

UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Estudio del gasógeno como combustible para un motor otto estacionario.

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de: INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ

Nombre del Autor: PAÚL ZHICAY CARDENAZ

Nombre del Director: JUAN RODRIGO CALDERÓN MACHUCA

> CUENCA, ECUADOR 2018

DEDICATORIA

A mis queridos padres Jesús y Nuve por ser mi pilar fundamental y que de forma incondicional estuvieron junto a mí en las buenas y en las malas apoyándome y animándome para la culminación de este trabajo.

Paúl Andrés.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que de manera directa e indirecta colaboraron con la realización de este trabajo de graduación.

Gracias al Dr. Juan Calderón por el apoyo en la ejecución y dirección de este trabajo, y por todo el tiempo invertido en la revisión del documento.

Un agradecimiento especial a mis padres Jesús y Nuve ya que gracias a ellos, por su apoyo incondicional en todo los años universitarios se logró alcanzar una meta más en mi vida.

Paúl Andrés.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	. vii
ÍNDICE DE TABLAS	. viii
ÍNDICE DE ECUACIONES	ix
RESUMEN	X
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: GENERACIÓN DE GASÓGENO	3
1.1. Historia	3
1.2. Gasificación	3
1.2.1. La gasificación de materias sólidas ocurre en cuatro etapas	4
1.3. Tipos de generadores de gasógeno	5
1.3.1. Gasificador de corriente ascendente o tiro directo	6
1.3.2. Gasificador de lecho descendente o fijo en contracorriente (Updraft)	7
1.3.3. Gasificador de lecho descendente o fijo en equicorriente (Downdraft).	8
1.3.4. Gasificador de lecho fluidizado.	9
1.3.5. Gasificador rotatorio.	10
1.4. Gasógeno de madera	11
1.4.1. Selección de un gasificador para madera	11
1.4.2. Características de diferentes tipos de madera.	12
1.4.3. Propiedades más importantes de la madera.	14
1.4.4. Contenido energético de la madera	15
1.4.5. Contenido de humedad en la madera.	16
1.4.6. Contenido de cenizas.	17
1.4.7. Reactividad del combustible.	17
1.4.8. Densidad de la madera.	18

1.5. Gasógeno apto para motores Otto	18
1.5.1. Funcionamiento del motor Otto con gasógeno.	19
1.5.2. Eliminación de partículas sólidas.	19
1.5.3. Eliminación de alquitranes	19
1.5.4. Secado del gasógeno.	20
1.5.5. Enfriamiento del gasógeno.	20
CAPÍTULO II: SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE GASÓGENO	21
2.1. Componentes para un sistema de alimentación de gasógeno	21
2.1.1. Filtros para gasógeno.	21
2.1.2. Enfriador o intercooler para gasógeno.	25
2.1.3. Ventilador de puesta en marcha del gasificador	25
2.1.4. Antorcha de pre-encendido.	26
2.1.5. Mezclador aire gasógeno.	27
2.2. Manejo del gasógeno	28
2.2.1. Componentes tóxicos nocivos.	28
2.2.2. Susceptibilidad del gasógeno a explosionar.	29
2.2.3. Precauciones con la inflamación y explosión del gasógeno	29
2.2.4. Contaminación ambiental producto de la gasificación	30
2.3. Propuesta de un sistema de gasógeno para un motor Otto estacionario	30
2.3.1. Descripción del funcionamiento del sistema de gasógeno	31
CAPÍTULO III: EFICIENCIA DEL MOTOR OTTO CON GASÓGENO	33
3.1. Eficiencia del motor	33
3.2. Modificaciones necesarias en el motor Otto para mejorar su rendimiento	o con
gasógenogasógeno	
3.2.1. Aumentar la relación de compresión.	
3.2.2. Mejora en el sistema de encendido.	
3.2.3. Adelanto al encendido.	35
3.2.4. Colocar aceite propio para motores con combustible gaseoso	35
3.3. Eficiencia teórica del motor funcionando a gasógeno	36

3.4. Potencia del motor cuando se utiliza gasógeno
3.4.1. Valor calorífico de una mezcla estequiométrica de aire gasógeno 37
3.4.2. Cantidad de mezcla suministrada al cilindro
3.4.3. Pérdida de eficiencia del motor Otto funcionando con gasógeno respecto a la gasolina.
3.5. Potencia mecánica máxima de un motor Otto funcionando a gasógeno 39
3.5.1. Cálculo de la potencia mecánica máxima de un motor Nissan A 12 funcionando a gasógeno
3.6. Mantenimiento del sistema de gasógeno para un óptimo rendimiento del motorOtto estacionario.
3.7. Ventajas y desventajas de utilizar gasógeno en un motor Otto estacionario 45
3.7.1. Ventajas
3.7.2. Desventajas
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES46
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFÍA49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Gasificador de corriente ascendente o tiro directo
Figura 1.2 Gasificador de lecho descendente o fijo en contra corriente
Figura 1.3 Gasificador de lecho descendente o fijo en equicorriente (Downdraft) 8
Figura 1.4 Gasificador de lecho fluidizado
Figura 1.5 Gasificador rotatorio
Figura 1.6 Diferencia de gasificadores
Figura 1.7 Residuos de madera
Figura 2.1 Esquema de un filtro ciclón
Figura 2.2 Imagen de dos capas de un filtro cerámico vistas a través de un microscopio
electrónico, escala 1:10.000
Figura 2.3 Lavador de Gas Tipo Venturi Variable
Figura 2.4 Intercooler
Figura 2.5 Ventilador
Figura 2.6 Antorcha
Figura 2.7 Mezclador aire gasógeno
Figura 2.8 Sistema de gasógeno para motor Otto

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Análisis de los diferentes tipos de material orgánico	5
Tabla 1.2 Reacciones en la gasificación	5
Tabla 1.3 Cuadro de comparación de gasificadores	12
Tabla 1.4 Valor calorífico neto de la leña	15
Tabla 1.5 Porcentaje energético de la madera sin humedad	16
Tabla 1.6 Densidad de algunas sustancias	18
Tabla 3.1 Características de la bobina ACCELSUPER COIL 140001	34
Tabla 3.2 Características del motor Nissan A 12	41
Tabla 3.3 Intervalos de servicio y mantenimiento	44

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1 Eficiencia teórica del gasógeno3	6
Ecuación 3.2 Pérdida de eficiencia del motor Otto funcionando con gasógeno respect	to
a la gasolina3	8
Ecuación 3.3 Cilindrada	9
Ecuación 3.4 Entrada máxima de aire gasógeno3	9
Ecuación 3.5 Máxima entrada de gasógeno3	9
Ecuación 3.6 Entrada real de gasógeno4	0
Ecuación 3.7. Potencia térmica del gasógeno4	0
Ecuación 3.8 Potencia mecánica máxima del motor Otto funcionando con gasógen	Ю
4	0

RESUMEN

El estudio contempla la posibilidad de gasificar madera para la obtención de gasógeno y su alimentación a un motor Otto.

