

ARRANQUE DE UN GASIFICADOR A NIVEL LABORATORIO UTILIZANDO RESIDUOS DE PODA

STARTING A GASIFIER AT LABORATORY LEVEL USING WASTE OF PODA

Castro Martínez Sergio Omar

Universidad Nacional Autónoma de México
ing.scastromz@hotmail.com

Castro González Alejandra

Universidad Nacional Autónoma de México
alcastro@unam.mx

Resumen

Este trabajo propuso la instalación y el arranque de un equipo de gasificación de flujo descendente alimentado con biomasa utilizando residuos de la poda de especies de árboles de Ciudad Universitaria (CU). El gasificador se puso en marcha iniciando con la regulación de flama, verificación del correcto funcionamiento del equipo, además de la identificación, uso y explicación detallada de cada uno de los instrumentos que componen al equipo de gasificación. El equipo de gasificación tiene una capacidad de producción de 10 kW de gas de síntesis para alimentar un motor de combustión interna a base de gas con dicha potencia, la capacidad de almacenamiento depende principalmente de la densidad de la materia prima a procesar. Sin embargo, se conoce que la tolva que alimenta al proceso tiene un volumen de 0.013 m³ y tiene un consumo de biomasa en un rango de 2 a 15 kg/h. Este trabajo dejó las bases y la ingeniería básica de cada uno de los elementos que componen al equipo. Con la gasificación de biomasa se puede obtener una eficiencia térmica de gasificación del 92.10% en las condiciones máximas de operación y con el valor calorífico más alto de la madera, y así un ahorro beneficio de \$90,235.50 mn y una reducción de emisiones de CO₂ de 18,889.44 kg de CO₂ por cada 8,760 horas que el gasificador produzca gas de síntesis.

Palabras Clave: biomasa, gas de síntesis, gasificación, residuos de poda.

Abstract

This work proposed the installation and start-up of a downflow gasification equipment fed with biomass using waste from the pruning of trees from University City. The gasifier started up with the regulation of flames, verification of the proper functioning of the equipment, as well as the identification, use and detailed explanation of each of the instruments of the gasification equipment. The synthesis gas had a potential of 10 kW to feed a internal combustion engine. The storage capacity depends mainly on the density of the raw material to be processed. However, it is known that the hopper that feeds the process has a volume of 0.013 m³ or 2 to 15 kg/h. This work allowed us to raise the basic engineering design on gasifiers. The thermal efficiency of the gasification process was of 92.10% under the maximum operating conditions. The results of economic study were a saving of \$90,235.50 pesos and a reduction of CO₂ equivalent of 18,889.44 kg of CO₂ per 8,760 hour that the gasifier produces synthesis gas.

Keywords: *biomass, synthesis gas, gasification, pruning of trees.*

1. Introducción

La biomasa es un recurso que ha sido utilizado desde hace miles de años por los antepasados, como un combustible para la producción de calor. Esta materia además de tener cualidades caloríficas, tiene la ventaja de no emitir CO₂ a la atmósfera al momento de su combustión, todo esto por el equilibrio que se realiza desde que es una materia viva, una planta. Dichas ventajas han permitido que se realicen investigaciones de tal forma que el proceso de combustión sea más eficiente y se obtenga mayor beneficio de la biomasa [3]. A partir de ello existen proceso térmico y químicos que han permitido que la biomasa se convierta en un medio sustentable para la producción de energía. El proceso de gasificación es un proceso termoquímico que fue utilizado y desarrollado durante la segunda guerra mundial, esta tecnología a pesar de ser de gran utilidad a lo largo de éste periodo, perdió importancia con la introducción de los combustibles líquidos derivados del petróleo. Sin embargo, el incremento continuo en el costo del petróleo ha propiciado que se retomen y desarrollen nuevas tecnologías que permitan sustituir a estos

combustibles mediante la preservación del medio ambiente. La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico en un ambiente pobre en oxígeno que permite la transformación de material orgánico sólido en un gas combustible con un poder energético de gran interés. La importancia se enfoca principalmente en el gas obtenido a través del proceso tras ser debidamente acondicionado, ya que su uso puede ser destinado para la producción de energía térmica o como combustible para alimentar una caldera, una turbina o motor [2].

La producción de gas con un gasificador de flujo descendente permite la producción de gas con bajo contenido de alquitrán, es decir un combustible con las características necesarias para hacer funcionar un motor de combustión. En países europeos industrializados la gasificación de biomasa ha sido un tipo de energía renovable que ha ido ganando un lugar en la producción de energía, es por ello que esta fuente de energía debe ser una tecnología que debe ser considerada y experimentada en el país para conocer los usos que se le pueden asignar, de tal forma que vaya ganando terreno en la industria energética hasta lograr un porcentaje de uso considerable como combustible alternativo o sustituto de los combustibles fósiles [3].

