1 Fuentes de biomasa

Fuente: (Loaiza, 2015)

Dependiendo de su origen, la biomasa también se puede clasificar en:

- Biomasa residual;
- Biomasa derivada de cultivos energéticos dedicados.

Los residuos y desechos de origen agropecuario, agroindustrial y forestal obviamente se encuentran dentro del primer caso, junto con la fracción húmeda de residuos sólidos urbanos (RSU). La recuperación de energía a partir de biomasa residual es doblemente ventajosa porque, por un lado, reduce la dependencia de los combustibles fósiles y por otro, alivia los problemas ambientales relacionados con su eliminación y las emisiones de metano que se producen en su proceso de degradación (debe recordarse que el metano es veintinueve); más poderoso que el dióxido de carbono como un gas de efecto invernadero).

Los cultivos energéticos dedicados también se pueden dividir en:

- Cultivos oleaginosos (colza, soja, girasol, etc.), a partir de los cuales se producen aceites vegetales y biodiesel;
- Cultivos de alcoholígenos (caña de azúcar, sorgo, remolacha, etc.), utilizados para producir bioetanol;

- Cultivos lignocelulósicos (que incluyen especies leñosas perennes como álamo y especies herbáceas perennes o anuales como *miscanthus*, etc.), dedicadas a la producción de combustibles sólidos.

La biomasa se puede convertir a otras formas utilizables de energía como el gas metano o combustibles de transporte como el etanol y el biodiesel. La basura podrida y los desechos agrícolas y humanos liberan gas metano, también llamado gas de vertedero o biogás. (Carrillo, 2004).

Los cultivos como el maíz y la caña de azúcar pueden fermentarse para producir el combustible de transporte etanol. El biodiesel, otro combustible para el transporte, puede producirse a partir de productos alimentarios sobrantes, como aceites vegetales y grasas animales.

Varias compañías de biodiesel simplemente recolectan aceite de cocina para restaurantes usados y lo convierten en biodiesel. Además, biomasa a líquidos (llamados "BTL") y etanol celulósico todavía están bajo investigación (Coello & Castillo, 2007).

### **2.3.1 Ventajas de la Biomasa**

En particular, además de la neutralidad de CO<sub>2</sub> que es común a todas las energías renovables, sus principales ventajas se enumeran a continuación:

1. Es un recurso abundante y extendido en casi todo el mundo.
2. Se puede acumular y luego usar cuando sea necesario, resolviendo o al menos limitando la incertidumbre de suministro que es típica de las otras energías renovables.
3. Puede convertirse en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos y luego utilizarse a través de un proceso de combustión, junto con tecnologías bien conocidas, adaptadas al propósito (ciclos de vapor, motores recíprocos, turbinas, etc.).
4. Permite la explotación de áreas desocupadas con cultivos dedicados o conversión de tierras agrícolas, generando implicaciones ocupacionales positivas.

### **2.3.2 Consideraciones de la biomasa**

Las consideraciones respecto al combustible, para una eventual evaluación, incluyen:

- Poder Calorífico (energía almacenada en la biomasa)
- Contenido de humedad (incluidos los efectos de almacenamiento)
- Rango de calidad del combustible (contaminantes que pueden afectar a equipos de generación)

El poder calorífico de la biomasa lignocelulósica es poco variable y se encuentra usualmente en la literatura con un valor entre 4.400 y 4.600 kcal/kg (Kauter et al. 2003). La biomasa pierde humedad gradualmente con el tiempo luego de la poda, si se mantiene en condiciones ambientales secas. Con el aumento del contenido de humedad se produce una rápida pérdida de poder calorífico (Ince 1977) y (Arcia, 2013).

De los procesos de conversión térmica de la biomasa la gasificación presenta grandes perspectivas, ya que ofrece entre otras ventajas, una mayor eficiencia de conversión en comparación con la pirolisis y la combustión. En la práctica la gasificación puede convertir de un 60 % a un 90 % de la energía de la biomasa en energía del gas. (Kirkles, Verbong, & Arjan, 2011).

### **2.4 Gasificación**

La gasificación de la biomasa es la conversión térmica de la misma en un gas, el cuál puede utilizarse para la producción de electricidad con el empleo de motores de combustión interna con un determinado nivel de eficiencia, que depende de las características de la biomasa y los motores utilizados. (Lesme, García, & Oliva, 2016).

La tecnología de gasificación de biomasa es teóricamente una opción interesante para el desarrollo rural. De esta manera promete los siguientes aspectos:

- Conversión sostenible de biomasa disponible localmente en electricidad para suministros locales;

- Una cadena de valor local con generación de ingresos para los proveedores de la biomasa como combustible;
- Incentivos para la reforestación.

El gas pobre, resultado de la gasificación de biomasa con aire tiene un elevado contenido de sustancias volátiles combustibles (CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>), valor calórico bajo entre (4-7 MJ/Nm<sup>3</sup>) una alta estabilidad al encendido y un satisfactorio número de metano, pudiendo ser utilizado en motores de combustión interna, el esquema tecnológico se presenta en la figura 2.2



Figura 2. 2 Esquema general del proceso gasificación

Fuente: (Lesme, García, & Oliva, 2016)

#### 2.4.1 Procesos bioquímicos de transformación.

Los procesos bioquímicos de transformación son aquellos en los cuales agentes biológicos intervienen en el proceso químico de conversión de la biomasa en un energético de uso directo. Los principales procesos de transformación bioquímicos de la biomasa son

1. gasificación por digestión
2. anaerobia y
3. fermentación.

A continuación, se explican algunos procesos relacionados en procesos de transformación:

- **Pirólisis:** Su principal subproducto no puede ser usado en la generación de potencia directamente, debe ser sometido a otras transformaciones, incurriendo en mayor costo.
- **Digestión Anaerobia:** Si bien su principal producto es gas, el tipo de biomasa que se debe emplear en proyectos que impliquen el uso de esta tecnología debe tener un alto contenido de humedad, es decir entre el 80% y 90%, como se explicará posteriormente en el capítulo 3, la cascarilla de café no cumple con este estándar.
- **Licuefacción:** Su principal subproducto no puede ser usado en la generación de potencia directamente, debe ser sometido a otras transformaciones, incurriendo en mayor costo. Se trata de una tecnología en fase de desarrollo.
- **Fermentación:** La principal aplicación de su producto es la producción de combustibles líquidos para el transporte y no la generación directa de energía eléctrica. La fermentación de biomasa con alto contenido de lignocelulosa" tal como madera o la cascarilla del café (Carrillo, 2004).

El gas se produce en un reactor (gasificador), sus características dependen fundamentalmente del tipo de biomasa utilizada y del rango de potencia eléctrica.

Este gas es sometido a un proceso de limpieza y luego suministrado al motor de combustión interna. Para la generación de electricidad a pequeña (< 1MW) los reactores más utilizados son los gasificadores *downdraft* (corriente de aire descendente), ellos son capaces de garantizar los requerimientos de calidad del gas a suministrar al motor.

En la tabla 2.2 se hace un compendio para selección de tecnología para transformación de energía.

Tabla 2. 2 Tecnología para transformación energética y aplicaciones

| Tecnología          | Principal producto | Principal aplicación   |
|---------------------|--------------------|--|
| Combustión          | Calor              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de potencia usando turbinas de vapor.</li> <li>• Sistemas de Calefacción.</li> </ul> |
| Pirolisis           | Bio - crudo        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de combustibles líquidos y otros derivados del crudo.</li> </ul>                     |
| Gasificación        | Gas Metano         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de potencia usando motores a gas.</li> <li>• Sistemas de calefacción.</li> </ul>     |
| Digestión Anaerobia | Gas Metano         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de potencia usando motores a gas.</li> <li>• Sistemas de calefacción.</li> </ul>     |
| Licuefacción        | Bio- Crudo         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de combustibles líquidos y otros derivados del crudo.</li> </ul>                     |
| Fermentación        | Etanol             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de bio combustibles líquidos principalmente para el transporte.</li> </ul>           |

Fuente. (Arenas, 2009)

La generación de electricidad utilizando gas de la biomasa como combustible en motores de combustión interna es una tecnología en estado comercial. Los motores usados pueden ser de encendido por chispa o de motor Diésel. Las investigaciones realizadas para la evaluación del rendimiento térmico en los motores de combustión interna que funcionan con gas pobre para generar electricidad muestran diferentes resultados, en dependencia de las características de los motores utilizados (Lesme, García, & Oliva, 2016).

Las aplicaciones comerciales de la tecnología se localizan en un rango de potencia menor de 1 MW. Los motores utilizados pueden ser de ignición por chispa y Diésel. En los motores de ignición por chispa el gas pobre puede sustituir el 100 % del combustible. La principal modificación a realizar es en el tiempo o punto de ignición a fin de lograr que la presión máxima de combustión se alcance entre 10 y 12 grados APMS y con ello mejores

desempeños del motor, dada la mayor velocidad de la llama del gas pobre con respecto al gas natural (Lesme, García, & Oliva, 2016).

En la tabla 2.3 se presentan indicadores de eficiencia de diferentes motores de combustión interna trabajando con gas pobre (syngas)

Tabla 2. 3 Indicadores de motores de combustión interna

| Biomasa               | Motor/ rpm        | RC     | Gas.(%) | MM      | Pot (kW)             | PI (APMS) | Ppo (%)             | $\eta_T$ (%)         | $\eta_G$ (%)         |
|-----------------------|-------------------|--------|---------|---------|----------------------|-----------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Madera [8]            | Diesel/1500       | 11,5:1 | 100     | SIG     | 12-16 <sup>(1)</sup> | 35        | nd                  | 28-32                | 21-24 <sup>(2)</sup> |
| Madera [9]            | Diesel/1500       | 17:1   | 100     | SIG     | 2,3 <sup>(3)</sup>   | 10        | 20                  | 19,05 <sup>(4)</sup> | nd                   |
| Madera[10]            | Diesel/ nd        | nd     | 100     | SIG     | 15-20 <sup>(1)</sup> | nd        | 20                  | 28 <sup>(4)</sup>    | 25 <sup>(2)</sup>    |
| Cáscara de arroz [11] | Otto /1800        | 12:1   | 100     | MG<br>N | 40,7 <sup>(4)</sup>  | 30        | 37,38               | nd                   | nd                   |
| Cáscara de coco [12]  | Diesel/1500       | 18,5:1 | 81      | No      | 11,44 <sup>(3)</sup> | nd        | 21                  | 14,7 <sup>(5)</sup>  | 11,69 <sup>(2)</sup> |
| Madera[13]            | Diesel/1500       | 17:1   | 100     | SIG     | 17,5 <sup>(1)</sup>  | 6         | 16,7 <sup>(6)</sup> | nd                   | 16,6 <sup>(7)</sup>  |
| Madera[14]            | Diesel/1500       | 17,5:1 | 85      | No      | 4 <sup>(3)</sup>     | 27        | 20                  | 27                   | nd                   |
|                       |                   |        | 60      | SIG     |                      |           |                     | 24                   | nd                   |
| Madera[15]            | Diesel/1800       | 12,5:1 | 100     | SIG     | 5,3 <sup>(1)</sup>   | 15        | 47                  | nd                   | nd                   |
| Madera[16]            | Gas/ 1500         | 12:1   | 100     | No      | 75                   | 28        | 14                  | 20,7                 | -                    |
| Madera[17]            | Gas/ 1200<br>3400 | 10:1   | 100     | No      | 3,55-3,68            | -         | 6-9                 | 23,2-26,2            | -                    |
| Madera[18]            | Diesel/1500       | 17,5:1 | 35-70   | SIG     | 4,2                  | 19-27     | 20                  | 22,25-24,25          | -                    |
| RPF [19]              | Gas/ 1800         | -      | 100     | No      | 20                   | -         | 34                  | 22                   | -                    |
| Madera[20]            | Gas/ 1500         | 11:1   | 100     | No      |                      | 25-35     | -                   | 34                   | -                    |
| Madera[21]            | Diesel/1500       | 17,5:1 | 100     | SIG     | 2,5                  | 12-15     | 38,12               | 18-22                | -                    |
| Madera[22]            | Gasolina/<br>1800 | 9,7:1  | 100     | No      | 9,60-13,10           | -         | 54-67               | 20,3-29,5            | 16-25                |
| Madera[23]            | Diesel/1500       | 17,5:1 | 10-72   | SIG     | 5,2                  | 23        | -                   |                      | 16-18                |
| RIAO [24]             | Gas/ 1500         | 12:1   | 100     | No      | 70                   | -         | 30                  | 19,5                 | -                    |