Analizando la madera y su contenido, se observa moléculas de carbón, hidrógeno y oxígeno, que al ser combustionados parcialmente producen monóxido de carbono, Hidrógeno y metano, estos gases combustionables que luego de un proceso de acondicionamiento se pueden introducir al sistema de alimentación del motor Otto.

Previo modificaciones al sistema de alimentación y encendido del motor Otto, este puede funcionar sin inconvenientes a gasógeno, no obstante se ve perjudicada su potencia en aproximadamente un 30%.

Palabras Claves: gasificación, motor, gasógeno, madera, pirólisis.

Juan Rodrigo Calderón Machuca

Director del Trabajo de Titulacion

Mateo Fernando Coello Salcedo

Director de Escuela

Paúl Andrés Zhicay Cardenaz

Autor

ABSTRACT

The study contemplated the possibility of gasifying wood to obtain gasogen and feed an Otto engine. After analyzing the wood and its content, carbon, hydrogen and oxygen molecules were observed. These molecules, when partially combusted, produced carbon monoxide, hydrogen and methane. After a conditioning process it was possible to introduce these combustionable gases into the Otto engine feeding system. This engine was able to work without problems using gasogen with previous modifications to the power and ignition system. However, its power was impaired by approximately 30%.

Keywords: Gasification, engine, gasogen, wood, pyrolysis.

Juan Rodrigo Calderón Machuca

Thesis Director

Mateo Fernando Coello Salcedo

Faculty Director

Paúl Andrés Zhicay Cardenaz

Author

Translated by

Ing. Paul Arpi

Paúl Andrés Zhicay Cardenaz Trabajo de Graduación Dr. Juan Rodrigo Calderón Machuca Marzo, 2018

ESTUDIO DEL GASÓGENO COMO COMBUSTIBLE PARA UN MOTOR OTTO ESTACIONARIO

INTRODUCCIÓN

Los gasificadores para transformar madera y obtener un combustible gaseoso que se pueda emplear en motores de combustión interna se vienen desarrollando y utilizando desde hace más de un siglo, el máximo empleo que han obtenido los gasificadores fue en la segunda guerra mundial, cuando se utilizaron alrededor de un millón.

En la actualidad existe un creciente interés en el potencial de la madera como fuente de energía renovable, para a través de la gasificación obtener el combustible para generadores eléctricos y motores estacionarios que se utilizan en el sector agrícola, en donde se puede conseguir con mucha facilidad residuos de madera para el funcionamiento del gasificador. Sin embargo, no se recomienda el empleo de gasificadores en vehículos o maquinarias ya que el montaje en una unidad móvil conlleva la implementación de otros componentes que son necesarios para el acondicionamiento del gasógeno antes de ser introducido en el motor, además que disminuye el espacio disponible al asignar un lugar para los componentes y almacenamiento de la madera.

En el proceso de la gasificación, la madera es transformada en productos que se encuentran en los diferentes estados, sólidos, líquidos y gaseosos mediante su oxidación parcial a alta temperatura en un gasificador. El principal objetivo es la obtención de gasógeno que pueda ser empleado como combustible para un motor Otto. El gasógeno está compuesto básicamente por monóxido de carbono, hidrógeno y metano que son gases combustibles, y se emplea para el funcionamiento de motores de combustión interna.

El gasógeno previo a ser introducido en el motor debe ser filtrado y estar libre de polvos, volátiles y alquitranes para evitar inconvenientes en el funcionamiento del motor, además se enfría el gasógeno para evitar pérdidas considerables de potencia a causa de la baja densidad de un gas a mayor temperatura. Una vez acondicionado el gasógeno se introduce al motor por un mezclador aire-gasógeno que se monta en el sistema de alimentación y es el encargado de dosificar mezcla estequiométrica para obtener la mayor potencia del motor con este combustible.

El motor Otto al funcionar con gasógeno presentará una pérdida de eficiencia alrededor del 30% en comparación a su funcionamiento con gasolina, para disminuir este porcentaje se puede intervenir en la relación de compresión, mejorar el sistema de encendido, adelantar el encendido y colocar aceite apropiado para motores de combustible gaseoso. Si se realizan estas modificaciones la pérdida de eficiencia puede llegar a ser mitigada casi en su totalidad.

CAPÍTULO I: GENERACIÓN DE GASÓGENO

1.1. Historia

A finales del siglo XIX (1890) se construyeron en Inglaterra y Alemania los primeros motores de gasógeno, y hasta la primera guerra mundial el desarrollo de estos fue creciente, pero después de la guerra, la atención se centró en el desarrollo de los motores con combustibles líquidos, a pesar de esto en zonas rurales de Inglaterra y Alemania se continuo con su uso y desarrollo. En 1928 Europa retomó el gasógeno a base de madera y se construyeron más de un millón de motores a base de este combustible, para el funcionamiento de automóviles, camiones, vehículos militares, embarcaciones y trenes.

A partir de los años 70 nuevamente se retoma el interés por el gasógeno, a causa del aumento de los precios del petróleo, por este motivo en la actualidad se sigue desarrollando esta tecnología con el fin de tener una alternativa energética y no ser totalmente dependientes de los combustibles líquidos (P. García y J. Otero, 2000).

1.2. Gasificación

La gasificación se realiza mediante un proceso de transformación termoquímica a altas temperaturas, el objetivo es que la materia prima (madera) se convierta en un gas con valor calorífico. De acuerdo a estudios de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura "FAO", al gasificar la madera con el aire se obtiene un gas (gasógeno) que contiene aproximadamente 40% de gases combustibles, principalmente monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂) y algo de metano (CH₄), el resto no es combustible y consiste sobre todo en dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (H₂O). (FAO 1, 1993)

1.2.1. La gasificación de materias sólidas ocurre en cuatro etapas.

A continuación se presentan las cuatro etapas de gasificación de sólidos según Feders y colaboradores (2008):

Secado: Se origina cuando se introduce en la cámara del gasificador la madera, para secarla mediante la evaporación de la humedad, esto se logra aprovechando el calor proveniente de las otras etapas del gasificador.

Pirólisis: Es cuando ocurre la descomposición térmica (exotérmica) de la madera en ausencia de oxígeno, ocurre entre los 160 °C y los 420 °C produciendo un residuo sólido carbonoso. (multitekingenieros.com/gasificación)

En este proceso las partículas no convertidas en gas por insuficiencia de oxígeno aparecen como alquitranes, los cuales son contaminantes al gasógeno, por lo que se debe tener muy en cuenta el funcionamiento del gasificador para que se produzca la menor cantidad posible de alquitranes.

Oxidación: Es la combustión parcial de la materia sólida (el oxígeno reacciona con el carbono), en este proceso se genera la energía suficiente para el resto de las etapas. (multitekingenieros.com/gasificación)

La reducción: Es la gasificación del sólido carbonoso generado, todo esto sucede en ausencia de oxígeno.