2. Desarrollo

Se instaló un equipo de gasificación de biomasa de flujo descendente en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El gasificador producirá la mayor cantidad de gas de síntesis con bajo contenido de alquitrán e impurezas mediante el proceso de conversión termoquímica, con la finalidad de que el gas pueda utilizarse para alimentar un motor de combustión y así producir electricidad. El gasificador de flujo descendente GEK TOTTI se ha seleccionado gracias a las diferentes investigaciones realizadas alrededor del mundo, y enfocadas al fin que posteriormente se le quiere dar, como a un motor de combustión a base de gas. El gasificador de flujo descendente ha resultado la solución para eliminar las impurezas contenidas en el gas de síntesis mediante el arrastre de alquitrán con la corriente de los gases en la etapa de pirólisis. En su trayecto descendente los alquitrán deben pasar a través de la zona de combustión y así es como se

transforman en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano. Dependiendo de la temperatura de la zona de combustión y del tiempo de contacto de los vapores con el alquitrán, se logra una descomposición más o menos completa de los alquitranes. La principal ventaja de los gasificadores de corrientes paralelas radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán apropiado para aplicarlo a motores. El GEK TOTTI que es un kit experimental de gasificación con torre de integración térmica total, por sus siglas en inglés, es un gasificador de flujo descendente configurado para alimentar motores para la producción de electricidad. Así mismo permite la recuperación y recirculación de calor mediante el secado del combustible de alimentación con el calor de los gases de escape. Los resultados que ofrece el fabricante del sistema GEK TOTTI es una mejor combustión y una mayor temperatura de craqueo para la conversión de alquitrán en gases combustibles, así como una mayor eficiencia del gasificador. Teóricamente el sistema de gasificación a su máxima capacidad puede producir gas con un potencial de energía capaz de producir electricidad a través de un motor de 10 kW.

Descripción de los componentes del equipo de gasificación y su principal función dentro del proceso para la producción de gas de síntesis. También se da a conocer el proceso de ensamble y las herramientas necesarias para que el equipo sea armado desde su proceso inicial considerando que se tiene un kit experimental como el que se muestra en la figura 1. El equipo de gasificación está integrado por:

- Tolva de materia prima.
- Control de nivel de combustible.
- Reactor de gasificación.
- Boquillas de aire.
- Reducción de campana.
- Ciclón.
- Sistema de transmisión de gas.
- Medidor de monóxido de carbono.
- Zona de secado.
- Intercambiador de calor.
- Entrada de aire.
- Puerto de iluminación.
- Perilla y rejilla.
- Filtro de gas lecho empacado.
- Quemador.
- Medidor de temperatura.



Figura 1 Fotografía de los componentes del gasificador de flujo descendente

Para el ensamble de los componentes es necesario un kit de herramienta básica. Para el compresor de aire el fabricante recomienda que se utilice un equipo no mayor a 200 psi de presión para alimentar el eyector y así producir la flama final.

Dimensiones del equipo de gasificación

En las figuras 2, 3 y 4, se muestran las dimensiones de los componentes principales que conforman el equipo de gasificación, para un panorama general del tamaño y diseño del equipo.

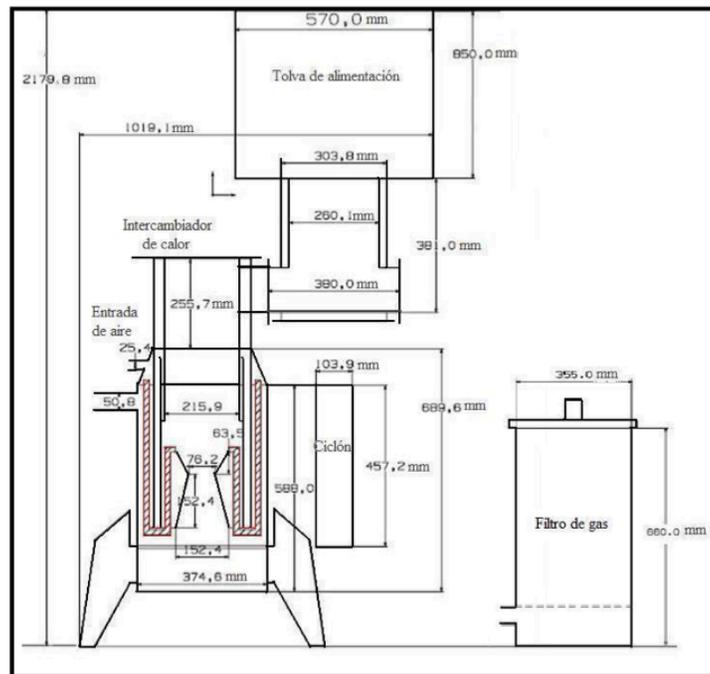


Figura 2 Diagrama general y dimensiones del equipo de gasificación experimental.



Figura 3 Diagrama y dimensiones del filtro de gas empacado.