Nota: (1) Potencia eléctrica, nd. No declarado, (2) Biomasa-electricidad, (3) Potencia al freno, (4) En el eje, (5) Motor-generator, (6) Potencia mecánica, (7) Biomasa salida en el eje, RC. Relación de compresión, MM. Modificaciones en el motor, SIG. Sistema de ignición, PI. Punto de ignición, APMS. Antes del punto muerto superior,  $\eta_T$ . Eficiencia Térmica,  $\eta_G$ . Eficiencia Global. Ppot. Pérdida de potencia. RDF. Mezclas de materiales plásticos, textiles y cerámicos. RIAO. Residuos de la industria del aceite de olivo. Fuente: (Lesme, García, & Oliva, 2016)

Los motores diésel operan a mayores relaciones de compresión, su operación con gas pobre debe ser dual (sustitución de hasta el 85 % del Diésel). La ventaja radica en su flexibilidad, en caso de un mal funcionamiento del gasificador es posible un cambio inmediato de combustible, operando el motor totalmente con diésel. Cuando se quiere



utilizar un motor diésel con gas pobre (100%) hay que implementar un mezclador, un sistema de ignición por chispa y modificarse el ángulo de avance de la ignición. (Jayaraj & Muraleedharan, 2008)

#### **2.4.2 Tipos de procesos por gasificación**

Se pueden distinguir tres tipos de gasificación basándonos en el agente gasificador y la forma en la que se incorpora el calor en el proceso.

1. Gasificación con calentamiento directo por aire
2. Gasificación con calentamiento directo por oxígeno
3. Gasificación con calentamiento indirecto.

En los dos primeros casos el agente gasificador (aire y oxígeno respectivamente), introducido en el gasificador, quema una pequeña parte de la biomasa para proveer el calor necesario para gasificar el resto del recurso en un ambiente pobre en aire (Arenas, 2009).

La gasificación por aire conduce a un producto rico en nitrógeno (entre 50% y 65%) y en consecuencia un poder calorífico relativamente bajo (entre 4 y 8 MJ/Nm<sup>3</sup>). Los gasificadores de pequeña capacidad son, usualmente, gasificadores de aire, aunque también se ve este tipo de tecnología en algunos gasificadores grandes. En la gasificación con oxígeno es necesario tener una planta de producción de oxígeno, esto incrementa los costos y el consumo de energía, pero conlleva a producir un gas con menor contenido de nitrógeno y por ende un mayor poder calorífico (entre 10 y 18 MJ/Nm<sup>3</sup>) (Arenas, 2009).

En ambos procesos se puede agregar vapor de agua, con el fin de que éste actúe como un moderador térmico en el proceso y aumente el poder calorífico del gas resultante.

Los gasificadores de calentamiento indirecto no requieren de la presencia de aire u oxígeno en el proceso pues el calor necesario es generado en el exterior del gasificador. Por ejemplo, la biomasa al interior del gasificador puede ser calentada a partir de quemar los residuos sólidos del proceso de

gasificación o a través de la transmisión de calor generado en sistemas externos (Arenas, 2009).

En estos gasificadores se obtienen gases con un poder calorífico medio y se puede agregar vapor al proceso para incrementar la calidad del gas. El diseño del gasificador tiene un impacto directo sobre la composición del gas producido, los líquidos condensados, las partículas sólidas disueltas y el contenido de agua. Existen varias tecnologías para el proceso de gasificación:

- Gasificadores de lecho fijo
- Gasificadores con lecho fluido circulante
- Gasificadores con lecho de fluido arrastrado
- Gasificadores de baño fundido.

#### **2.4.2.1 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 desventajas de estos gasificadores se halla la existencia 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).

### 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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  para formar  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ , consumiendo energía térmica y enfriando los gases ascendentes. (Rincón, Gómez, & Klose, 2011).

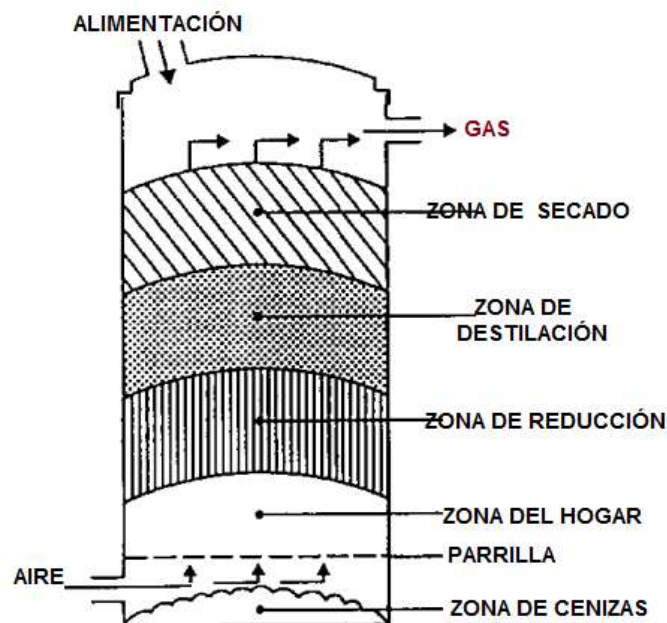


Figura 2. 3 Gasificador de corriente ascendente (Updraft)  
Fuente: (Almeida, 2014)

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> (Almeida, 2014).

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).

### **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. Véase la figura 2.4.

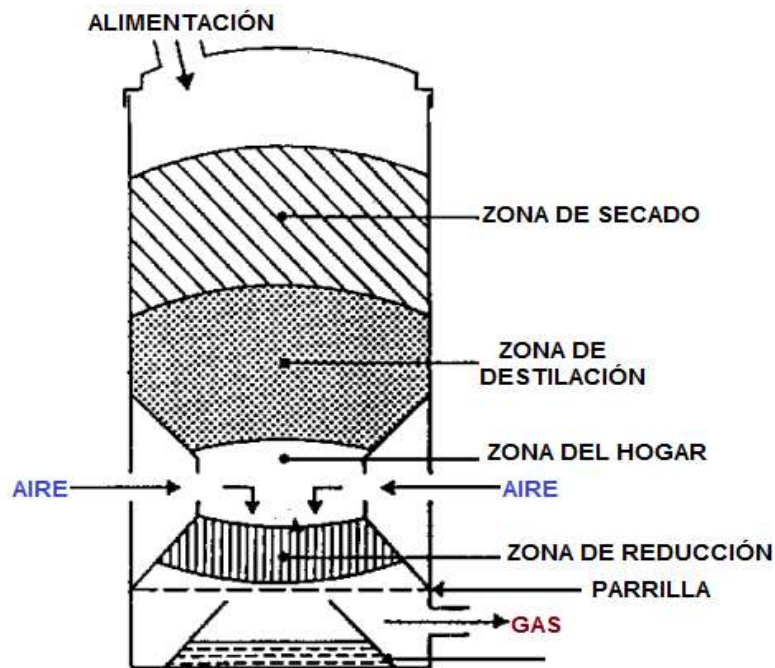


Figura 2. 4 Gasificador de corriente descendente o tiro invertido

Fuente: (Almeida, 2014)

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),

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).

### **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 diferencia 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 de 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)

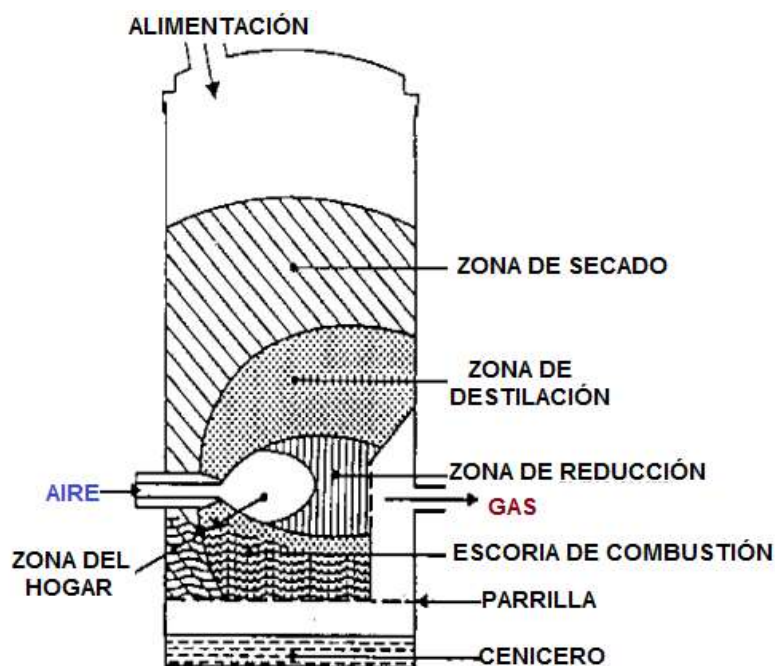


Figura 2. 5 Gasificador de Tiro Transversal (Crossdraft)

Fuente: (Almeida, 2014)

#### 2.4.2.2 Gasificador de Lecho Fluidizado

La fluidización es un fenómeno que se conoce en el área energética y tuvo su inicio en la industria a comienzos de los años cuarenta, con los procesos termoquímico de craqueo catalítico por lo que, desde aquella época, se ha empleado en muchas otras áreas. En el trayecto de su desarrollo, la fluidización ha congregado esfuerzos de gran cantidad de investigadores, de tal manera que son muchos los estudios y artículos que se han sido publicados sobre el tema (Gómez, 2010).

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 (Almeida, 2014).

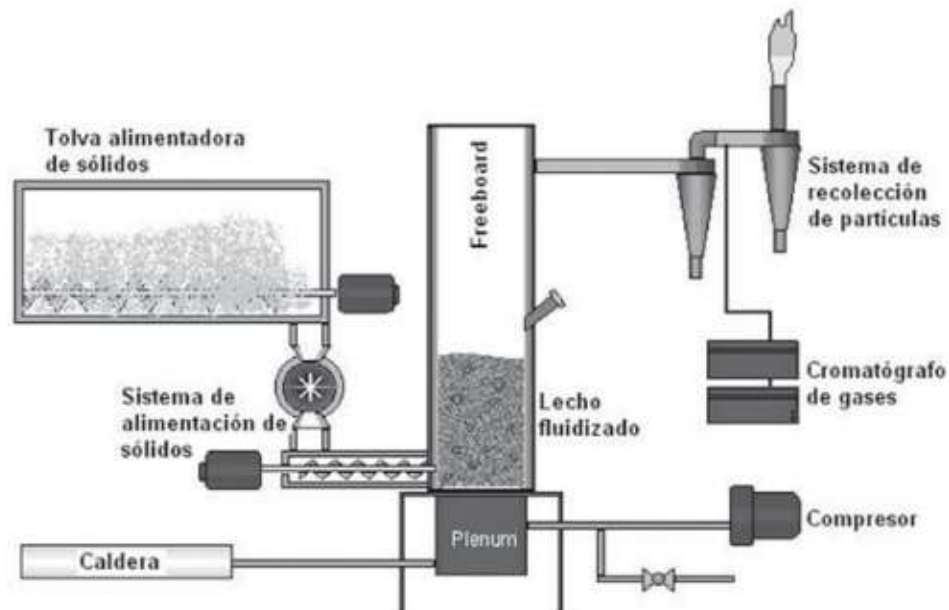


Figura 2. 6 Gasificador de lecho fluidizado

Fuente: (Yepez & Chejine, 2012)

Este tipo de gasificador produce 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).