A continuación se indica en la tabla 1.1 el análisis de dos tipos de materiales orgánicos con los respectivos porcentajes de carbono ©, oxígeno (O), hidrógeno (H) y nitrógeno (N).

Tabla 1.1 Análisis de los diferentes tipos de material orgánico

MATERIAES	С	0	Н	N
Biomasa	50 - 60	30-40	5 – 7	Trazas
Madera	50	43	6	0.1

Fuente: González A, 2004

Las principales reacciones que ocurren en el proceso de secado, pirolisis, oxidación y la reducción (gasificación) se indican a continuación en la tabla 1.2:

Tabla 1.2 Reacciones en la gasificación

C+H ₂ O	¬	CO+H ₂
CO+H ₂ O	1	CO ₂ +H ₂
C+2H ₂		CH ₄
CH ₄ +H ₂ O	1	CO+3H ₂

Fuente: H. Vogel y S. Kedrers, 1998

1.3. Tipos de generadores de gasógeno

Existen diferentes tipos de gasificadores, dependiendo de la aplicación y tipo de materia prima que se vaya a emplear en su funcionamiento, a continuación se describe los principales y más utilizados.

1.3.1. Gasificador de corriente ascendente o tiro directo.

Es el gasificador más antiguo y sencillo, la toma de aire se encuentra en el fondo y los gases salen por arriba como se observa en la figura 1.1. En la parte alta del gasificador tiene lugar el calentamiento y pirólisis de la madera, originado por la transferencia de calor a través de convección forzada y radiación de las zonas inferiores. Los alquitranes producidos en este proceso son transportados por la corriente de gasógeno, el mismo que tiene un alto nivel de contaminación (FAO 2, 1993).

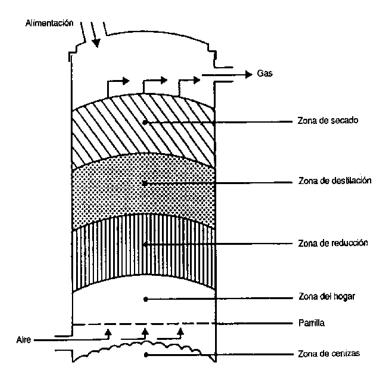


Figura 1.1 Gasificador de corriente ascendente o tiro directo Fuente:www.fao.org/docrep/T0512S/t0512s03.htm; Marzo 2012

1.3.2. Gasificador de lecho descendente o fijo en contracorriente (Updraft).

En este gasificador la madera se introduce por la parte superior y desciende lentamente en sentido contrario a la corriente del gasógeno generado por la introducción de aire por el fondo del gasificador como se ilustra en la figura 1.2. Según desciende la madera y por la corriente ascendente del gasógeno hasta llegar a la zona de combustión donde alcanza su máxima temperatura que es aproximadamente 1000 °C, por consiguiente su oxidación (repositorio.espe.edu.ec). El gasógeno resultante sale con una temperatura de alrededor de 250 °C, alto contenido de alquitranes y cantidad de partículas moderado (Handbook de química, 2008).

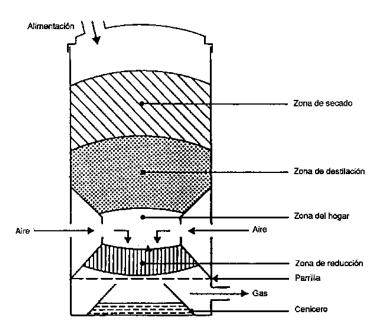


Figura 1.2 Gasificador de lecho descendente o fijo en contra corriente Fuente: http://www.monografias.com/trabajos66/residuos-solidos-toronja/residuos-solidos-toronja2.shtml; Enero 2014

1.3.3. Gasificador de lecho descendente o fijo en equicorriente (Downdraft).

En este gasificador la madera entra por la parte superior como se ilustra en la figura 1.3, luego al descender experimenta sucesivamente los procesos de secado y pirolisis debido a que es sometida a un aumento progresivo de la temperatura que bordea los 900 °C. El aumento progresivo de la temperatura durante el proceso, se debe a la conducción del calor que tiene lugar desde la parte inferior, donde se está generando calor mediante combustión parcial de los productos que llegan hasta allí (tecnoredconsultores.com.ar/gasi.html). El gasógeno generado por este gasificador, tiene una composición aproximada de 20% H2, 20% CO, 4% CH4 y un porcentaje bajo de CO2 y N2. Este gasificador entrega un gasógeno con una temperatura aproximada de 800°C, bajo contenido de alquitranes y cantidad de partículas moderada lo que le hace ideal para alimentar a motores Otto (Toscano L, 2009).

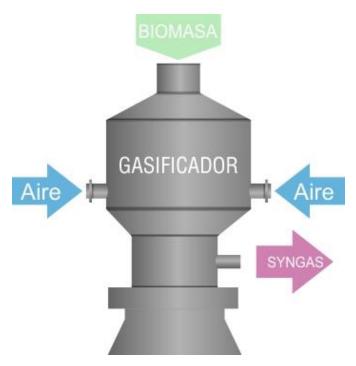


Figura 1.3 Gasificador de lecho descendente o fijo en equicorriente (Downdraft) Fuente: http://www.tecnoredconsultores.com.ar/gasi_tecno.html; Enero 2014

1.3.4. Gasificador de lecho fluidizado.

Como se observa en la figura 1.4 en el interior del gasificador se expande el aire a través de un lecho de partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión. Externamente el lecho se calienta, y se introduce tan pronto como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Luego las partículas del combustible se introducen por el fondo del gasificador, estas se mezclan muy rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente alcanzando la temperatura del lecho y posterior a esto se gasifican (FAO 3, 1993).

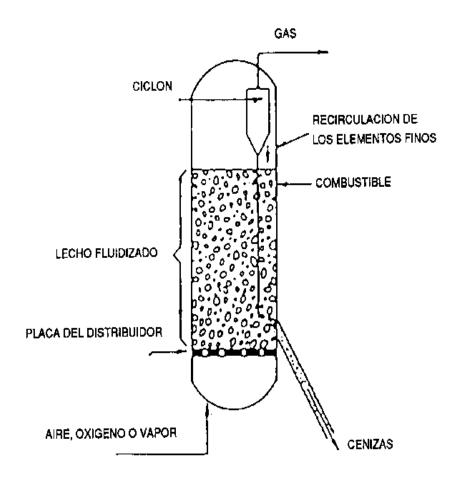


Figura 1.4 Gasificador de lecho fluidizado Fuente: www.fao.org/docrep/T0512S/t0512s03.htm; Marzo 2012

1.3.5. Gasificador rotatorio.

La madera en este gasificador es alimentada por el extremo superior del gasificador, mientras el aire se introduce en el extremo contrario por la parte inferior, de tal manera que reacciona en contracorriente a una temperatura de alrededor de 800 °C, este tipo de gasificador se puede observar en la figura 1.5. Las cenizas se descargan por el extremo contrario al de carga de la madera (upcommons.upc.edu/pdf/bitstream/2009). El gasógeno resultante sale con una temperatura de alrededor de 700 °C, alto contenido de alquitranes y gran cantidad de partículas (R. Vals y H. Vogel, 2001).