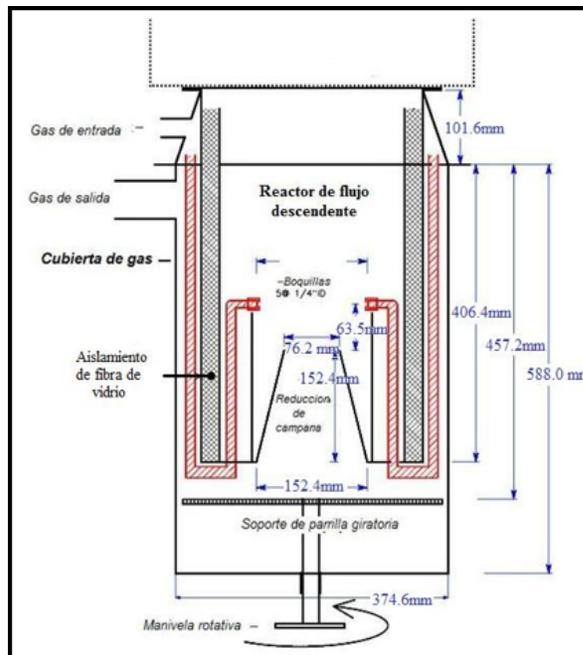


Figura 4 Diagrama y dimensiones del reactor de flujo descendente

En la figura 2 se muestra el diagrama general del equipo de gasificación, en él se observa el arreglo de los principales componentes que conforman el proceso de manera interna como externa, así como las dimensiones de cada elemento. En la

imagen se muestra la tolva de alimentación, elemento que suministra y almacena la biomasa, el intercambiador de calor, etapa del proceso que se da la entrada y salida de aire, el reactor que es el corazón del proceso en donde se realiza la pirólisis, combustión y reducción y el filtro de gas, lugar donde se realiza la última purificación del gas producto. El filtro mostrado en la figura 3, es el elemento que tiene el último contacto con el gas obtenido del proceso de gasificación antes de ser procesado en cualquiera de sus usos, es por eso que de él depende que el resultado de la aplicación tenga mayor o menor eficiencia, el filtro de gas, se convierte en un elemento muy importante ya que gracias a él se pueden eliminar gran parte de los alquitranes producidos de la pirólisis que no fueron disueltos en la combustión. El reactor de gasificación como ya se indicó es uno de los componentes con mayor importancia del proceso, por ello es esencial conocer su estructura de este elemento. En la figura 4 se muestran los elementos internos que lo conforman, entradas y salidas de aire, conexión reducción campana, parrilla giratoria, cubierta de gas y aislamiento de fibra de vidrio, así como las dimensiones que describen a cada parte. En la tabla 1 se muestran todos los componentes del gasificador a operar.

3. Resultados

Operación del gasificador de flujo descendente

La operación del gasificador de flujo ascendente, consta de fases siguientes:

- *Preparación final antes de la puesta en marcha.* La puesta en marcha del equipo de gasificación de flujo descendente, requiere de diferentes etapas antes de iniciar la operación:
 - ✓ El primer paso a seguir es la recolección de la biomasa en forma de astillas no mayores a 5 cm y no menores a 1 cm de longitud. Para obtener una reacción uniforme a lo largo de la astilla y mayor provecho de la madera, es necesario llevar a cabo esta indicación de lo contrario quedarán muchas astillas sin reaccionar y la eficiencia del gasificador disminuirá. La biomasa utilizada en la UNAM es la madera recaudada de la poda de los árboles de toda Ciudad Universitaria.

Tabla 1 Resumen de componentes del equipo de gasificación.

	Componente	Especificaciones	Funcionamiento
1	Tolva de materia prima	Barril de acero de 0.113 m ³	Almacenar la materia prima
2	Zona de secado	Elemento de acero y en forma de "L"	Calentar y disminuir la humedad de la materia prima
3	Controlador de nivel	Paletas ajustables 12VCC	Accionar el suministro de combustible cuando el nivel baje durante la operación
4	Intercambiador de calor	Elemento de acero	Zona donde se realiza la etapa de pirólisis, se enfría la aire y se calienta la biomasa
5	Reactor de gasificación	Acero inoxidable	Corazón del proceso en él se lleva a cabo el proceso de combustión y reducción
6	Entrada de aire	Válvula de esfera de 1"	Permitir la entrada del agente gasificante al sistema
7	Boquillas de aire	Hierro colado de 3/8" y orificio de 5/32"	Elementos que direccionan el aire al proceso de combustión
8	Puerto de iluminación	Niple cuerda corrida de 1/2"	Conducto que permite se encienda el combustible en el reactor
9	Reducción de campana	Reducción de 6 a 3" de acero inoxidable	Controla la velocidad de flujo y por lo tanto el tiempo de residencia de los gases que pasan a través de la zona de combustión y reducción
10	Rejilla	Metálica circular	Sostiene el carbón vegetal de la zona de reducción
11	Ciclón	Como metálico	Separa las partículas más grandes que pueden haber sido arrastradas en la corriente de gas
12	Filtro de gas	Barril de acero de 0.063 m ³	Absorbe la mayoría de los alquitranes presentes en el gas de síntesis
13	Sistema de transmisión de gas	Presión recomendada 200 psi	Impulsa el flujo a través del sistema durante el arranque
14	Tubo quemador	Material: acero inoxidable	Mantiene la flama que se produce con el gas de síntesis
15	Alarma de monóxido de carbono	Detecta concentraciones de CO de 11 hasta 999 PPM	Alerta sobre concentraciones de monóxido de carbono
16	Termómetro digital	Rango de Temperatura de -50°C hasta 1300°C	Registra la temperatura del proceso de gasificación en sus diferentes etapas
17	Medidor de humedad	Rango de medición de humedad del 5% - 40%	Registra la humedad relativa de la madera a gasificar
18	Compresor de aire	Capacidad mínima de suministro 200psi	Suministra aire necesario para la combustión del gas de síntesis

- ✓ Es necesario clasificar la biomasa a utilizar de tal manera que, sea biomasa homogénea tanto en grosor como en longitud. La biomasa a utilizar debe tener de máximo 30% de humedad. Esta información se puede obtener al tomar aleatoriamente 5 muestras y medir su porcentaje de humedad con el analizador. Una vez que la biomasa tiene las características mencionadas anteriormente, se llena la tolva de alimentación con la biomasa hasta el nivel que se desea utilizar. Como pruebas preliminares únicamente se llenó hasta completar la capacidad interna del reactor con humedad promedio de 0%.