Los sistemas de gasificación de biomasa permiten convertir la energía química de la biomasa en energía eléctrica, al accionar motores de combustión interna o turbinas de gas, Además, el calor que se produce en el proceso (especialmente en la refrigeración y limpieza del gas y refrigeración del motor) pueden ser recuperados y utilizados por medio de un sistema de cogeneración, puesto que están normalmente en rangos de temperatura del



orden de los 80~100°C energía que sería ideal para calentamiento de agua sanitaria. (Jácome & Lanás, 2015) y (Almache & Torres, 2015).

Los costos de inversión para esta tecnología están entre 1.200 y 3.700 USD/kW, con costos de operación del orden de 894 USD/kW al año. El costo medio de la energía es del rango de 14,8 a 21,8 centavos USD/kWh. (International Energy Agency, 2008).

### **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 (Almeida, 2014).

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 (Almeida, 2014).

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)

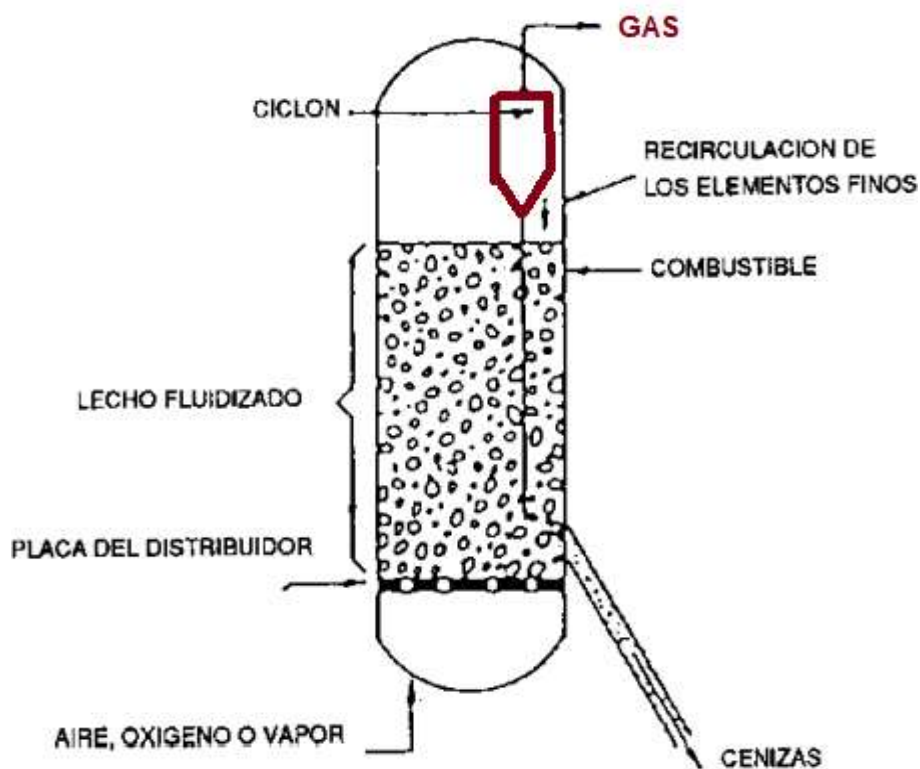


Figura 2. 7 Gasificador de Flujo de Arrastre

### 2.4.3 Comparación entre tipos de gasificadores

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. Asimismo, 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)

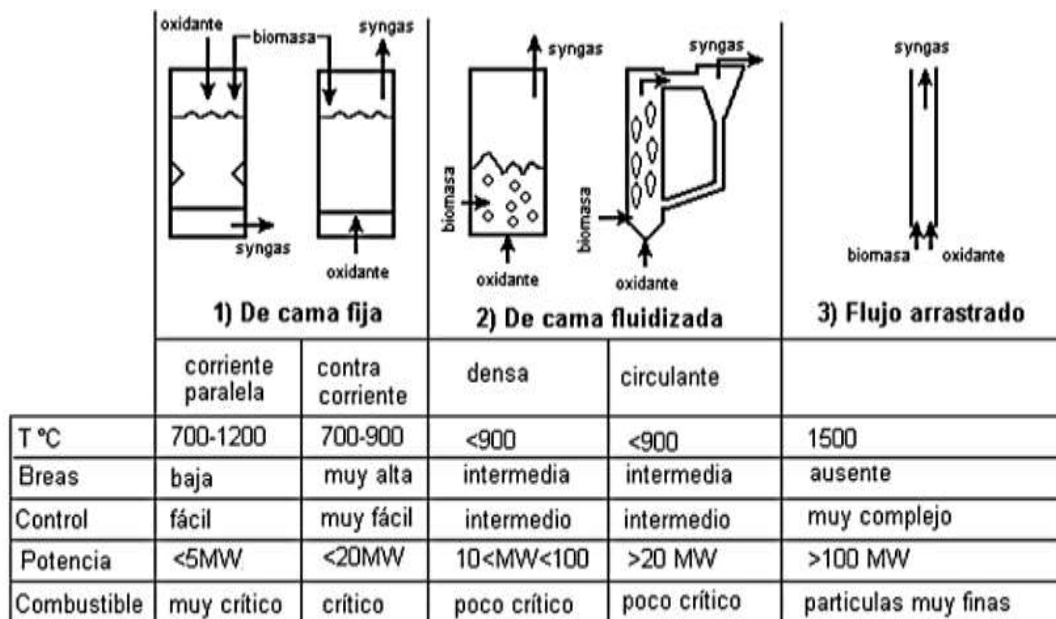


Figura 2. 8 Comparativa entre tipos de gasificadores

Fuente: (Almeida, 2014)

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).

## 2.5 Fuentes de biomasa utilizadas en el país

En Ecuador el uso tradicional más importante de la biomasa se da en el sector rural doméstico que, según cálculos, cubre alrededor del 7% de las necesidades de energía primaria, principalmente para cocinar. Se han aplicado nuevas tecnologías de la biomasa en programas rurales (como 65

instalaciones de biogás en el sector ganadero y programas de cocinas eficientes de biomasa)

Actualmente en Ecuador, el bagazo de caña de azúcar es el único tipo de biomasa empleado para generar electricidad, a pesar de esto el uso de biomasa en combustión industrial es muy común. Especies forestales leñosas como restos de cáscaras son empleados en combustión en hornos y calderos industriales. Un caso práctico son los calderos de las plantas madereras, las cuales utilizan restos de madera como combustible.

Tabla 2. 4 Características de biomasa utilizadas en Ecuador

| Fuente                     | Poder calorífico (MJ/Kg) | Humedad (%) | Cenizas (%) |
|----------------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| Bagazo de caña             | 7,5                      | 51          | 3,7         |
| Cascarilla de arroz        | 13,1                     | 21          | 10          |
| Cuezco de palma africana   | 16,8                     | 12          | 6           |
| Viruta de madera           | 15,5                     | 20          | 0,5         |
| Rastrojo de caña de azúcar | 12                       | 20          | 10          |

Fuente: (Tobar & Quijije, 2017)

### 2.5.1 Cascarilla de arroz como biomasa en Ecuador

Según el (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017) MAG, la producción de arroz en el 2010, fue de 1'165.589 toneladas. Pues, se prevé al final del 2018 lograr una producción de 1'700.800 toneladas. Así en el 2010 se consiguieron 256.429 toneladas de cascarilla de dicha gramínea. Con esta cantidad se estarían desplazando 627450 BEP (Barriles Equivalentes de Petróleo).

El arroz es un grano de dimensiones no únicas:

- 4-14 mm de longitud
- 2-4 mm de ancho
- 50 um de espesor



Figura 2. 9 Granos de arroz

Fuente: (Agrocalidad - La Agencia de Regulación y Control Fito y Zoonosanitario, 2015)

En base seca, el peso de la cascarilla de arroz oscila entre los 2.944 y 3.563 mg., dependiendo del tipo de arroz. Su densidad es aproximadamente de 1.60 gr/cm<sup>3</sup> compactada y 1.42 gr/cm<sup>3</sup> sin compactar. Se registran oficialmente en Ecuador 1075 piladoras. La mayoría se encuentran concentradas en las provincias del Guayas y Los Ríos.

La cascarilla es un desecho no aprovechado que arroja el proceso del pilado del arroz, bien pudiese ser utilizado como biomasa. Según el MAGAP, 35% de la Cascarilla se utiliza en la Industria florícola y criaderos de animales; el restante es:

- Quemado en piladoras



Figura 2. 10 Quema de cascarilla del arroz

Fuente: (Enerpro Cía Ltda, 2016)

- Tirada al borde de las carreteras
- Arrojada a los ríos

La cascarilla de arroz calcinada presenta un alto contenido de sílice. Al ser sometida a calcinación produce una alta cantidad de ceniza, entre 13 y 29% del peso inicial, la cual está compuesta principalmente por sílice, 87-97%, y pequeñas cantidades de sales inorgánicas. (Lanning, 1963) y (Tobar & Quijije, 2017).

Según el investigador Santiago Sánchez gerente de la consultora Emerpro, señala que el potencial de este residuo está en promedio de 20% de cascarilla por grano de arroz.

Actualmente Ecuador tiene un estimado de 2.233,72 kilo toneladas/año de cascarilla de arroz que podrían aprovecharse como biomasa para generación de energía renovable no convencional. La disponibilidad que posee el país de energía proveniente de biomasa residual de arroz es de 8.376,45 GWh (Enerpro Cía Ltda, 2016).

La Gasificación es la tecnología más apropiada para aprovechar este recurso. En la figura 2.11 se muestra las características más importantes de la cascarilla están:

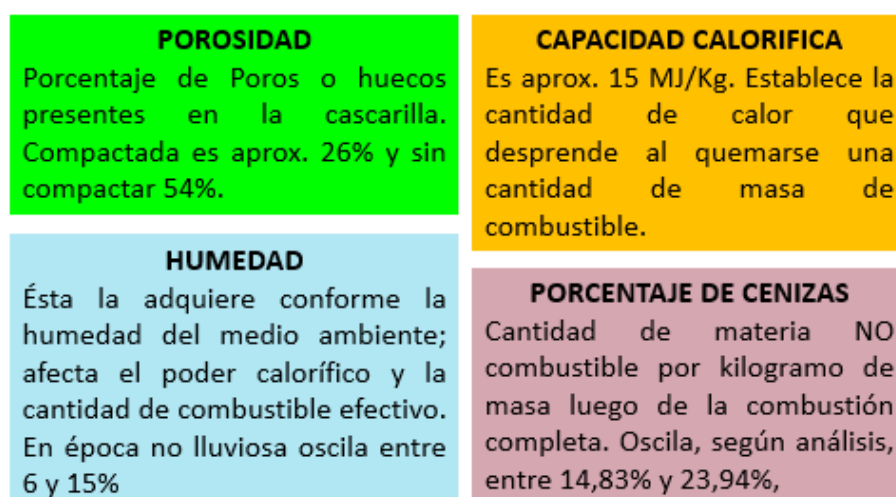


Figura 2. 11 Características de la cascarilla del arroz

Fuente: Acero y Rodríguez 2016

### 2.5.1.1 Comparación de la cascarilla con el diesel

Siendo el Diésel un combustible fósil, provoca un fuerte daño al medio ambiente porque genera grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, sin embargo, en cuanto al poder calorífico, el diésel supera en 3 veces a la cascarilla de arroz.

Tabla 2. 5 Comparativa de cascarilla del arroz vs. Diésel

| CASCARILLA DE ARROZ               | DIESEL                              |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Es abundante                      | Cada vez hay menos                  |
| Precios competitivos y estables   | Constante incremento de los precios |
| Genera puestos de trabajo locales | El beneficio va hacia el exterior   |
| Emisiones prácticamente nulas     | Altas emisiones de gases nocivos    |

Nota: (Romero, 2010)

La generación de vapor con cascarilla de arroz es viable técnicamente, sin embargo, financieramente es necesario examinar los requerimientos específicos del sistema para poder emprenderlo.