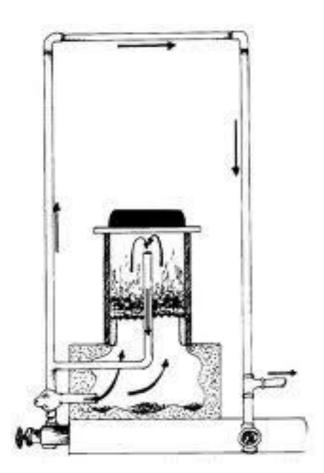


Figura 1.5 Gasificador rotatorio Fuente: upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3157/1/54671-1.pdf; Marzo 2012

1.4. Gasógeno de madera

1.4.1. Selección de un gasificador para madera.

Existen diferentes diseños de gasificadores, los más importantes ya se describieron anteriormente, y se puede observar la información más relevante en la figura 1.6 y tabla 1.3. Estos sistemas presentan ventajas e inconvenientes dependiendo su aplicación, esto significa que cada uno tiene sus propias ventajas técnicas o económicas según la aplicación de trabajo.

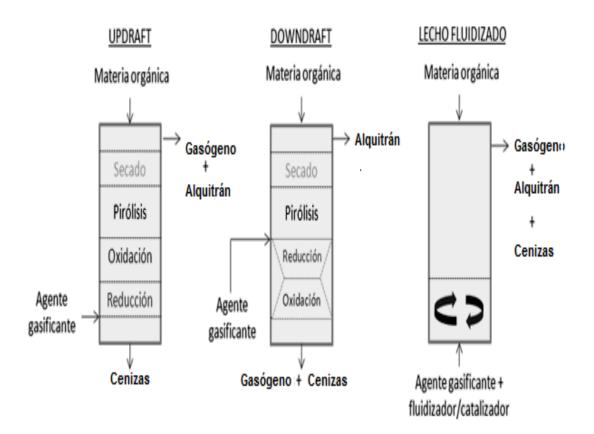


Figura 1.6 Diferencia de gasificadores

 $Fuente: www.madrimasd.org/blogs/renovables_medioambiente; Febrero~2012$

Tabla 1.3 Cuadro de comparación de gasificadores

	Lecho	Lecho	
	Updraft	Updraft Downdraft	
Madera con alto			
contenido en humedad	Si	Hasta 20%	No
(25-50%)			
Tamaño del combustible	Poco crítico	Poco crítico	No critic
uniforme			T (O CITELE
Contenido			
en alquitranes	Alto	Bajo	Moderado
del gas			
Productos comerciales de			
generación de	Medianamente	Adecuado	No adecuado
electricidad de pequeña	adecuado		
escala (menor a 100KW)			

Fuente: www.repositorio.espe.edu.ec/bitstream; Marzo 2012

Por las características del gasógeno (bajo contenido de alquitranes) que genera el gasificador de lecho descendente o fijo en equicorriente (Downdraft) es el apropiado para trabajar con madera y ser instalado en un motor Otto, ya que el gasógeno que se obtiene luego de un proceso de filtrado ya puede ser empleado para la alimentación y funcionamiento del motor Otto (R. Vals y H. Vogel, 2001).

1.4.2. Características de diferentes tipos de madera.

Existen diferentes tipos de madera, cada una con sus características particulares(Bridgewater A, 2009):

- **Abedul**: Es muy útil cuando está seca, genera una gran cantidad de calor.
- Arce: Su combustión es larga y genera gran cantidad de calor.
- Cedro: Arde de una forma ruidosa y genera una apreciable cantidad de calor.

- Cerezo: Es una madera densa y su combustión es lenta.
- **Fresno:** Es fácil de cortarla, su combustión es de larga duración, genera poco humo tiene alto valor calorífico.
- Haya: Su duración de combustión es media, genera poco humo y produce una gran cantidad de calor.
- **Nogal:** Es fácil de partir, de larga duración de combustión y genera una gran cantidad de calor.
- **Roble:** Es fácil de partir, de larga duración de combustión y genera una gran cantidad de calor.
- **Eucalipto:** Como leña o carbón no se consume rápido, al arder deja poca ceniza y se carboniza fácilmente produciendo un carbón de buena calidad.



Figura 1.7 Residuos de madera

Fuente: Autor, 2012

1.4.3. Propiedades más importantes de la madera.

- Contenido energético.
- Contenido de humedad.
- Contenido de cenizas.
- Reactividad.
- Densidad de la madera.

Las características químicas y físicas de la madera determinan la calidad del gasógeno que se genere. Para realizar la gasificación de madera se debe analizar el valor calorífico y su contenido de humedad para obtener el contenido energético.

El valor calorífico indica la cantidad de energía que se libera en forma de calor cuando la madera se quema completamente. Para madera completamente seca, la cantidad de energía es más o menos igual para todas las especies, con un promedio de valor calorífico bruto de entre 4.205 y 4.876 Kcal/kg de acuerdo a un estudio de la (FAO 4, 1981), estos valores son para la leña de madera. Más detalladamente se indica en la Tabla 1.4.

Al relacionar humedad con poder calorífico en la madera, existe un factor que influye negativamente, ya que la energía que se genera por medio de la combustión en el momento que se quema la madera, se ve perjudicado al tener que evaporar el agua antes de que el calor esté disponible (cliber.generadordeprecios.info); por eso cuanto más alto es el contenido de humedad menos es el poder calorífico. A continuación se indica la tabla 1.4 en la que se observa que la madera verde (aun contiene humedad) posee un valor calorífico inferior al de la madera seca.

Tabla 1.4 Valor calorífico neto de la leña

Valor c	alorífico	neto de	e la leña		
	Valor calorífico Peso específico de la madera seca				
	Seca	Verde			
		•••	kcal/kgkg/dm³		
Pino (Pinus)	4658	3870	0.49		
Pino Weymouth (Pinusstrohus)	4876	4055	0.37		
Abedul	4658	3869	0.61		
Pitea	4622	3589	0.43		
Alerce	4597	3818	0.55		
Abeto	4559	3785	0.41		
Acacia	4527	3760	0.73		
Haya	4478	3705	0.69		
Tilo	4474	3713	0.49		
Olmo	4419	3810	0.64		
Roble	4329	3742	0.65		
Fresno	4329	3593	0.68		
Aliso	4288	3555	0.49		
Sicomoro	4245	3485	0.59		
Álamo	4205	3518	0.41		

Fuente: www.fao.org/docrep/p2070s/p2070s06.htm; Marzo 2012

1.4.4. Contenido energético de la madera.

Los elementos químicos más importantes son carbono ©, hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) y, en algunos casos, cloro (Cl); además, contiene oxígeno (O). En la tabla 1.5 se muestra la composición para varios tipos de madera. Es importante conocer que la madera que tenga un alto contenido de azufre (S) o cloro (Cl) no son aptos para la gasificación porque en combinación con el agua causan corrosión (www.unioncalor.com/consejos-ahorro).