- ✓ Después de rellenar con biomasa el sistema de alimentación del gasificador, se quita la tapa de la zona de pirólisis y en la parte superior de la reducción de campana se llena con carbón de mezquite. Después de llenar la reducción se agita la manivela del reactor con la finalidad de que el carbón ocupe los espacios vacíos. Se realiza esta acción hasta que el carbón se ubique a 1" o 2" por encima del puerto de encendido, de tal manera que éstos al encenderlos ayuden a acelerar el proceso de arranque.
- *Ignición.* Para encender los pedazos de carbón se requiere de la ayuda de algún tipo de combustible líquido. A través del puerto de iluminación se introduce el combustible y se enciende con un soplete de gas butano. Asegúrese de que el aire fluya a través del reactor, puede que tenga que mantener uno o dos minutos la antorcha para encender el carbón. Una vez que se observa la flama en el carbón se procede a cerrar las tapas y suministrar poco a poco la biomasa al reactor. Para lograr la ignición en el gasificador se utilizó diésel, se rocío sobre el carbón de mezquite y se inyectó un poco de este combustible a través del puerto de iluminación, con ayuda de un soplete de gas butano se proporcionó la flama que encendió la madera.
- *Llamarada.* A los pocos segundos de la iluminación, el gas va a salir de la antorcha. Al principio esto puede no ser un gas combustible hasta que la temperatura se eleve en el reactor. Asegúrese de tener un soplete de gas butano para ayudar a quemar el alquitrán y el humo del vapor en el arranque. Después de unos minutos puede ser posible apagar el soplete y ajustar la mezcla de oxígeno en el arreglo del eyector Venturi (válvula de 3/4). Se recomienda mantener a la mano el soplete en caso de que la antorcha de gas de síntesis se apague y se tenga que encender de nuevo. No debe respirarse el gas cuando esté sin quemar. Después que se quema es muy limpio. Una vez encendida la madera con el carbón de mezquite empezó a salir gas color blanco a través del quemador. Acto seguido se encendió el compresor de aire y se conectó la manguera a la conexión rápida del eyector Venturi. Se reguló la presión del aire de tal modo que se consiguiera un flujo

constante y moderado del gas de síntesis generado por el proceso de gasificación. Se acercó el soplete de gas butano al quemador, poco a poco se abrió la llave de entrada de aire al eyector Venturi hasta conseguir una flama regulada.

Diagrama de flujo

En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo del sistema de gasificación. Ahí se puede observar la transformación del combustible desde su forma sólida hasta el producto o gas de síntesis.

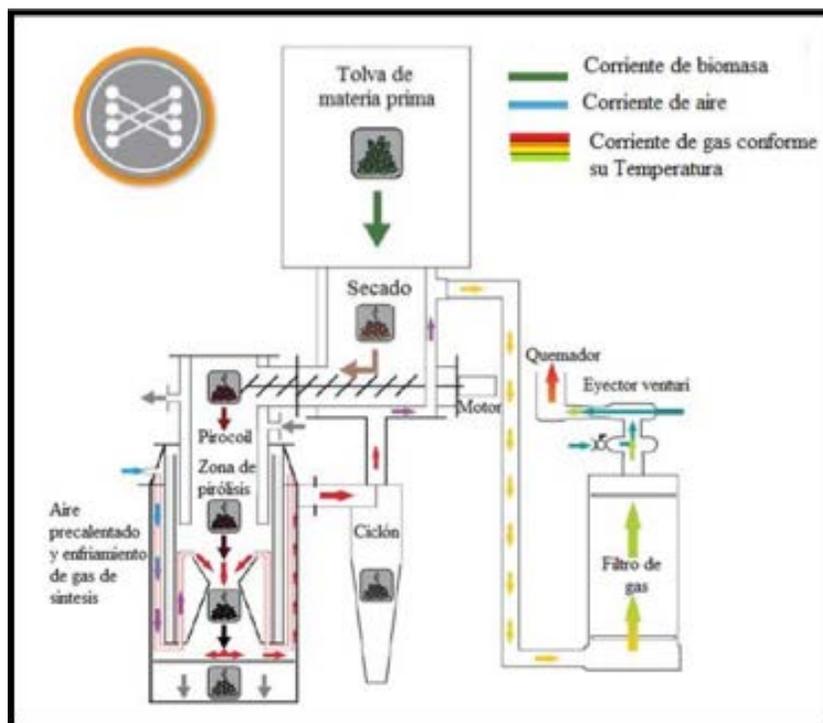


Figura 5 Diagrama de flujo del sistema de gasificación.