### 2.5.1.2 Proceso de combustión de la cascarilla de arroz

Se muestra en el esquema de la figura 2.12 los procesos empleados cuando se hace combustión a la cascarilla de arroz.

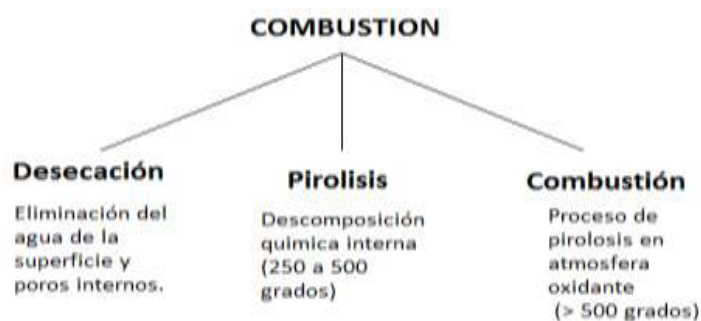


Figura 2. 12 Procesos de combustión para cascarilla de arroz

Fuente. El autor

### 2.5.2 Residuo de Maíz

La mazorca sin granos o 'tusa' tiene un inadecuado manejo de los residuos del maíz que lo han convertido en una fuente de contaminación y desperdicio. Los residuos de maíz y en el caso particular de la tusa son abundantes, pues se tiene destinado a su cultivo son 761224 toneladas métricas, de los cuales el 40% son residuos totales y el 20% es tusa o elote. (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2015)

Keener (1981) demostró que la tusa de maíz es un excelente combustible y contribuye a reducir las necesidades energéticas para una parte del proceso de secado del grano de maíz. La combustión de la tusa mejora en una reacción rica en oxígeno, y otros autores como Kimmer atribuyen a la tusa un valor 15.1 kJ/kg.

La energía proveniente de la tusa seca se emplea, también, para secar las tusas húmedas. La tecnología utilizada para la quema de las tusas se basa en un horno especial, de dos etapas (gasificación y combustión), aquí los gases de combustión son utilizados para mezclarse con el aire de secado, y se alcanzan temperaturas de 90 a 110°C en la secadora de granos. (Tobar & Quijije, 2017)

Keener propone un consumo específico de energía de unas 1 500 kcal/kg de agua en fase gaseosa, y una eficiencia de combustión entre 80 y 85%. (Keener, 1981). El rendimiento de una hectárea de maíz, 6000 kg de grano producirá una tonelada de tusas; como el calor de combustión de las tusas secas es de unas 3 600 kcal/kg (15,1 kJ/kg), la capacidad térmica de las tusas será de 3 600 000 kcal, suficiente para secar dos o más hectáreas de maíz con 20% de humedad inicial (El poder calorífico de la tusa de maíz con 20% de humedad reportado en la bibliografía es 15.1 kJ/kg) (*Food and Agriculture Organization for de United Nation*, 1998).





Figura 2. 13 Tusos o mazorcas sin grano

(Forero, 2013)

Varios autores han estudiado la producción de briquetas de combustible a partir de residuos, como los producidos en la fabricación del papel, el aserrín, las cascarillas de arroz y maní, las fibras de coco, de palma y de fruta, entre otros. (Forero, 2013). Véase en la figura 2.14 la compactación en briquetas de la tusa del maíz.



Figura 2. 14 Briquetas del maíz

(Forero, 2013)

Con esta tecnología, se puede ayudar en la expansión del uso de la biomasa en la producción de energía, además de mejorar la situación de disponibilidad de combustible en las zonas rurales.

### 2.5.3 Constitución química y termoquímica de la tusa del maíz

Los resultados en un proyecto de generación de energía a partir de la tusa formulado por Jesús Rhenals & Mario Torres (2016) establecen los componentes generales de la biomasa expresados en porcentaje de peso, acompañados por la metodología estándar para determinarlo (norma ASTM D7582-12). Se especifica la humedad relativa, el carbono, ceniza y material volátil según el estándar con su respectivo (%p/p) fracción en peso de un componente.

Tabla 2. 6 Constitución de la tusa

| <b>Constitución</b> | <b>Estándar</b> | <b>% p/p</b> |
|---------------------|-----------------|--------------|
| Humedad relativa    | ASTM D3173      | 10,52        |
| Carbono fijo        | ASTM D3172      | 16,54        |
| Material volátil    | ISO 562         | 65,23        |
| Cenizas             | ASTM D3174      | 7,71         |

Fuente: (Rhenals & Torres, 2016)

Entre los resultados de la tabla 2.5 se aprecia el provecho que muestra la tusa para gasificar debido al bajo contenido de humedad interna del 10,52 %, cercano al porcentaje referente para algunos combustibles sólidos. En el caso de las cenizas su porcentaje es relativamente alto, aproximadamente 7,7 %, indicando cierto detrimento de la tusa para ser sometida a gasificación, debido a la posibilidad de originar inconvenientes de corrosión en la infraestructura de conversión por el empleo de algunos óxidos generados.

#### 2.5.3.1 Análisis elemental

La tusa, por ser materia orgánica residual de los desechos agrícolas es de estructura vegetal, por lo tanto, muestra una formación básica exenta de azufre, lo cual es característica a favorable debido a la certeza de que no se emitirán gases contaminantes SO<sub>x</sub> durante el proceso de conversión,

contribuyendo a la generación de energía con menos efectos negativos en comparación con otras tecnologías convencionales. (Rhenals & Torres, 2016). Véase en la tabla 2.7 resultados completos.

Tabla 2. 7 Composición elemental de la tusa en base seca

| Composición [% p/p] |      |     |       |      | % HR  |
|---------------------|------|-----|-------|------|-------|
| C                   | H    | N   | O     | A    |       |
| 39,3                | 4,97 | 0,6 | 47,42 | 7,71 | 10,52 |

Fuente: (Rhenals & Torres, 2016)

La composición de la tusa en base seca muestra bajas proporciones de nitrógeno (N), una mayor cantidad porcentual de oxígeno (O) respecto a los demás elementos, seguido por el carbono (C) y el hidrógeno (H). Al realizar el análisis del porcentaje de los elementos respecto al peso molecular de la biomasa, los pesos moleculares de los elementos que la constituyen y sus fracciones porcentuales, se puede calcular la fórmula molecular de la biomasa, teniendo en cuenta que:  $M_{Biomasa} = 28,205 \text{ Kg/Kmol}$ .

Véase en la tabla 2.8 el cálculo de la fórmula molecular de cada componente de la tusa.

Tabla 2. 8 Cálculo de la fórmula molecular de la biomasa  $C_x, H_y, O_z, N_n$ .

| Elemento | Cálculo                                  |        |                   | Fracción |        |
|----------|--|--------|-------------------|----------|--------|
|          | $(1/M_E) \times (\% p/p) \times M_{bio}$ |        |                   |          |        |
|          | $M_E$ [g/mol]                            | % p/p  | $M_{bio}$ [g/mol] |          |        |
| C        | 12                                       | 0,393  | 28,2053           | X        | 0,924  |
| H        | 1  | 0,0497 |                   | Y        | 1,1402 |
| O        | 16                                       | 0,4742 |                   | Z        | 0,836  |
| N        | 14                                       | 0,006  |                   | N        | 0,012  |

Fuente: (Rhenals & Torres, 2016)

De esta manera se tiene la fórmula molecular resultante de la biomasa de tusa de maíz:  $C_{0,924} H_{1,402} O_{0,836} N_{0,012}$

### El poder calorífico

A continuación, se muestran los poderes caloríficos superior e inferior de la tusa de maíz, determinados teóricamente.

Tabla 2. 9 Poder calorífico superior de la tusa de maíz.

| <b>Poder calorífico</b> |           |         |
|-------------------------|-----------|---------|
| <b>Superior (HHV)</b>   | 14368,993 | [kJ/kg] |
| <b>Inferior (LHV)</b>   | 13534,269 | [kJ/kg] |

Los valores indican que la tusa tiene aceptables características termoquímicas en general que la hace competitiva ante otras biomásas para implementarse en los procesos productivos como recurso energético y ante el carbón presenta la ventaja de propiciar menos efectos negativos contaminantes durante los procesos pre y postcombustión (Rhenals & Torres, 2016).

Con los resultados de la caracterización química y termoquímica de la tusa establecidos, se selecciona la información requerida para modelar el proceso de gasificación, de manera que la simulación del sistema sea lo más similar a las condiciones reales. En la tabla 2.10 se sintetiza las propiedades de la tusa.

Tabla 2. 10 Propiedades químicos y termoquímicos de la tusa

| <b>Componentes [% p/p]</b> |          |          |          | <b>% HR</b> | <b>HHV (kJ/kg)</b> |
|----------------------------|----------|----------|----------|-------------|--------------------|
| <b>C</b>                   | <b>H</b> | <b>O</b> | <b>N</b> |             |                    |
| 39,3                       | 4,97     | 47,42    | 0,6      | 10,52       | 14368,993          |

Fuente: (Rhenals & Torres, 2016)

De esto se resalta positivamente la cantidad moderada de carbono elemental contenida, así como el bajo porcentaje de humedad y más bajo aún de nitrógeno. Por otra parte, el alto contenido de oxígeno, mayor al

porcentaje de carbono, no es beneficioso en la reacción rédox dada la posibilidad de darse una combustión completa. Sin embargo, en general se considera que la tusa de maíz es una biomasa de buenas propiedades energéticas aprovechables para gasificar (Rhenals & Torres, 2016).

Un análisis exergo económico de la gasificación de tusa de maíz para un sistema de generación eléctrica, contempla que el reactor (subsistema de un Gasificador) donde entra la biomasa para ser degradada térmicamente en ausencia de oxígeno, luego los productos entran al reactor donde ocurre el 'reformado' con vapor y las reacciones de gasificación, saliendo el syngas.

El syngas producido está formado mayormente por monóxido de carbono y una pequeña fracción de hidrógeno, que son los gases deseables. 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. Sin embargo, también contiene otros compuestos cuya presencia no es deseada.

En la tabla 2.11 se muestran las fracciones de los gases que componen el syngas generado.

Tabla 2. 11 Constitución del syngas generado

| <b>Componente</b>     | <b>Fracción másica x</b> |
|-----------------------|--------------------------|
| <i>CO</i>             | 0,6064                   |
| <i>H<sub>2</sub>O</i> | 0,1546                   |
| <i>CO<sub>2</sub></i> | 0,1818                   |
| <i>N<sub>2</sub></i>  | 0,0047                   |
| <i>H<sub>2</sub></i>  | 0,0524                   |

Fuente: (Rhenals & Torres, 2016)

Con la composición del gas mostrada anteriormente se calculó el poder calorífico del gas y las eficiencias de primera y segunda ley del proceso. Se recalca que la valoración del poder calorífico está en el rango equivalente cuando el proceso usa vapor como agente gasificante. En la tabla 2.12 se muestran los resultados de las variables de salida determinadas con cálculos referentes según las propiedades de los flujos.

Tabla 2. 12 Resultados de variable de salida

| <b>Variable de salida</b>            |
|--------------------------------------|
| $LHV_{syngas} = 12,41 \text{ MJ/kg}$ |
| $\eta_1 = 77,15 \%$                  |
| $\eta_2 = 81,2 \%$                   |

Fuente: (Rhenals & Torres, 2016)

En el siguiente capítulo se describe el procedimiento de montaje de un Gasificador por biomasa como propuesta de generación eléctrica a través de un recurso renovable no convencional como es la tusa del maíz.