Tabla 1.5 Porcentaje energético de la madera sin humedad

Tipo de biomasa	Porcentaje del peso (sin humedad)						
Madera	С	Н	N	0	S	CI	Ceniza
Sauce	47,66	5,2	0,3	44,70	0,03	0,01	1,45
Madera suave	52,10	6,10	0,20	39,90	-		1,70
Corteza de madera dura	50,35	5,83	0,11	39,62	0,07	0,03	3,99
Madera dura	50,48	6,04	0,17	42,43	0,08	0,02	0,78
Eucalipto	50,43	6,01	0,17	41,53	0,08	0,02	1,76
Roble	49,89	5,98	0,21	42,57	0,05	0,01	1,29
Corteza de pino	52,30	5,80	0,29	38,76	0,03	0,01	2,90
Asserin pino	52,49	6,24	0,15	40,45	0,03	0,04	0,60
Sub-productos agrícolas							
Brizna de trigo	39,07	4,77	0,58	50,17	0,08	0,37	4,96
Caña de azúcar	44,80	5,35	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Bagazo de caña	46,95	5,47	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Paja de arroz	39,65	4,88	0,92	35,77	0,12	0,50	18,16
Cascarrila de arroz	38,68	5,14	0,41	37,45	0,05	0,12	18,15
Paja de maíz	46,91	5,47	0,56	42,78	0,04	0,25	3,99
Olote de maiz	47,79	5,64	0,44	44,71	0,01	0,21	1,2
Fibra de coco	50,29	5,05	0,45	39,63	39,63	0,28	4,14
Carbón mineral	71,70	4,70	1,3	8,30	0,64	0,060	20,70

Fuente: www.fao.org/docrep/p2070s/p2070s06.htm; Marzo 2012

1.4.5. Contenido de humedad en la madera.

El contenido de humedad influye directamente en el valor calorífico del gasógeno producido por el gasificador, en la actualidad existen detectores de humedad de madera los cuales indican con precisión la cantidad de humedad, y en base a esto permite mejorar el lugar de almacenamiento para obtener el mayor valor calorífico de cada una de las maderas empleadas.

El lograr controlar la humedad de la madera en un promedio de 20% es de suma importancia para obtener un óptimo comportamiento de la misma en su aplicación. Si la madera se seca en exceso es también perjudicial ya que disminuye sus propiedades de resistencia mecánica (Humedad en la madera; 2010).

Si la humedad es mayor al 20% se produce más de un inconveniente en cuanto a efectos originados a causa de la humedad. La pérdida de resistencia mecánica y además la colonización de hongos o insectos que degradan la materia. Un alto porcentaje de humedad reduce el valor calorífico del gasógeno (Humedad en la madera; 2010).

1.4.6. Contenido de cenizas.

La formación de escoria en el gasificador, es ocasionada por la fusión y aglomeración de cenizas, la acumulación de escoria ocasiona la formación excesiva de alquitrán y por consiguiente el bloqueo del gasificador (La biomasa forestal como fuente de energía). El que se forme escoria, depende del contenido de cenizas del combustible, de las características de fusión de las cenizas y de la estabilidad térmica en el interior del gasificador. La madera tiene un contenido de cenizas bajo, generalmente menor al 1% (FAO 5, 1993).

1.4.7. Reactividad del combustible.

La característica de esta reacción es la formación de una llama, que es la masa gaseosa incandescente que emite luz y calor. La reacción de la madera con el oxígeno origina sustancias gaseosas entre las cuales las más comunes son CO₂ y H₂O (como vapor de agua) de forma que son humos o gases de combustión.

La reactividad es un factor importante que determina el coeficiente de reducción del dióxido de carbono en monóxido de carbono dentro de un gasificador (FAO 5, 1993). La reactividad depende del tipo de combustible. Existen algunos catalizadores como el potasio, sodio y zinc que pueden aumentar considerablemente la reactividad del combustible.

1.4.8. Densidad de la madera.

La densidad se define como el peso por unidad de volumen de madera apilada, en la tabla 1.6 se puede observar los valores de densidad de diferentes sustancias. Los combustibles de alta densidad necesitan menos espacio de depósito para un contenido energético determinado, la densidad se mide en kg/m³ (FAO 5, 1993).

Tabla 1.6 Densidad de algunas sustancias

Sustancia	Densidad	Significado
Aire	1,3 kg/m ³	1 m ³ de aire tiene una cantidad de materia de 1,3 kg de aire
Madera	900 kg/m ³	1 cm ³ de madera tiene una cantidad de materia de 0,9 g de madera (si colocamos un taco de madera de 1 cm ³ en una balanza, ésta marcaría 0,9 g)
Aceite	900 kg/m ³	1 litro de aceite tiene una cantidad de materia de 0,9 kg. (si colocamos 1 litro de aceite en una balanza, ésta marcaría 0,9 kg)
Agua	1000 kg/m ³	1 m ³ de agua tiene una cantidad de materia de 1000 kg de agua (si colocamos 1 m ³ de agua en una balanza, ésta marcaría 1000 kg)
Plomo	11 333 kg/m ³	1 m ³ de plomo tiene una cantidad de materia de 11 333 kg de plomo

Fuente:www.educastur.princast.es/proyectos/formadultos/materiayenergia/uuno_captres_pauno.htm; Marzo 2012

Si los pedazos de madera son pequeños se puede aprovechar mejor su contenido energético, pero en los gasificadores se debe introducir trozos de madera de acuerdo a su volumen diseñado (FAO 2, 1993).

1.5. Gasógeno apto para motores Otto

El gasógeno obtenido en el proceso de gasificación al tener vapor de agua, alta temperatura, cenizas y alquitranes en suspensión, es necesario de que se realice un acondicionamiento del mismo antes de ser utilizado en el motor Otto, para de esta manera obtener la mayor eficiencia del motor y evitar que se originen averías en su funcionamiento (FAO 2, 1993).

1.5.1. Funcionamiento del motor Otto con gasógeno.

Para el funcionamiento del motor Otto, es necesario crear una mezcla aire gasógeno que en el interior de la cámara de combustión al comprimirse y saltar la chispa en la bujía explosione y produzca trabajo mecánico.

El gasógeno puede remplazar el 100% del combustible convencional (en el motor Otto) esto se debe al poder calorífico de la mezcla aire/gasógeno. Pero para que el gasógeno reemplace a la gasolina en su totalidad la relación aire/gasógeno debe ser aproximadamente 1.33:1, ya que el poder calorífico de la mezcla aire/gasógeno es menor que el de la mezcla aire/gasolina. (La biomasa forestal como fuente de energía)

1.5.2. Eliminación de partículas sólidas.

Las partículas sólidas o cenizas que se hayan arrastrado con el gasógeno deben ser retiradas inmediatamente después del gasificador para proteger el resto de los elementos de la abrasión y la corrosión (upcommons.upc.edu/pfcbibstream/2099). Esto se consigue mediante el paso del gasógeno por un filtro que garantice la eliminación de todas las partículas sólidas que se encuentran suspendidas en la corriente de gasógeno (FAO 2, 1993).