La biomasa inicia el proceso al ingresar por la tolva de alimentación, conforme recorre se llega a la zona de secado donde se reduce la humedad del combustible, el proceso de gasificación inicia al pasar por el pirocoil en la etapa de pirólisis, continúa el flujo descendente hasta la parte inferior en donde hay cenizas y gas a su máxima temperatura, el gas al pasar por el ciclón condensa las pequeñas partículas sólidas que arrastra la corriente. El gas pierde temperatura al pasar por

la zona de secado para seguir por la etapa de filtrado y terminar con el descenso de temperatura. El producto se mezcla con aire ambiente y es como se puede obtener la flama dentro del quemador.

Especificaciones de operación del sistema

En figura 6 se pueden ver los medios que influyen y forman parte del proceso de gasificación. El proceso inicia en la tolva de alimentación para descender a la zona de secado y continuar con el pirocoil. A partir de esta etapa hacia adelante inicia la conversión termoquímica de la biomasa.

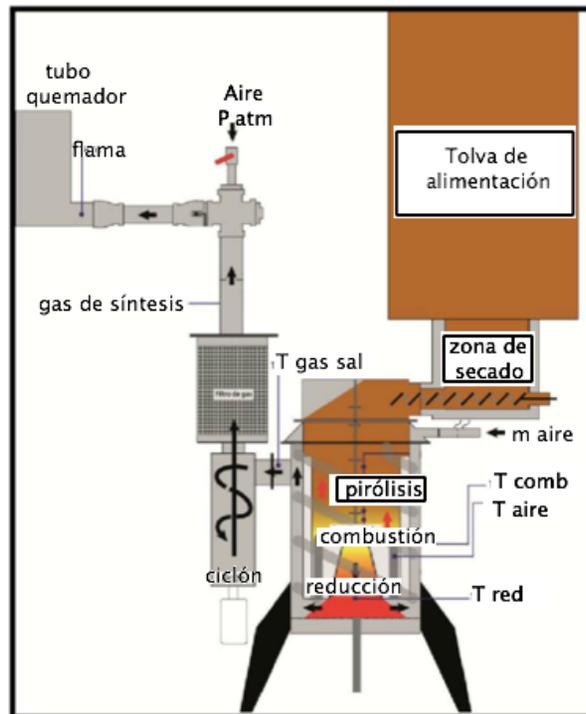


Figura 6. Diagrama de sistema de gasificación.

En la pirólisis el combustible comienza a perder peso, continúa la combustión etapa donde hay una entrada de aire m_{aire} . Aquí existe un incremento de temperatura para que en la reducción el sólido remanente de la combustión, se convierta en gas. El gas producido circula en sentido ascendente hacia el ciclón, para condensar los alquitranes presentes para asegurar la pureza del gas, el filtro se encarga de limitar el paso a las partículas de mayor tamaño. Finalmente, el gas de síntesis se mezcla

con aire atmosférico que al aplicar una chispa producen una flama, que se podrá visualizar en el tubo quemador.

Presión de trabajo

La presión de trabajo es uno de los parámetros importantes ya que influye en la composición del gas obtenido. Para los gasificadores de flujo descendente operado con biomasa es más favorable la gasificación a presión atmosférica (101.325 kPa), con ligera depresión (Cuba, 2011). Para el caso de la Ciudad de México el gasificador operara a una presión atmosférica de 77.89 kPa.

Caudal de biomasa

El caudal de entrada depende del tipo de biomasa que se utilice. De acuerdo al fabricante el rango de consumo se encuentra 2.5–14 kg/h.

Temperatura

La temperatura de gasificación dentro de un reactor de flujo descendente operado con biomasa está dentro del intervalo 700-1400 °C. Para este caso y condiciones de operación, el valor registrado es de 850 °C.

Agente gasificante

Son diversas las opciones que se pueden utilizar como agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua, hidrógeno). El agente gasificante que se eligió para operar el gasificador de flujo descendente fue aire. A pesar de obtener un poder calorífico menor con respecto a los demás, se obtiene la energía necesaria para mantener el proceso y su costo es nulo.

Diagrama de bloques del proceso de gasificación

En la figura 7 se explica el proceso de gasificación mediante un diagrama de bloques donde se muestran los elementos más relevantes que intervienen en el proceso.

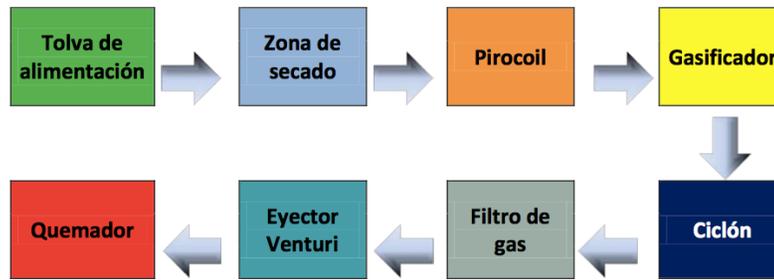


Figura 7 Diagrama de bloques del sistema de gasificación.

En la figura 8 se muestra al equipo de gasificación de flujo descendente trabajando con biomasa, obtenida como ya se mencionó de la poda de los árboles de Ciudad Universitaria. En la imagen se observa que el producto del proceso termoquímico, el gas de síntesis, se utiliza como combustible para la generación de energía térmica mediante una flama.