## CAPITULO III

### **Sistema de gasificación por biomasa a pequeña escala**

La generación de energía a pequeña escala se encuadra en el concepto de Generación Distribuida (DG), que consiste en la producción de energía en el sitio, es decir, junto al usuario final (que puede ser una sola casa y fábricas medianas), con entrega a rejilla de excedente eléctrico de baja o media tensión. Esto permite seguir fácilmente las variaciones de la carga de potencia y evitar pérdidas, que consisten en varios puntos porcentuales en términos de eficiencia eléctrica equivalente, relacionados con los procesos de transmisión y distribución, necesarios en caso de producción centralizada en plantas de gran escala.

Por otro lado el concepto básico de cogeneración o CHP es bien conocido: en cada ciclo de potencia termodinámico, que produce energía mecánica o eléctrica adoptando calor a alta temperatura (normalmente derivado de un proceso de combustión) como fuente de energía, es necesario liberar parte del calor a una temperatura más baja, normalmente al medio ambiente. Este calor, descargado directamente en forma de gases de combustión y/o indirectamente con un intercambiador, es normalmente una parte considerable de la entrada de energía y es una pérdida que penaliza el rendimiento energético de la planta.

Por otro lado, si se recupera parcial o completamente para fines útiles, se realiza un proceso de CHP, con claros efectos positivos, ya que el proceso es más eficiente con respecto a la producción separada de los dos productos en dos plantas dedicadas diferentes. De hecho, como se esquematiza adecuadamente en la figura 3.1, la electricidad se produce normalmente en plantas que tienen alrededor del 40% de eficiencia eléctrica, donde el calor residual se descarga normalmente a baja temperatura (por ejemplo, en las plantas de vapor el calor de condensación se libera a  $30 \div 40 \text{ }^\circ \text{C}$ ) o, sin embargo, no se efectúa una recuperación

adecuada; por otro lado, el calor normalmente se produce a través de hornos o calderas de alta eficiencia térmica (incluso 90%), pero está sujeto a una fuerte degradación termodinámica, se produce a una temperatura superior a 1000 ° C y luego es absorbido por un fluido cuya la temperatura es normalmente inferior a 150 ÷ 200 ° C (en todas las aplicaciones civiles, es decir, calefacción doméstica, y en la mayoría de las industriales).

Este hecho permite la utilización del calor residual de los ciclos de potencia (obviamente también para plantas de vapor, con las modificaciones de ciclo apropiadas, es decir, aumentando la temperatura de condensación), permitiendo así el ahorro de combustible que sería necesario en el horno correspondiente: con la misma producción de energía neta, el ahorro total de combustible puede ser incluso superior al 30%.



Figura 3. 1 Generador eléctrico y motor adecuado para biogás

Fuente: (Faaij, 2004)

### 3.1 Gasificación de la biomasa

La gasificación de la biomasa consiste en la conversión de la biomasa sólida en un gas combustible a través de una combustión en ausencia parcial de oxígeno. Los productos del proceso de gasificación son syngas o gas pobre (mezcla de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>), y subproductos, que deben ser eliminados de forma periódica del gasificador: cenizas sólidas o biochar (el cual puede ser usado como abono por su alto contenido en potasio) y alquitrán. El valor



calorífico del gas es menor que el gas natural (5-6 MJ/kg frente a 35-50 MJ/kg para el gas natural).

La tecnología de tipo downdraft, fixed-bed o una combinación de estos dos (steam, oxygen or air flows downwards) es la que casi siempre se utiliza en los gasificadores de energía a pequeña escala (11kW-2.2MW) escalables. El syngas puede servir para generación de electricidad o de calor para secadores, calderas, hornos.

### 3.1.2 Acondicionamiento del gas

Una vez generado, el gas ha de ser limpiado y enfriado para llegar en óptimas condiciones a los motores de combustión interna. Las partículas sólidas (cenizas volantes) son retiradas en un filtro de mangas. Los restos de hidrocarburos ligeros y el exceso de agua son eliminados en una serie de condensadores.

Los motores de combustión externa (motores Stirling) tienen la ventaja de aceptar combustible de composición y calidad variables, sin embargo, son relativamente caros y ofrecen una baja eficiencia. Véase en la figura 3.2 un sistema de gasificación por biomasa.



**Figura 3. 2 Sistema de generación eléctrica a través de biomasa (pallets de madera)**

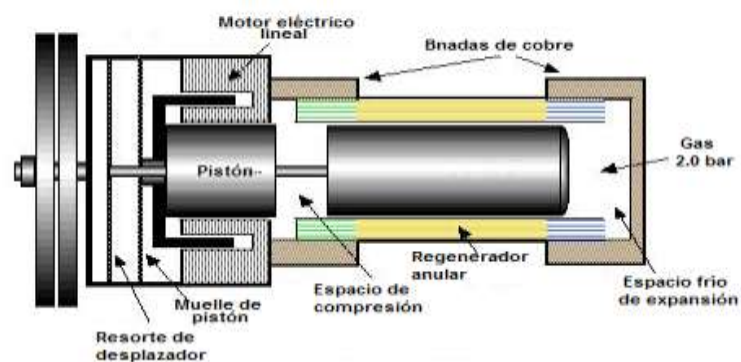
Fuente: (.Basu, 2010)

La utilización de calor residual, gas de fermentación, quema de biomasa; alimentando el motor Stirling producirá energía calorífica en un 70% y eléctrica en 20%.

Es muy importante para el motor Stirling que los gases de combustión calientes que llegan al calentador Stirling no contengan cenizas volantes, alquitrán u otras impurezas, que pueden activarse en los tubos calentadores y empeorar la transición de calor.

En la práctica, casi sólo los motores de combustión interna se utilizan en las aplicaciones a pequeña escala. El gas se puede usar en:

Motor de encendido por ignición (spark ignition Otto engines), que pueden funcionar sólo con gas; estos sistemas están disponibles desde 0.5 kW a bloques de 500kW.



**Figura 3. 3 Motor Stirling**

Fuente: (BAIRAKTAROVA, s.f)

Motor de encendido por compresión (compression ignition diesel engines), que usan una mezcla de gas y diesel. Características Como los motores de combustión interna requieren un gas muy limpio como combustible, el

sistema de limpieza del gas es un componente esencial de un sistema con gasificador.

Las pequeñas plantas de gasificación van de 10 kW a más de 100 kW. Los sistemas de gasificación combinados con motores de combustión interna pueden producir 1 kWh de electricidad con 1.1 a 1.5 kg de madera, o de 1.8 a 3.6 kg de cascarilla de arroz, o de cascabillo de café. La utilización de otras materias primas para el combustible, como cáscaras de maní, paja, etc. no está recomendada porque requiere de la co-combustión de otros combustibles (fósiles) en cantidad alta.

Las materias típicas de biomasa utilizadas son pequeños trozos de madera que oscilan en longitudes de 3/4"-1' 1/2" y diámetros de 2/8"-3/8". Es necesario que la biomasa tenga un poder calorífico de 3600-4200 kcal/kg, un porcentaje de humedad del 12%-20% para que no pierda eficiencia energética (a mayor humedad, se necesita más biomasa para producir la misma cantidad de energía,) y una producción de ceniza del máximo 5%.

### **3.1.3 Motores y generadores para sistema de gasificación**

Los gasificadores no generan electricidad, pero sí lo son los motores generadores que reciben el gas que es producido por el gasificador. Así, con la producción de syngas se puede hacer funcionar motores de combustión interna (motor Otto o motores diésel), turbinas de gas y motores de combustión externa (motores Stirling). Existen pequeñas turbinas con potencias de 30 a 75 kW disponibles en el mercado, pero casi no se utilizan para aplicaciones de pequeña escala en los países en desarrollo, debido a sus costes altos.

Para la propuesta de generación de energía a través de un sistema de gasificación por biomasa (cascarilla de arroz o tusa del maíz) se utiliza un motor de chispa GM Vortec 4 cyl de 3.0 litros. Estos motores han sido adaptados para combustibles gaseosos secos.

El motor está acoplado a un generador Mecc alte con frecuencia de voltaje automática y amperaje nominal de 3 A en sobretensión para una alta capacidad de arranque de maquinaria. El cabezal genérico tiene 12 hilos, por lo que se pueden configurar de forma individual, dividida o trifásica, en configuración en estrella o triángulo y admite todos los voltajes globales comunes: 120, 208, 240 y 400 V CA, a 50 o 60 Hz.

La potencia real producida depende en gran medida de la forma, el tamaño y el contenido de humedad del combustible. La biomasa sólida no es la fuente de combustible consistente como suponemos con diesel o gasolina. Por consiguiente, si se utiliza el sistema "20 kw" para representar la capacidad máxima de producción de energía; la salida constante máxima promedio será algo menor: 15 kW/hora a 50 Hz y 18kW/hora a 60 Hz.

### **3.3 Propuesta de sistema de gasificación alimentado con biomasa**

Se indica una breve propuesta de un sistema de gasificación alimentado con cascarilla de arroz o bien la mazorca sin grano de maíz 'tusa' clasificados como biomasa natural. El tipo de gasificador es el llamado Downdraft, en el cual el gas y el sólido fluyen a través del lecho, sostenido de una disminución del diámetro denominada 'garganta', a la altura del cual viene introducido el agente oxidante el cual es generalmente aire. En la zona de alrededor de la garganta se alcanzan temperaturas de alrededor 1000 °C, y aquí es donde se produce el craqueo del tar, el mismo que se produce por efecto de la pirólisis (Proenza, Cala, Silveira, & Zansi, 2006).

Este tipo de gasificador tiene poca producción de alquitranes, mientras que la desventaja primordial es que no puede trabajar con biomasa con rangos de humedad muy altos, generalmente trabaja en forma óptima entre un 12% y un 20% (Espinoza & Torres, 2017)

#### **3.3.1 Elección del sistema gasificador**

Se selecciona el Kit de Gasificadores para la experimentación (GEK) incluye todos los componentes necesarios para un sistema de gasificación

completo. Incluye un reactor de gas, solera de acero inoxidable, tolva de combustible, carenado de gas y manejo de cenizas, ciclón, filtro de lecho empacado, eyector de bomba de gas venturi, mezclador de combustible/aire, quemador de turbulencia e instrumentación. Con el sistema GEK no habrán los obstáculos iniciales de la gasificación y realizará un trabajo más gratificante de hacer un gas limpio sin alquitrán. Véase en la figura 3.4 el equipo All Power Labs, empresa norteamericana que lidera investigación de esta tecnología y ha desarrollado algunos prototipos.