1.5.3. Eliminación de alquitranes.

Los alquitranes que se forman en la gasificación y son arrastrados por la corriente de gasógeno también deben ser eliminados. La concentración de alquitranes en el gasógeno depende del gasificador utilizado y de la temperatura de gasificación, a menor temperatura se originan mayor cantidad de alquitranes. La formación de estos compuestos es perjudicial debido a que representan carbonos no aprovechados para generar gasógeno, además acarrean problemas de mantenimiento. Para separarlos del gasógeno es necesario implementar un dispositivo filtrante (FAO 2, 1993).

1.5.4. Secado del gasógeno.

El gasógeno obtenido del gasificador se encuentra a una alta temperatura y contaminado con vapor de agua que se produce en las fases de gasificación, para garantizar que el gasógeno tenga el mayor valor calorífico para el funcionamiento del motor Otto, se debe incorporar un sistema de secado. El sistema de secado consiste en disminuir la temperatura del gasógeno, para que de esta forma se separe el condensado de agua que viaja en el gasógeno (Thomasset C, 2004).

1.5.5. Enfriamiento del gasógeno.

Si el gasificador trabaja aproximadamente a 900°C la corriente de gasógeno teóricamente está a la misma temperatura, lo que hace que disminuya su eficiencia energética, ya que a mayor temperatura el gasógeno se dilata y ocupa mayor volumen para una misma cantidad energética. Para evitar esta pérdida se debe colocar un intercambiador de calor en el que parte del calor del gasógeno se transmita a la corriente de aire que ingresa al gasificador. De esta manera se disminuye el choque térmico al alimentar aire pre calentado en el gasificador, al mismo tiempo el gasógeno es enfriado y mejora su eficiencia energética (Diseño básico de gasificación; 2012).

CAPÍTULO II: SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE GASÓGENO

2.1. Componentes para un sistema de alimentación de gasógeno

Previamente se ha realizado la selección del gasificador de lecho descendente o fijo en equicorriente (Downdraft) en base al gasógeno (bajo contenido de alquitranes) que genera el gasificador, pero para poder poner en marcha el motor Otto con un sistema gasificador es necesario que se tenga en cuenta lo siguiente:

- Filtrado del gasógeno.
- Enfriamiento del gasógeno de alimentación.
- Antorcha de pre-encendido.
- Ventilador de puesta en marcha del gasificador.
- Mezclador de aire gasógeno.

2.1.1. Filtros para gasógeno.

Los filtros para purificar el gasógeno es indispensable en el sistema de alimentación debido a todos los polvos, volátiles y alquitranes que son arrastrados en la corriente de gasógeno, si estos no son eliminados crean inconvenientes en el funcionamiento del motor Otto, para esto existen los siguientes tipos de filtros:

- Filtro por ciclón.
- Filtro cerámico.
- Filtro lavador de gases venturi.

2.1.1.1. Filtro por ciclón.

El filtro ciclón se utiliza para la depuración de gases y reducir la cantidad de polvo que fluye por el sistema; en sistemas de gasógeno tiene un buen desempeño. La operación en un filtro ciclón es muy simple: el gasógeno que contiene las partículas contaminantes entra al cuerpo cilíndrico del ciclón por la admisión rectangular dispuesta en forma tangencial, de modo que el gasógeno entrante fluya alrededor de la circunferencia del cuerpo cilíndrico. El gasógeno se mueve en espiral alrededor de la parte exterior del cuerpo cilíndrico con una componente hacia abajo; enseguida, se vuelve y se mueve en espiral hacia arriba y sale por la parte superior. A través de la rápida rotación en espiral del flujo de aire, se separan las partículas de la corriente de gasógeno (las partículas son desplazadas por acción de la fuerza centrífuga hacia las paredes del ciclón), lo que permite que las partículas más pesadas se desprendan del flujo de gasógeno siendo impulsadas hacia la pared donde se juntan entre sí y forman aglomerados que se sedimentan (se deslizan hacia abajo por acción de la gravedad) y recogidas salida en la tolva (punto de inferior del ciclón). son (catmosferical.wikispaces.com/Estrategias+para+el+control)

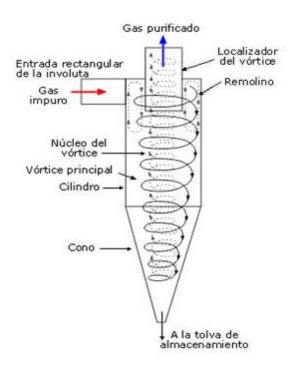


Figura 2.1 Esquema de un filtro ciclón Fuente: http://catmosferica1.wikispaces.com/Estrategias+para+el+control; Marzo 2012

2.1.1.2. Filtro cerámico.

El filtro cerámico, es resistente a la acción de los gases ácidos. El material filtrante es carburo de silicio y alúmina-mullita. Está construido por capas, disminuyéndose el tamaño de los poros del material progresivamente, en la figura 2.2 se ilustra su contextura. Así las partículas de mayor tamaño quedan en la parte exterior y las más finas son retenidas en el interior del filtro. (Emisiones a la atmósfera y correcciones, 2002)

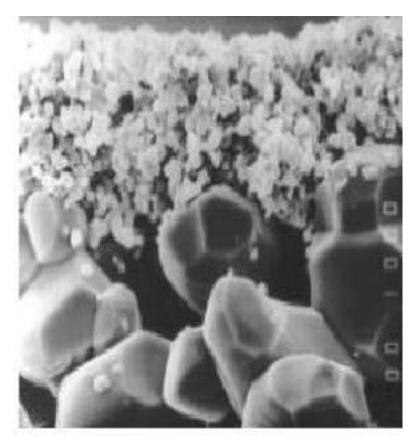


Figura 2.2 Imagen de dos capas de un filtro cerámico vistas a través de un microscopio electrónico, escala 1:10.000

Fuente: Swagelock.com; Febrero 2012

2.1.1.3. Filtro lavador de gases Venturi.

El gasógeno que entra en el lavador es dirigido hacia un venturi inundado con líquido a través de un conducto seco mientras que el líquido es introducido en una cámara de distribución cubierta. El tubo de entrada ayuda a direccionar los gases a la garganta del venturi que se encuentra completamente inundada y el líquido actúa como una capa protectora que elimina el choque térmico y minimiza la abrasión debida a las partículas de polvo.