Figura 8 Fotografía del gasificador operando.

Balance de masa y energía

La figura 9 muestra la entrada y salida de masa o energía de los elementos más representativos del proceso. El proceso inicia en la Tolva de alimentación con m_{1mad} y E_{1mad} que corresponden a la biomasa que será procesada para la

obtención de gas de síntesis, y procede en la zona de secado donde E_{2mez} procedente del ciclón contribuye a la evaporación del agua contenida en la biomasa entrante, cambiando las propiedades de la materia en m_{2mad} y E_{2mad} . En el pirocoil comienza la etapa de pirólisis donde al elevarse la temperatura del proceso y se da la descomposición de la biomasa, la madera pierde masa m_{3mad} .

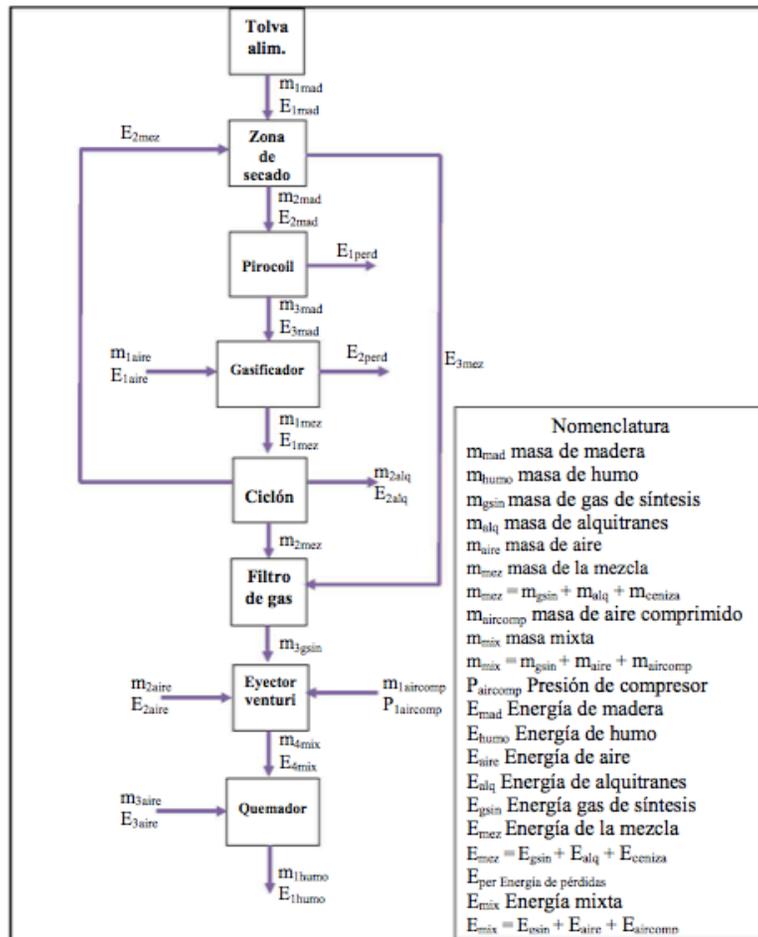


Figura 9 Diagrama de balance de masa y energía.

Es importante mencionar que al haber un incremento en la temperatura existe una pérdida de energía representada con E_{1perd} . En la gasificación hay una entrada de aire m_{1aire} , E_{1aire} aquí es donde ocurren la mayor cantidad de reacciones y por tanto hay un incremento en la temperatura, generación de alquitranes, cenizas y el gas de síntesis representado con m_{1mez} y E_{1mez} . El producto de la gasificación pasa a través del ciclón donde existe una condensación de alquitranes y la energía de los

gases generados es utilizada para calentar la biomasa en la tolva de secado. La m_{2mez} pasa por su última etapa de purificación a través del filtro de gas, las impurezas se quedan atrapadas permitiendo únicamente el acceso al gas de síntesis m_{3gsin} para continuar por el eyector Venturi donde se mezclan aire atmosférico, aire comprimido y el gas m_{4mix} para dar como resultado el gas de síntesis indicado como "humo" para la generación de una flama a través del quemador.

Cálculo de la eficiencia

Es importante determinar el funcionamiento técnico real y la viabilidad de uso de un equipo. Se debe cuantificar la capacidad de conversión de lo suministrado contra lo entregado tal como lo define la FAO [4]. Existen dos diferentes definiciones para determinar la eficiencia del gasificador, si se emplea el gas para aplicaciones de motor y si se emplea el gas para combustión directa:

- Para aplicaciones de motor, ecuación 1.

$$\eta_m = \frac{H_g Q_g}{H_s M_s} \times 100 \quad (1)$$

- Para aplicaciones de combustión directa, ecuación 2.

$$\eta_m = \frac{Q_{gen}}{Q_{sum}} = \frac{H_g Q_g + Q_g \rho_g c_p \Delta T}{H_s M_s} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

Q_{gen} = Flujo de calor generado (kW)

Q_{sum} = Flujo de calor suministrado (kW)

η_m = Eficiencia mecánica de la gasificación (%)