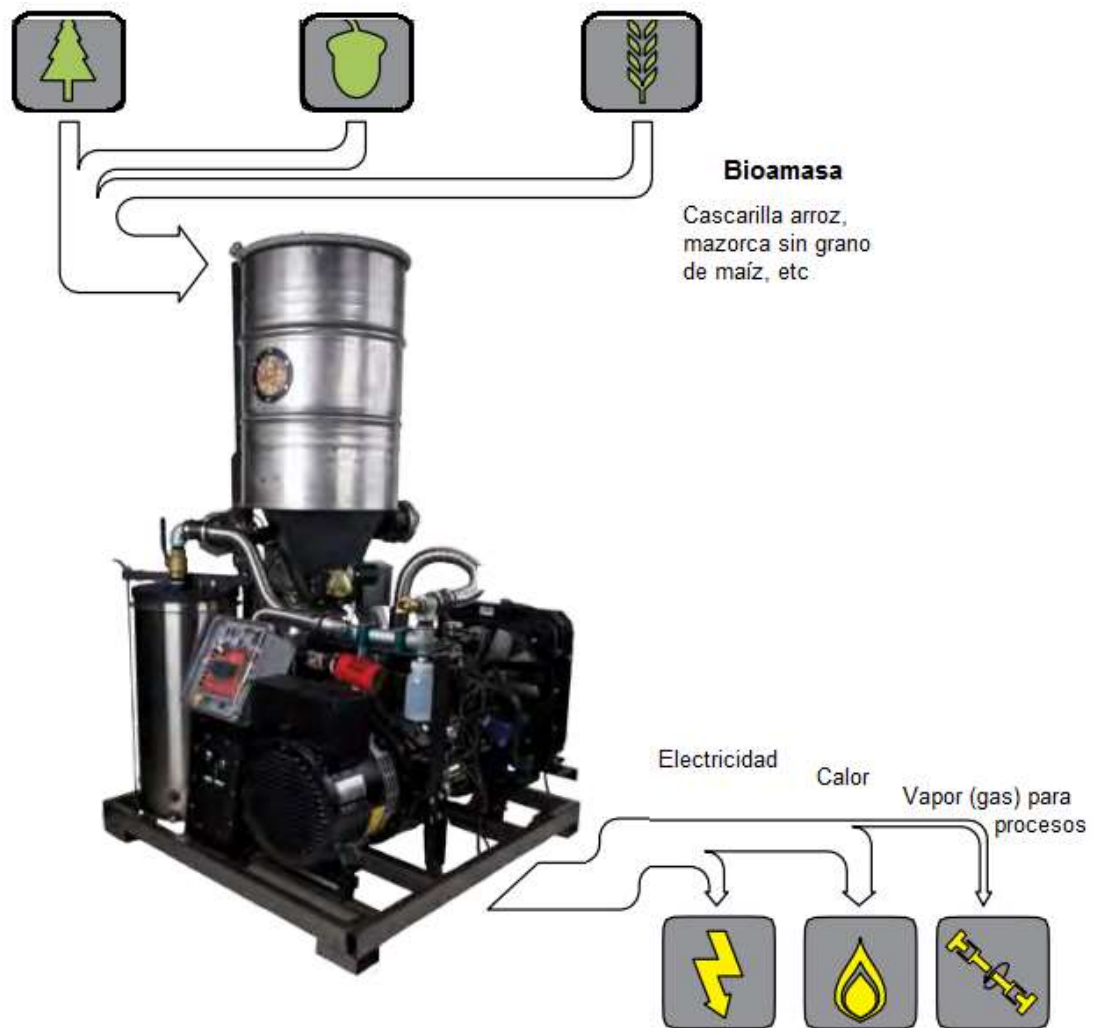


Figura 3. 4 Planta de generación eléctrica compacta a pequeña escala

Fuente: (All Power Labs, 2018)

La mayoría de gasificadores, tienen incorporados camas de secado para biomasa, las cuales usan los gases del escape de los motores generadores

para realizar el secado. La propuesta del sistema de gasificación por biomasa para generar electricidad servirá para enseñanza práctica, en las carreras de ingenierías en Electricidad, Agropecuaria y Agroindustria. La figura 3.5 describe partes del sistema gasificador.



Figura 3. 5 Característica del sistema GEK

Fuente: (All Power Labs, 2018)

Los sistemas alimentados por cáscara de arroz muestran eficiencias del 7 al 14%. En este punto es indispensable hacer una separación de las eficiencias que ostentan los gasificadores y los motores de combustión interna. Cuando se refiere a eficiencia de un sistema de gasificación, éste

tiene una eficiencia térmica, la cual está entre 75-90%, según el tipo de filtración de gas.

### 3.3.2 Torre de integración térmica total TOTTI

El TOTTI está compuesto por el cubo de secado y bobina de la pirólisis. Esta combinación demuestra un método nuevo y poderoso para recuperar el calor residual del escape de gas de salida en caliente y el escape del motor de combustión interna y devolverlo al gasificador para que realice un trabajo útil. El resultado es mayor temperatura de combustión para una mejor conversión del alquitrán, una mayor tolerancia a los combustibles de alta humedad y una mayor eficiencia del gasificador.



Figura 3. 6 Subsistema TOTTI

Fuente: (All Power Labs, 2018)

Otros componentes importantes del sistema GEK son el motor, el generador y la CPU o unidad de control de procesos.

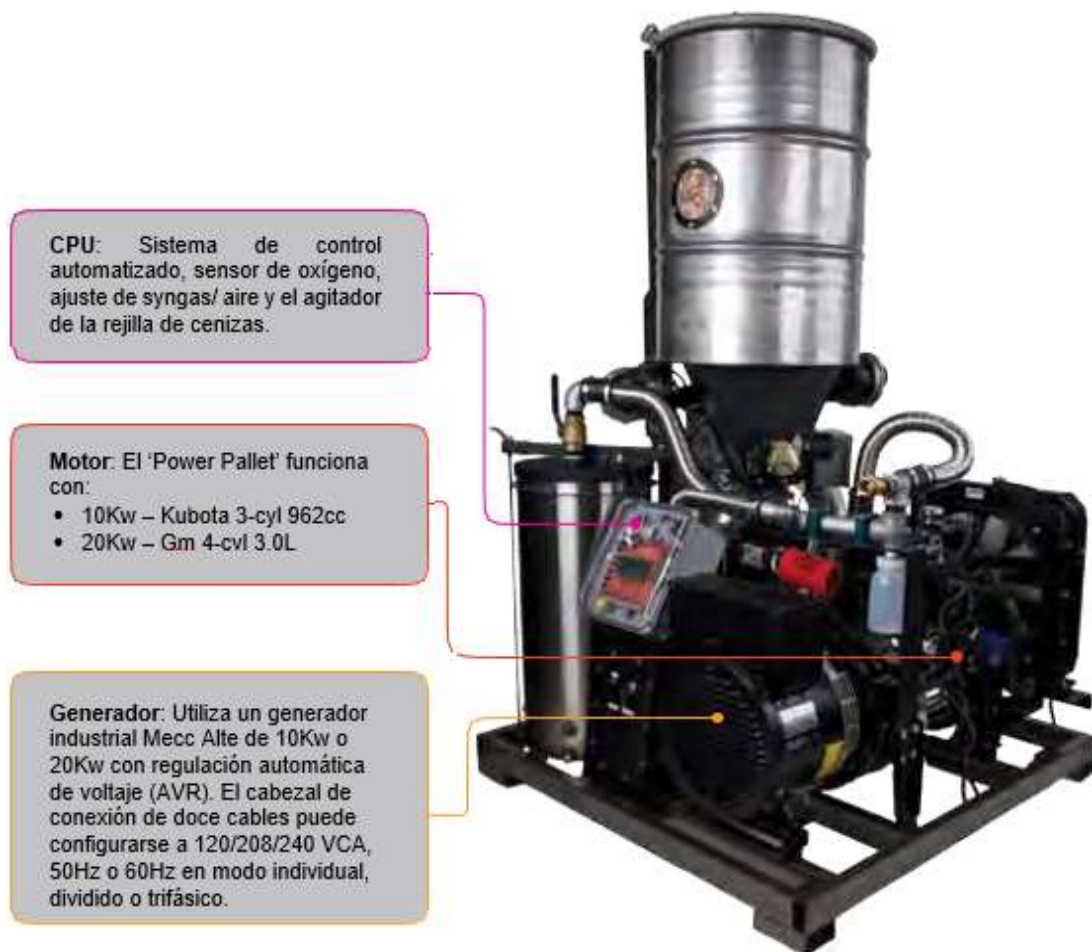


Figura 3. 7 Generador, motor y CPU del sistema gasificador

Fuente: (All Power Labs, 2018)

### 3.3.3 Motor del sistema gasificador

#### Kubota DG 972

Los motores Kubota tienen una buena reputación de alta confiabilidad y extrema duración para diferentes aplicaciones. El rendimiento y presentación compacta los han convertido en el motor adecuado para aplicaciones industriales, agrícolas y generadores a pequeña escala.



Este motor de combustible de 3 cilindros y 972 cc se basa en motores diesel de la compañía. La cámara de combustión, diseñada exclusivamente para el motor de combustible gaseoso, reduce las emisiones y la relación de compresión elevada aumenta la eficiencia.

#### **Motor GM Vortec 3.0 L I-4**

El motor de 4 cilindros en línea Vortec 3.0 L se produce exclusivamente para aplicaciones industriales y marinas. El motor viene configurado de fábrica para combustibles gaseosos, con características que incluyen:

- Aumento de la relación de compresión
- Válvula de escape de metal en polvo sintetizado para mayor durabilidad
- Cigüeñal de hierro nodular para mayor resistencia y durabilidad. Ver la figura 3.8 sobre los tipos de motores compatibles con sistema de gasificación *All Lab Power*.



Figura 3. 8 tipos de motores compatibles con sistema de gasificación All Lab Power

Fuente: (All Power Labs, 2018)

Estos sistemas están disponibles en 10 kW y 20 kW con motores industriales combinados con generadores AVR (Automatic Voltage Regulation, Regulador automático de voltaje).

En la tabla 3.1 se muestran características del motor que puede ser, según la capacidad del sistema de gasificación.

Tabla 3. 1 Datos característicos del motor, según su potencia

| Especificaciones del Power Pallet       | 10kW                                  | 20kW                                  |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Potencia de Salida                      | 3-10kW                                | 5-20kW                                |
| Consumo de Biomasa                      | 12kg / 26 lbs por hora a 10Kw         | 22kg / 50 lbs por hora a 20Kw         |
| Tolerancia a la humedad del combustible | Más del 30%                           | Más del 30%                           |
| Dimensiones                             | 1.2m x 1.2m x 1.8m<br>48" x 48" x 72" | 1.2m x 1.3m x 1.8m<br>51" x 52" x 72" |
| Peso                                    | 499 kg / 1100 lbs                     | 658 kg / 1450 lbs                     |

Fuente: (All Power Labs, 2018)

La combinación resultante proporciona electricidad estable a partir de biomasa a 120/208/240 VCA, 60 Hz o 50 Hz, en una, dos o tres fases.

### 3.3.4 Unidad de Control de Procesos (CPU)

La CPU es una placa de detección y control de fuente abierta, basada en Arduino con el procesador Atmel AVR ATmega1280. Por tanto, la placa está diseñada específicamente para los tipos de instrumentación y los requisitos de automatización de los proyectos de conversión térmica de biomasa. En la figura 3.9 muestra un CPU del GEK.

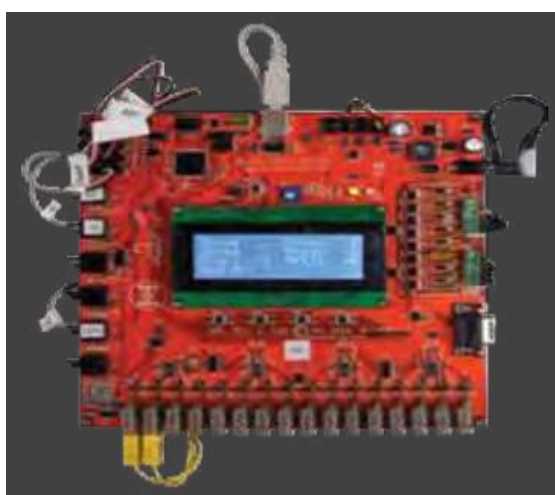


Figura 3. 9 CPU del GEK

Fuente: (All Power Labs, 2018)

La placa ofrece entradas de termopar, presión, señal analógica, frecuencia, un conjunto de servo controladores y salidas conmutadas de  $n$  canales de cc con capacidad PWM de alta corriente. La conexión en red a otros dispositivos es compatible a través de USB, serie, tarjeta SD y CANbus (el estándar de red para sistemas de motor). La CPU es ideal para aplicaciones que requieren instrumentación integrada, registro de datos y control. Un microcontrolador incorporado proporciona la experiencia que normalmente se requiere de un operador capacitado. Una arquitectura de gasificación de múltiples etapas, combinada con una integración térmica del motor gasificador, mejora significativamente la conversión de alquitrán y la flexibilidad del combustible.