A medida que el líquido desciende por la garganta debido a su propio peso, la alta velocidad del gasógeno fragmenta el líquido creando una densa niebla de gotas muy finas. La niebla captura las partículas a través del impacto e intercepción. Los gases y la niebla generada entran en una cámara de separación donde el polvo adherido a las gotas de agua es separado del gasógeno y se escurre hasta la parte inferior del tanque. El gasógeno limpio sale del lavador por la parte superior, en la figura 2.3 se observa un ejemplo de este filtro. (Lavador de gases 24ikiped.pdf)

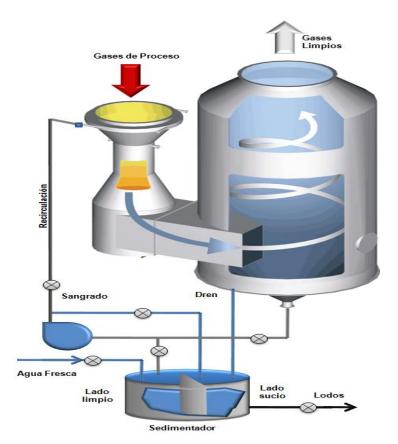


Figura 2.3 Lavador de Gas Tipo Venturi Variable Fuente: www.comercialaralco.com/LavadorDeGasesVenturi.pdf; Marzo 2012

2.1.2. Enfriador o intercooler para gasógeno.

El gasógeno debe refrigerarse porque al estar caliente tiene baja densidad, lo que implica menor cantidad de masa alimentada al motor Otto, esto implica que la potencia del motor disminuya, en la figura 2.4 se muestra un intercooler para gasógeno, el mismo que se encarga de disminuir la temperatura del gasógeno cediendo temperatura al aire frio que fluye a través del panel del enfriador hacia el gasificador. (diegoonate.es/pdf)



Figura 2.4 Intercooler

Fuente: http://es.made-in-china.com/tag_search_product/Intercooler_nhnui_41.html; Febrero 2012

2.1.3. Ventilador de puesta en marcha del gasificador.

Este ventilador es el encargado de crear la succión de aire en el interior del gasificador cuando se vaya a poner en marcha el sistema, esta depresión luego es creada por el funcionamiento del motor, el ventilador funciona por un tiempo aproximado de 3 minutos con la energía acumulada en la batería del sistema eléctrico del motor Otto, luego de transcurrido este tiempo se apaga y se enciende el motor Otto, en la figura

2.5 se observa un ventilador con dos entradas, la una para la toma que va conectado en el conducto de gasógeno y la otra para la salida del gasógeno propulsado por el ventilador.



Figura 2.5 Ventilador Fuente: www.almadeherrero.blogspot.com/2009/10/gasogeno-renault-para-tractores.html; Febrero 2012.

2.1.4. Antorcha de pre-encendido.

Cuando el gasificador se pone en marcha, los componentes del sistema de alimentación aun no trabajan eficientemente por lo que el gasógeno que se genera en estos momentos no cumple con las características necesarias para ser introducido en el motor Otto debido a esto, debe ser quemado en una antorcha que está dispuesta antes del ingreso al motor; en la figura 2.6 se ilustra una antorcha.

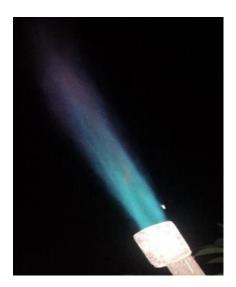


Figura 2.6 Antorcha Fuente: Autor, 2012

2.1.5. Mezclador aire gasógeno.

Es el encargado de mezclar el gasógeno proveniente del gasificador, con la cantidad adecuada de aire para asegurar una combustión completa (actualidadmotor.com). Esto se logra al unir el conducto de gasógeno y el de aire en una cámara donde se genera depresión por la aspiración de los pistones del motor Otto. La entrada de gasógeno se controla mediante una válvula de admisión, esta permite enriquecer o empobrecer la mezcla en función de las necesidades del motor. (FAO 6, 1993)

En la figura 2.7 se observa un mezclador accionado mecánicamente.

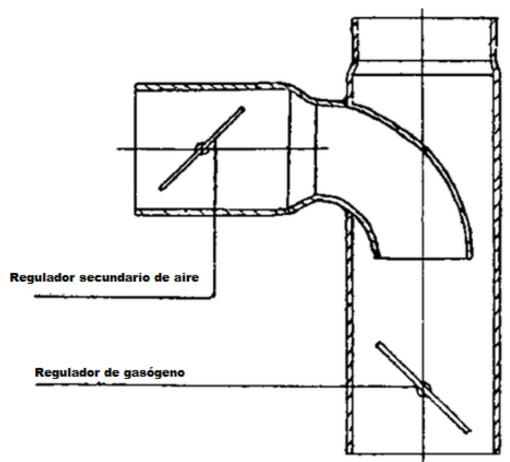


Figura 2.7 Mezclador aire gasógeno

 $Fuente: http://www.fao.org/docrep/T0512S/t0512s04.htm \#TopOfPage;\ Marzo\ 2012$

2.2. Manejo del gasógeno

Para manejar el sistema de gasógeno se debe tener en cuenta los diferentes riesgos que este implica, además los efectos ambientales que se pueden originar por un manejo irresponsable de los residuos generados durante el funcionamiento del sistema.

2.2.1. Componentes tóxicos nocivos.

En la composición del gasógeno se encuentra el monóxido de carbono (CO), gas extremadamente tóxico y peligroso debido a su tendencia a combinarse con la hemoglobina de la sangre, esto dificulta la absorción y distribución del oxígeno en la sangre, en altas concentraciones produce hasta la muerte (FAO 2, 1993).

Un factor a favor de este problema, es que el gasógeno es succionado por el motor, lo que ayuda a que no se fuguen gases peligrosos en caso de existir alguna pequeña grieta en la conducción. Pero existen inconvenientes durante el encendido y parada del sistema ya que en esos instantes no se crea depresión por parte del motor Otto (Implementación de la tecnología de la gasificación para operar en los beneficio de café, 2006).

En la puesta en marcha generalmente se tiene destapada la salida del gasógeno por un ducto en el que se encuentra instalada una antorcha para facilitar el encendido del motor, y para evitar cualquier inconveniente este trabajo se debe realizar en un lugar bien ventilado (Normas prácticas y de seguridad para soldadores, 2012).

En la parada del sistema se produce un aumento de presión en el gasificador, ocasionado por la madera todavía caliente y en fase de pirolisis. En este instante se liberan gases que contienen monóxido de carbono. Por el peligro de estos gases, se recomienda que el sistema gasificador se encuentre al aire libre y no dentro de una infraestructura cerrada (Normas prácticas y de seguridad para soldadores, 2012).