η_{TH} = Eficiencia térmica de la gasificación (%)

H_g = Valor calorífico del gas (kJ/m³)

Q_g = Flujo de volumen de gas (m³/s)

H_s = Valor calorífico inferior del combustible del gasificador (kJ/kg)

M_s = Consumo de combustible sólido del gasificador (kg/s)

ρ_g = densidad del gas (kg/m³)

c_p = Calor específico del gas (kJ/kg K)

ΔT = Diferencia de temperaturas entre gas de salida del quemador y el combustible que entra al gasificador (K)

Debido a que al producto del proceso de gasificación se utilizará para la producción de energía térmica, se debe de utilizar la ecuación 2, para poder calcular la eficiencia del equipo de gasificación. Es importante destacar que se determinará la eficiencia térmica del gasificador con datos teóricos del combustible FAO [4] y con valores técnicos del equipo de gasificación de acuerdo al fabricante. Se consideran estos para analizar el gas producto del proceso de gasificación con madera de la poda de los árboles de Ciudad Universitaria. Para la tabla 2 se considera el PCI, debido a que se desconoce el contenido real de humedad del combustible. En la tabla 3 se dan las composiciones de gas que se obtienen de los gasificadores comerciales de flujo descendente, de madera y carbón vegetal, que operan con combustibles con una humedad de baja a media (20% para madera y 7% para carbón vegetal) [3].

Tabla 2 Promedio de valores caloríficos inferiores [3].

Combustible	Contenido de humedad [%]	Valor Calorífico [kJ/kg]
Madera	20 – 25	13 - 15,000
Carbón vegetal	2 – 7	29 - 30,000

Tabla 3 Composición del gas procedente de gasificadores comerciales [3].

Componente	Gas de madera [%]	Gas de carbón vegetal [%]
Nitrógeno	50 - 54	55 - 65
Monóxido de Carbono	17 - 22	28 - 32
Dióxido de Carbono	9 – 15	1 - 3
Hidrógeno	12 - 20	4 – 10
Metano	2 – 3	0 – 2
Valor calorífico del gas [kJ/m ³]	5,000 - 5,900	4,500 - 5,600

Paredes y Baca [5] realizaron una investigación sobre la Pre factibilidad de instalación de central de generación de Energía Eléctrica con Gasificación de carbón Antracita. La Libertad–Perú, de los resultados se tomó el valor de densidad y de calor específico del gas de síntesis:

- $\rho_g = 0.650$ [kg/m³]
- $c_p = 4.100$ [kJ/kg K]

- $H_g = 5,000 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$
- $H_s = 13,000 \text{ [kJ/kg]}$
- $M_s = 0.00069 \text{ [kg/s]} = 21759.84 \text{ [kg/año]}$
- $Q_g = 0.00138 \text{ [m}^3\text{/s]}$
- $\Delta T = 338.15 \text{ [K]}$

De la ecuación 2:

$$\eta_{TH} = \frac{(5,000 * 0.00138) + (0.00138 * 0.650 * 4.100 * 338.15)}{(13,000 * 0.00069)} * 100 = 90.78\%$$

En tabla 4 se muestra la eficiencia obtenida con 2 cálculos tanto para la madera, como del carbón vegetal.

Tabla 4 Eficiencia obtenida con combustible de madera y carbón vegetal.

Gas madera		Gas de carbón vegetal	
$\rho_g = 0.65 \text{ [kg/m}^3\text{]}$			
$C_p = 4.1 \text{ [kJ/kg}^\circ\text{K]}$			
$H_g = 5000 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$	$H_g = 5900 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$	$H_g = 4500 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$	$H_g = 5600 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$
$Q_g = 0.00138 \text{ [m}^3\text{/s]}$			
$H_s = 13000 \text{ [kJ/kg]}$	$H_s = 15000 \text{ [kJ/kg]}$	$H_s = 12000 \text{ [kJ/kg]}$	$H_s = 14000 \text{ [kJ/kg]}$
$M_s = 0.00069 \text{ [kg/s]}$			
$\Delta T = 338.15 \text{ [}^\circ\text{K]}$	$\Delta T = 378.15 \text{ [}^\circ\text{K]}$	$\Delta T = 338.15 \text{ [}^\circ\text{K]}$	$\Delta T = 273.15 \text{ [}^\circ\text{K]}$
$\eta = 90.78 \text{ (\%)} $	$\eta = 92.1 \text{ (\%)} $	$\eta = 90.02 \text{ (\%)} $	$\eta = 94.4 \text{ (\%)} $

Cálculo del ahorro económico

Con base en los resultados obtenidos en el punto anterior tenemos que el calor generado es:

$$Q_{gen} = (5,000 * 0.00138) + (0.00138 * 0.650 * 4.100 * 338.15) = 8.144 \left[\frac{kJ}{s} \right]$$

$$Q_{gen} = 256.817 \text{ GJ/año}$$

Si se considera Q_{gen} como la energía que se genera en un año por medio del gasificador, la cantidad de gas LP que se requiere para obtener la misma cantidad de energía en el mismo tiempo, está dada por ecuación 3.

$$M_{SLP} = \frac{Q_{gen}}{\eta_{TH} H_{SLP}} \quad (3)$$

Donde:

H_{SLP} = Valor calorífico del gas LP (kJ/m³)

M_{SLP} = Consumo de combustible gas LP (kg/año)

Si tenemos que $\eta_{TH} = 90\%$ y $H_{SLP} = 44715$ kJ/kg, tenemos que el consumo de combustible de gas LP, es de:

$$M_{SLP} = \frac{256,817,019}{0.90 * 44,715} = 6,381.57 \left[\frac{kg}{año} \right]$$

Si el costo del gas LP a junio de 2018 en el Distrito Federal es de 19 \$/kg

$$Ahorro = 6381.7 * 19 = 121,252.3 \left[\frac{\$}{año} \right]$$

Por lo tanto, considerando que el gasificador hace efectivas 8760 horas tendrá una producción de gas de 256.81 GJ al año. Si está cantidad de energía la utilizamos en un quemador de gas LP, el ahorro obtenido será de \$121,252.30 pesos, considerando el costo de kg del gas LP de 19 pesos en junio 2018.

Cálculo de Emisiones de CO₂

Conforme al resultado, se requieren 6,381.57 kg de gas LP para producir una energía de 256.817 GJ/año, el uso de esta combustible causa la emisión de CO₂, de acuerdo a la publicación de OCCC [6] el factor de emisión de CO₂ correspondiente a cada combustible se presenta en la tabla 5.

Para obtener las emisiones de CO₂

$$Emisión\ CO_2LP = 6,381.57 \left[\frac{kg}{año} \right] * 2.96 \left[\frac{kgCO_2}{kg} \right] = 18,889.44 \left[\frac{kgCO_2}{año} \right]$$

Tabla 5 Factor de emisión de la energía [6].

Combustible	Factor de Emisión
Gas LP	2.96 kg CO ₂ /kg GLP
Biomasa	Neutro (El CO ₂ emitido ha sido absorbido previamente)

Por lo tanto, el ahorro de emisión de CO₂ es la misma que se produce al utilizar gas LP ya que las emisiones al utilizar biomasa se consideran neutras.

4. Conclusiones

En los últimos 15 años, los países desarrollados han encontrado en la bioenergía un medio alternativo para la producción de energía. La gasificación es una fuente tecnológica que ha resurgido para la generación electricidad. En México, las universidades desarrollan proyectos bioenergéticos por el gran potencial que representan para la reducción del uso o sustitución de los combustibles fósiles.

La gasificación es un proceso termoquímico en un ambiente pobre en oxígeno que permite la transformación de un material orgánico en combustible. De acuerdo al uso del gas de síntesis a obtener, se elige la configuración adecuada del reactor. La configuración con mayores ventajas de uso según las necesidades de un gas de síntesis más limpio y libre de alquitranes, es el gasificador de flujo descendente o corrientes paralelas.

Este trabajo consistió en la instalación y arranque de un gasificador de flujo descendente de la marca GEK TOTTI con torre de integración térmica. El equipo fue armado y probado. Las pruebas se realizaron con una mezcla de astillas de madera producto de la poda de los árboles de Ciudad Universitaria de la UNAM, el resultado fue satisfactorio, el gas de síntesis obtenido, generó una flama bastante consistente y así la producción de energía térmica limpia.

De acuerdo a las características técnicas del equipo, se calculó que el gasificador tiene una eficiencia térmica de hasta 92.1% trabajando con madera, lo que implicaría un ahorro económico por cada 8760 horas de trabajo de 90,235.50 pesos sustituyendo el gas de síntesis generado por gas LP. Esta sustitución de hidrocarburo representaría una disminución de 18,889.44 kg de CO₂.

La tecnología de gasificación es un proceso que con el paso de los años ha ido ganando terreno como una fuente importante para la sustitución de combustibles fósiles. Por lo tanto, se puede determinar que con base en los resultados obtenidos este proceso representa beneficios económicos y ecológicos que deben motivarnos para aportar nuestro mayor esfuerzo en el cuidado y preservación del planeta.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Castro, A. 2018. Apuntes de la asignatura de “Planeación e Instalación de Sistemas de Bioenergía”. Carrera Ingeniería Eléctrica Electrónica. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, CDMX, México.
- [2] Castro, A. y Ramírez, J.L. Parte I: Teoría. Planeación e Instalación de Sistemas de Bioenergía. Publicación de la Universidad Nacional Autónoma de México. Primera Edición. ISBN 978-607-30-0154-0. CDMX, México.
- [3] Castro, A. y Ramírez, J.L. Parte III: Prototipos Experimentales. Planeación e Instalación de Sistemas de Bioenergía. Publicación de la Universidad Nacional Autónoma de México. Primera Edición. ISBN 978-607-30-0156-4. CDMX, México
- [4] FAO, 1993. El gas de madera como combustible para motores. Estudio FAO Montes. Publicación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- [5] Paredes, R. y Baca, M. 2006. Pre Factibilidad de Instalación de Central de Generación de EE con Gasificación de Carbón Antracita en el Departamento La Libertad – Perú. Publicado por Florida Atlantic University FAU. Florida, EE. UU.
- [6] OCCO, 2014. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero. Publicado por la Oficina Catalana del Canvi Climatic. Cataluña, España.