Tabla 3. 2 Características del CPU

| CARACTERISTICAS (V3.02)                               | LLENADO COMPLETO  | LLENADO A MEDIDA |
|---|-------------------|------------------|
| Procesador  | Atmel ATmega 1280 |                  |
| Entradas de Termocuplas                               | 16 K-type         | 4 K-Type         |
| Entradas de presión alta / baja ( $\pm 28$ "/ 8" H2O) | 4/2               | 1/1              |
| Salidas FET (5 A continuas)                           | 8                 | 4                |
| Entradas Análogas (10 bits, conectores Phidgets)      | 8                 | 4                |
| Entrada de frecuencia / contador                      | 1                 | 0                |
| Salidas R / C Hobby Servo                             | 3                 | 1                |
| Display (4x20 Caracteres)                             | SI                | SI               |
| Teclado de 4 botones                                  | SI                | SI               |
| Puerto MicroSD  | SI                | NO               |
| CANbus Hardware                                       | SI                | NO               |
| RS-232 Interfaz                                       | SI                | NO               |
| Área de Prototipo / Expansión                         | SI                | SI               |

Fuente: (All Power Labs, 2018)

Los siguientes accesorios son compatibles con los puertos de entrada de datos en la CPU.

Tabla 3. 3 Sensores del CPU

| Prueba de alquitrán  | Temperatura   |
|--|---|
| Colorímetro para medir la concentración de alquitrán               | (6) Termopares de sonda de 24" tipo K de tipo K                       |
| Bomba, filtro y porta filtro para muestreo de gas                  | (10) Termopares de sonda dura de tipo K ( 6 ", 12", 24 ")             |
| (100) Filtros de discos  | Accesorios y bujes para montaje TC                                    |
| (100) Frascos para disolución de alquitrán                         |   |
| Caudal   | Presión   |
| (2) medidores de flujo (entrada de aire, salida de gas)            | Terminales y tuberías para conectar la CPU a los puertos de medición. |
| Servoválvula proporcional para controlar el caudal del gasificador | Tubo de silicona  |
| Tubos de silicona, púas y plomería                                 |   |

Fuente: (All Power Labs, 2018)

La CPU también ajusta automáticamente la mezcla de gas de syngas/aire a través de un sensor de oxígeno Bosch de banda ancha que sacude la rejilla de ceniza cuando sea requerido por el reactor.

Existen pocas tecnologías de gasificación estándares fiables, accesibles y adecuados para las aplicaciones rurales a pequeña escala y la superación de los problemas técnicos, frecuentes en los primeros dos años, requieren una gestión eficiente.

El uso de estos sistemas es recomendable en zonas geográficas donde el suministro eléctrico es difícil y existe alta disponibilidad de biomasa. Un ejemplo de datos de productividad se aprecia en la figura 3.10.

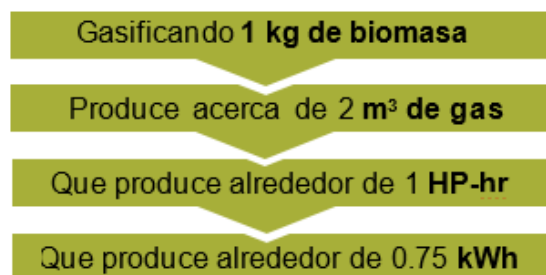


Figura 3. 10 Productividad de la biomasa

Fuente: (All Power Labs, 2018)

Haciendo un análisis de los aspectos principales para la elección del gasificador (ver tabla 3.4), se indica que el gasificador Down-draft es el que se va a utilizar; debido a que produce un gas de síntesis de buen poder calorífico, además genera un gas pobre de bajo contenido de alquitrán, ayudando a que el mantenimiento del equipo sea más fácil.

Tabla 3. 4 Comparación entre tipos de gasificadores lecho fijo y fluidizado

|   | 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: (All Power Labs, 2018)

También permite que la tusa de maíz pueda ser utilizado en él, debido a que la tusa si consciente pre-tratamiento para cumplir con los parámetros de humedad y tamaño de partícula uniforme requeridos para el gasificador Downdraft.

En la figura 3.11 se muestra el flujo de corriente en gasificador downdraft.

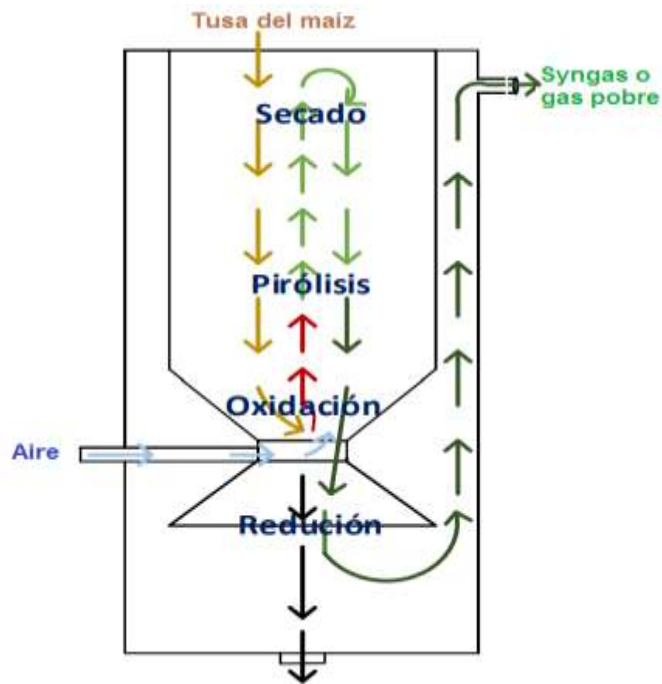


Figura 3. 11 Gasificador de lecho fluidizado de corriente descendente

Fuente: el autor

Se aprecia 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 combustible producto de la gasificación, y las cenizas que son el residuo de todo el proceso de gasificación.

El mejor combustible para el gasificador GEK es la biomasa leñosa gruesa, seca y densa de carbono. Los combustibles como virutas de madera, trozos de madera, cáscaras de nueces y cáscaras de coco que varían en tamaño de 0.5 "a 1.5" (10 mm a 50 mm) son ideales.

Tabla 3. 5 Análisis de tipo de combustible para gasificador propuesto

| Tipo de Combustible      | Funciona | Nivel de funcionamiento | COMENTARIOS                       |
|--------------------------|----------|-------------------------|-----------------------------------|
| Virutas de Madera Dura   | Si       | Excelente               | 0.5" a 1.5" (10mm – 50mm) virutas |
| Virutas de Madera Suave  | Si       | Excelente               | 0.5" a 1.5" (10mm – 50mm) virutas |
| Cáscaras de nueces       | Si       | Excelente               | Necesita menos preparación        |
| Cáscaras de coco         | Si       | Excelente               | Roto en trozos                    |
| Granos de café           | Si       | Normal                  | Granulado                         |
| Aserrín                  | Si       | Normal                  | Granulado                         |
| Mazorcas de maíz         | Si       | Normal                  | Roto en trozos                    |
| Estiércol                | Si       | Normal                  | Secado al 30% de humedad          |
| Cáscaras de Arroz        | No       |                         | En desarrollo                     |
| Paja                     | No       |                         | En desarrollo                     |
| Bagazo de caña de azúcar | No       |                         | En desarrollo                     |
| Rastrojo de maíz         | No       |                         | En desarrollo                     |
| Hojarasca                | No       |                         | En desarrollo                     |

Fuente: (All Power Labs, 2018)

En la tabla se muestra comparación de precios referenciales del combustible

Tabla 3. 6 Comparación de precios de combustible

| COMPARACIÓN DE PRECIOS DEL COMBUSTIBLE |                          |
|--|--------------------------|
| Combustible                            | Rango de Precios         |
| Diesel                                 | \$0.35 - 0.50 kWh        |
| Biomasa                                | <b>\$0.02 - 0.05 kWh</b> |

Fuente: (All Power Labs, 2018)

El Power Pallet GEK, está diseñado a una escala que permite a los usuarios obtener fácilmente combustible de biomasa de forma local y sostenible. Esta característica permite una operación y administración fáciles sin depender de las cadenas de suministro de biomasa a gran escala, lo que permite el funcionamiento en ubicaciones remotas y países en desarrollo.

Tabla 3. 7 Comparación de rendimiento de motor de 10 kW y 20 kW

| <b>CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE BIOMASA</b> |  |                    |  |                    |
|--|--|--------------------|--|--------------------|
|  | <b>Motor de 10 kW (a 75% de carga)</b> |                    | <b>Motor de 20 kW (a 75% de carga)</b> |                    |
|  | Peso de la Biomasa                     | Potencia de Salida | Peso de la Biomasa                     | Potencia de Salida |
| <b>1 Hora</b>                            | 9 kg                                   | 7.5 kWh            | 18 kg                                  | 15 kWh             |
| <b>8 Horas</b>                           | 72 kg                                  | 60 kWh             | 144 kg                                 | 120 kWh            |
| <b>24 Horas</b>                          | 216 kg                                 | 180 kWh            | 432 kg                                 | 360 kWh            |

Fuente: (All Power Labs, 2018)



## Capítulo IV:

### Montaje del gasificador

A continuación, se muestran imágenes del montaje del gasificador.

#### 4.1 Lugar de instalación

Se ubicará a un costado del bloque de aula de la FETD, colindante con el cerramiento del predio de la UCSG con cooperativa San Pedro.

#### 4.2 Montaje del gasificador

A continuación, se puede apreciar en la figura 4.1 la vista del tanque que forma el equipo reactor.



Figura 4. 1 Vista superior del tanque (reactor)

Fuente. El autor

A continuación, se muestra la limpieza del tanque (reactor) la cual debe estar libre de partículas, ya que se deben de producir las reacciones de pirolisis, oxidación y reducción por el calentamiento del aire y la biomasa.



Figura 4. 2 Revisión del tanque para reactor

Fuente. El autor

El reactor emplea la técnica *downdraft* y esto involucra que la reacción producida es una combustión controlada de la biomasa. También se producirán reacciones endotérmicas (necesita calor). Las reacciones de la gasificación se producen en la etapa de pirolisis y de reducción. En cambio, la oxidación (producida por combustión) se controla mediante la aportación exacta de aire u oxígeno del gasificador.

A continuación, en la 4.3 se puede ver el reactor preparado para los procesos de pirolisis. Seguidamente, en la figura 4.4 se observa la vista frontal del reactor, hecho de acero inoxidable.



Figura 4. 3 Reactor preparado para pirolisis

Fuente. El autor



Figura 4. 4 Vista frontal del reactor

Fuente. El autor

A continuación, se puede ver en la figura 4.5 el reactor preparado para conexión con otros componentes del gasificador.



Figura 4. 5 Reactor preparado para conexión con otros componentes.

Fuente. El autor



Figura 4. 6 Conexiones de las mangueras de quemadores

Fuente. El autor



Figura 4. 7 Montaje de tolva con reactor

Fuente. El autor

El gasificador está compuesto por la tolva, que es un tanque de 55 galones con una tapa en la parte superior.

El cubo de secado es un recipiente de doble pared, dentro del mismo existe un tornillo sin fin con un motor de 12 VDC, además este cubo tiene dos orificios por donde pasa el syngas.

Un tubo cilíndrico que conecta el cubo de secado con el reactor, en los extremos de este tubo existen dos orificios, en uno de los orificios se recupera los gases que expulsa el generador por el escape (CO<sub>2</sub> Y H<sub>2</sub>O) y en el otro orificio se adaptara el escape del generador.

El reactor consta internamente de las siguientes partes: cenicero es donde se acumula las sedimentaciones de cenizas que vayan cayendo.

Reactor interno en el mismo van adosadas cinco mangueras metálicas las cuales se encuentran conectadas a cinco quemadores que se encargan de recircular el aire de la parte exterior hacia la parte interior de forma descendente.

El estrechamiento, en este lugar existen las reacciones de oxidación y reducción, esta zona alcanza temperaturas mayores a los 1000°C y se dará lugar a la generación del syngas.

El reactor en la parte exterior consta de:

Un orificio que sirve para retirar la ceniza de la parte interna del mismo.

Un ducto que está a la altura del estrechamiento el mismo que sirve para recoger la eficiencia caliente de la biomasa (combustionar directamente).

Un ducto en la parte superior donde se inyecta aire desde el exterior. En el otro extremo de la parte superior existe un orificio donde va conectado el ciclón.

El ciclón tiene un orificio en la parte inferior que sirve para recoger las partículas más grandes del syngas y un líquido pegajoso llamado alquitrán, en la parte superior va conectada una manguera metálica hacia uno de los orificios del cubo de secado, el otro orificio de este cubo va conectado a la parte inferior del filtro, el syngas nunca se mezcla con la biomasa que se está secando porque este cubo de secado cuenta con doble fondo.

Por último en la parte superior del filtro tenemos llaves para recoger el syngas procesado, el cual podría ser utilizado por un motor de combustión adecuada para funcionar con syngas como combustible. El motor con su generador acoplado puede producir electricidad.

En la figura 4.8 se muestra el montaje final del gasificador, el mismo que fue supervisado por el tutor ingeniero José Martillo A.



Figura 4. 8 Terminación del montaje con supervisión del ing. Martillo

Fuente. El autor

El montaje del sistema de gasificación, también contó con la colaboración del estudiante Héctor Chong,

## Conclusiones

La gasificación es el uso de calor para transformar biomasa sólida u otros sólidos carbonosos en un combustible inflamable sintético similar al "gas natural".

Mediante la gasificación, se convierte casi cualquier materia orgánica seca en un combustible de combustión limpia que puede reemplazar el combustible fósil.

La gasificación de biomasa es un método limpio y neutral en carbono para producir electricidad.

El gasificador (lecho móvil) con la técnica downdraft produce un gas de síntesis (syngas) de buen poder calorífico, es un gas pobre de bajo contenido de alquitrán.

El gas pobre, resultado de la gasificación de biomasa con aire tiene un elevado contenido de sustancias volátiles combustibles (CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>), valor calórico bajo entre (4-7 MJ/Nm<sup>3</sup>) una alta estabilidad al encendido pudiendo ser utilizado en motores de combustión interna.

La tusa del maíz (mazorca de maíz sin grano) posee bajo contenido de humedad interna del 10,52 %, cercano al porcentaje referente para algunos combustibles sólidos. En el caso de las cenizas su porcentaje es relativamente alto, aproximadamente 7,7 %.

La gasificación de tusa de maíz para un sistema de generación eléctrica contempla que el reactor (subsistema de un gasificador) donde entra la biomasa para ser degradada térmicamente en ausencia de oxígeno, luego los productos entran al reactor donde ocurre el 'reformado' con vapor y las reacciones de gasificación, saliendo el syngas.

El syngas producido está formado mayormente por monóxido de carbono y una pequeña fracción de hidrógeno, que son los gases deseables. Es un



gas combustible, mezcla que consiste principalmente de hidrógeno, monóxido de carbono.

## **Recomendaciones**

Se recomienda utilizar la tusa de maíz como biomasa esta debe ser secada y analizada en laboratorios para que su composición exotérmica sea adecuada para la combustión en el tipo de gasificador propuesto.

El uso de estos sistemas es recomendable en zonas geográficas donde el suministro eléctrico es difícil y existe alta disponibilidad de biomasa (estos autores analizan el empleo de sistemas de gasificación usando cáscara de arroz).

Se recomienda que el personal sea capacitado en montaje y puesta en marcha de gasificador, así se evitaría accidentes por maniobras de herramientas o quemaduras cuando el sistema de gasificación esté operando.

Proporcionar de un motor de combustión interna con su respectivo generador eléctrico, el dimensionamiento indica que debe ser un motor de 10 kW.

Se recomienda implementar un laboratorio de energías renovables para que el uso del sistema gasificador sea de mayor provecho.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrocalidad - La Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario. (2015). Obtenido de <http://www.agrocalidad.gob.ec/>
- All Power Labs. (2018). *Downdraft Gasifier*. Obtenido de <http://www.allpowerlabs.com/gasification-basics/gasifier-types>
- Almache, C., & Torres, G. (2015). *Determinación de las características energéticas de la tusa de maíz con variación del contenido de humedad, densidad y relación aire-combustible*. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10698/1/T-ESPE-049672.pdf>
- Almeida, C. (2014). *Diseño, selección y construcción de un gasificador de desechos del maíz*. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/18751/1/Tesis%20de%20Cristhian%20Almeida%20Murillo.pdf>
- Arcia, M. (2013). *TIPOS DE BIOMASA SEGÚN SU ORIGEN-IDA.E*. Obtenido de <http://icasasecologicas.com/tipos-de-biomasa/>
- Arenas, D. (2009). *PROPUESTA DE DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN dDE CAFÉ*. Obtenido de REPOSITOTIO DIGITAL DE PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA:  
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7371/tesis407.pdf>
- Blog Universidad de Jaén. (s.f.). *Diagnóstico sobre la situación energética*. Obtenido de La energía:  
<http://www.ujaen.es/huesped/planestra/2/2e.html>
- BUN-CA. (2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass* . Obtenido de Biomass Users Network (BUN-CA):

[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/\\$FILE/Manuales\\_sobre\\_energ%C3%A9tica\\_renovableBIOMASA.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%A9tica_renovableBIOMASA.pdf)

Carrillo, L. (2004). *Energía de Biomasa*. Obtenido de <http://www.bionica.info/biblioteca/Carillo2004.pdf>

Coello, P., & Castillo, L. (2007). *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú*. Lima: Soluciones Prácticas. Obtenido de <https://solucionespracticas.org.pe/Descargar/96/459>

Demirbas, M., Balat, M., & Balat, H. (2009). "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development". *Energy Convers Manage*. Vol. 50, pp.1746-1760.

Enerpro Cía Ltda. (2016). *Proyecto de Generación de Energía por Medio de Gasificación de Cuesco de Palma Africana en Sto. Dgo*. Obtenido de [http://ecuador.ahk.de/fileadmin/ahk\\_ecuador/Uploads-Webseite/Dienstleistungen/Dokumente/Projekte/2016/AHKGyeBiomasaCuescoPalmaSSanchez180816.pdf](http://ecuador.ahk.de/fileadmin/ahk_ecuador/Uploads-Webseite/Dienstleistungen/Dokumente/Projekte/2016/AHKGyeBiomasaCuescoPalmaSSanchez180816.pdf)

Espinoza, R., & Torres, G. (2017). "DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DE LA TUSA DE MAÍZ CON VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, DENSIDAD Y RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE". Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10698/1/T-ESPE-049672.pdf>

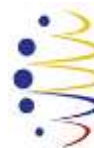
Forero, J. (2013). *Tusa del maíz: una fuente de energía renovable*. Obtenido de <https://revistas.upb.edu.co/index.php/universitas/article/viewFile/2202/1975>

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2015). Obtenido de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>

- Jayaraj, S., & Muraleedharan, C. (2008). *"Dual fuel mode operation in diesel engines using renewable fuels: Rubber seed oil and coir-pith producer gas"*. *Renewable Energy*. Vol. 33, pp. 2077-2083.
- Kirkles, G., Verbong, P., & Arjan, F. (2011). *"Biomass gasification: Still promising? A 30 year global overview"*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 15, pp. 471-481.
- Lesme, R., García, L., & Oliva. (2016). *Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso*. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852016000200002#f0202216](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000200002#f0202216)
- Loaiza, M. (2015). *MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL*. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134250/Modelo-de-generacion-de-energia-a-partir-de-biomasa-forestal.pdf;sequence=1>
- Míguez, C. (2013). *La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y exergética*. Obtenido de <http://eprints.ucm.es/17794/1/T34108.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2017). Obtenido de <https://www.agricultura.gob.ec/>
- Rhenals, J., & Torres, M. (2016). <http://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/123456789/669/Informe%20final.pdf?sequence=1>. Obtenido de <http://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/123456789/669/Informe%20final.pdf?sequence=1>
- Romero, A. (2010). *Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles*. Obtenido de Vol. 104, Nº. 2, pp 331-345: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Siliceo, M. (2014). *Análisis de la productividad industrial de bioetanol*. Obtenido de

<https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46727/SiliceoRodriguezMLuisa.pdf;jsessionid=F6671045209AC65CCA443778247C4361?sequence=2>

Tobar, E., & Quijije, K. (2017). *Estudio de factibilidad en la implementación de una empresa de reciclaje a base de cáscara de arroz en el cantón Daule, provincia del Guayas, con el fin de abastecer a plantas industriales de paneles solares*. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/20191/1/TESIS%20CASCARA%20DE%20ARROZ%20%202017MAYO.pdf>



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Ruiz Caicedo, Johnny Pedro** con C.C:1202433098 autor del trabajo de titulación: **“Montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft para la obtención de energía eléctrica a través de biomasa”** previo a la obtención del título de **Ingeniero en Eléctrico-Mecánica** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 30 de Agosto del 2018

---

**Ruiz Caicedo, Johnny Pedro**

C.C: 1202433098



## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

|  |  |                                       |    |
|--|--|---------------------------------------|----|
| <b>TEMA Y SUBTEMA:</b>   | “Montaje de un sistema didáctico de gasificación downdraft para la obtención de energía eléctrica a través de biomasa”   |                                       |    |
| <b>AUTOR(ES)</b>   | Ruiz Caicedo, Johnny Pedro   |                                       |    |
| <b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>                                       | Ing. Martillo Aseffe José Alfonso MSc.   |                                       |    |
| <b>INSTITUCIÓN:</b>  | Universidad Católica de Santiago de Guayaquil  |                                       |    |
| <b>FACULTAD:</b>   | Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo   |                                       |    |
| <b>CARRERA:</b>  | Ingeniería Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial  |                                       |    |
| <b>TITULO OBTENIDO:</b>  | Ingeniero en Eléctrico-Mecánica  |                                       |    |
| <b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>                                       | 30 de agosto del 2018  | <b>No. DE PÁGINAS:</b>                | 71 |
| <b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>  | Energía Renovables, Electricidad   |                                       |    |
| <b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>                                   | Palabras Claves: Gasificador didáctico, biomasa, generador, motor combustión, energía renovable.   |                                       |    |
| <b>RESUMEN:</b>  | <p>El presente trabajo de titulación plantea la propuesta de montaje de un sistema gasificador de biomasa a pequeña escala, el mismo que puede ser utilizado como un equipo didáctico, capaz de generar electricidad si se conecta con un motor de combustión adecuado para gas pobre o syngas. El objetivo principal de este trabajo es describir un estado de arte de la gasificación por biomasa. También se aporta con el montaje de un sistema de gasificación por biomasa a pequeña escala, el cual servirá para la enseñanza de obtención de energía a través de fuentes renovables no convencionales, Se emplea metodologías de investigación como Bibliográfica y Documental, en la cual se recopilan artículos científicos relacionados con resultados de tratamiento de la información para sistemas a pequeña escala de gasificación por biomasa, se emplea también el método Descriptivo por cuanto se describe un sistema de generación eléctrica a través de un gasificador por biomasa. Y emplea método empírico por aplicar procedimientos de montaje tanto eléctrico como mecánicos. La contribución de este trabajo es el montaje de un sistema didáctico de gasificación por biomasa para generar energía eléctrica que servirá para proceso de enseñanza en la carrera de Ingeniería en Electricidad, Agropecuaria, Agroindustria de la FETD.</p> |                                       |    |
| <b>ADJUNTO PDF:</b>  | <input checked="" type="checkbox"/> SI   | <input type="checkbox"/> NO           |    |
| <b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>                                      | <b>Teléfono:</b><br>+593.939407971   | E-mail: johnnypedroruiz72@hotmail.com |    |
| <b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b> | <b>Nombre: Luis Orlando Philco Asqui</b>   |                                       |    |
|  | <b>Teléfono: +593.980960875</b>  |                                       |    |
|  | <b>E-mail:luis.philco@cu.uceg.edu.ec</b>   |                                       |    |
| <b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>                              |  |                                       |    |
| <b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>                          |  |                                       |    |
| <b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>                                       |  |                                       |    |
| <b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>                            |  |                                       |    |