2.2.2. Susceptibilidad del gasógeno a explosionar.

Se pueden producir explosiones si el gasificador no se lo ubica en un lugar correcto, para tener una seguridad activa en su utilización es necesario tomar en cuenta las siguientes sugerencias que realiza el estudio de la FAO (FAO 2, 1993) en la parte de seguridad en el empleo de gasificadores:

- Si se produce una filtración de aire en la parte inferior del gasificador se produce una combustión parcial del gasógeno, esto eleva la temperatura de salida del gasógeno, y por tanto disminuye su poder calorífico. (FAO 2, 1993)
- El gasificador se debe alojar en un cobertizo al aire libre, de tal modo que no pueden producirse concentraciones de monóxido de carbono. (FAO 2, 1993)
- El suministro de gasógeno al motor se hace por succión, por si se producen fisuras en la conducción del sistema, no pueda salir el gasógeno a la atmosfera.
- Las cenizas y escorias se deben descargar en un recipiente con agua, de tal modo que no exista riesgos de incendios por su causa.
- El gasificador se sitúa a distancia suficiente del motor para evitar que se caliente el lugar de trabajo.
- Si existen filtraciones de gasógeno en un gasificador cuando esta frío, y este se enciende producirá una explosión. Para evitar estas explosiones se debe colocar en un lugar que fluya el aire y se ventile. (FAO 2, 1993)

2.2.3. Precauciones con la inflamación y explosión del gasógeno.

El gasógeno se puede inflamar debido a diferentes causas:

- Elevada temperatura en el exterior del gasificador.
- Por chispas durante la recarga de madera.
- Fuego en la entrada de aire del gasificador o en la tapa de recarga.

Para evitar inconvenientes se debe implementar las siguientes precauciones: (somosfuncionandomovimientoperpetuo.com)

- Colocar aislamientos en las partes más calientes del sistema.
- No se debe tener cerca al gasificador, partes incandescentes o artefactos que produzcan chispa.
- En la zona del gasificador debe existir rótulos en los que se indica que está prohibido fumar y manipular fuego.
- Se recomienda tener un extinguidor de fuego cerca del gasificador.

2.2.4. Contaminación ambiental producto de la gasificación.

En los gasificadores de madera, se produce cenizas y líquido condensado, principalmente agua contaminada con alquitrán, el cual actualmente es utilizado principalmente en la elaboración de diversos productos, como jabones, pinturas, plásticos, asfalto (para la pavimentación) y productos químicos (wikipedia.org; 2012).

En cuanto a las cenizas se pueden eliminar sin ningún riesgo ambiental, de igual forma la humedad se descarga directamente a la atmosfera por la chimenea del gasificador (FAO 2, 1993).

2.3. Propuesta de un sistema de gasógeno para un motor Otto estacionario

Luego de haber estudiado los diferentes componentes se realiza una propuesta de un sistema de alimentación de gasógeno para poner en funcionamiento un motor Otto estacionario, en la figura 2.8 se ilustra un esquema de un sistema de gasógeno para un motor Otto.

De acuerdo a estudios de la FAO (FAO 2, 1993) institución que ha montado sistemas de gasificación de madera para motores Otto, recomienda que el sistema debe tener los siguientes componentes:

- 1. Gasificador de lecho descendente o fijo en equicorriente (Downdraft).
- 2. Secador del gasógeno.
- 3. Filtro ciclón.

- 4. Filtro cerámico.
- 5. Enfriador del gasógeno.
- 6. Ventilador de puesta en marcha del sistema.
- 7. Mezclador de aire gasógeno.

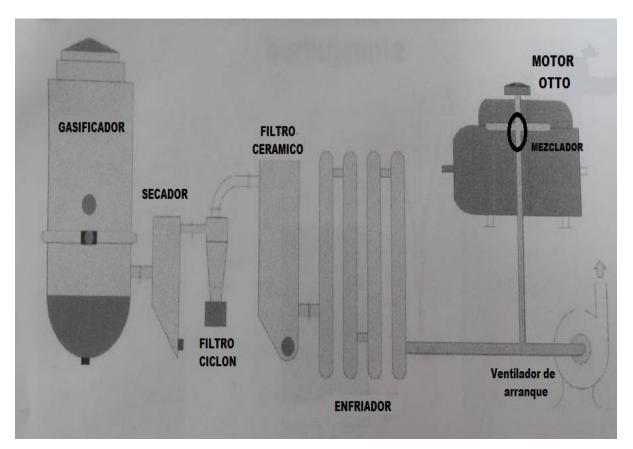


Figura 2.8 Sistema de gasógeno para motor Otto Fuente: http://www.mnactec.cat/factoria/interactius/funcionament%20dels%20motors_esp.swf; Marzo 2012

2.3.1. Descripción del funcionamiento del sistema de gasógeno.

La madera se coloca en el gasificador y se le da fuego mediante una antorcha, para aumentar la combustión se enciende el ventilador de arranque por un tiempo aproximado de 3 minutos, esto permite tener aire aspirado y ganar tiempo en quemar la madera, luego los gases que salen del gasificador son secados y filtrados, también deben ser enfriados porque si se ingresan en los cilindros a la temperatura que salen del gasificador el motor perdería gran parte de su rendimiento al haber una menor cantidad de oxígeno en el aire caliente (porque el aire caliente ocupa mayor volumen) (actualidadmotor.com/2011/10/29), el gasógeno resultante de todo el proceso de

acondicionamiento se dirige a un mezclador el cual debe ser controlado por el operario desde su estación de mando, para que de esta forma realice la corrección de mezcla (permitiendo enriquecer o empobrecer la mezcla) de acuerdo a las condiciones de funcionamiento (El Gasógeno (II) Funcionamiento del Sistema, 2012).

CAPÍTULO III: EFICIENCIA DEL MOTOR OTTO CON GASÓGENO

3.1. Eficiencia del motor

La eficiencia con que un motor puede transformar la energía térmica del combustible en potencia mecánica depende directamente del índice de compresión del motor.

En el caso de los motores alimentados con gasolina, el índice posible de compresión está limitado por el número de "octanos" del combustible, que es una medida del índice de compresión en que tiene lugar la detonación o "golpeteo" (que puede ocasionar serios daños al motor). Las mezclas de aire gasógeno presentan unos números de octanos superiores a los de las mezclas de aire gasolina. Por este motivo, pueden emplearse unos índices de compresión superiores (hasta 1:11) con el gasógeno, lo que se traduce en una mejor eficiencia térmica del motor y en un aumento relativo de la potencia de salida en el eje del motor (FAO 2, 1993).

3.2. Modificaciones necesarias en el motor Otto para mejorar su rendimiento con gasógeno

Cuando un motor Otto se convierte a gasógeno se debe tener en cuenta varias modificaciones para obtener el mayor desempeño del mismo, pero cabe indicar que el sistema de gasógeno también puede funcionar sin que se realice estas innovaciones, únicamente que su rendimiento se verá disminuido (FAO 2, 1993).

3.2.1. Aumentar la relación de compresión.

De acuerdo al estudio desarrollado por la FAO "Pequeños gasificadores de madera y carbón vegetal" este valor puede ser modificado hasta 11:1 debido a que el octanaje del gasógeno bordea los 102 octanos (FAO 2, 1993), para realizar esta modificación la hermeticidad de los cilindros con los pistones debe ser buena, y el sistema de refrigeración tiene que operar al cien por ciento.

3.2.2. Mejora en el sistema de encendido.

La calidad de la chispa en el interior de los cilindros debe ser excelente, para conseguir un mejor chispazo en la bujía de encendido se debe reemplazar la bobina convencional de encendido por una que entregue más de 25.000 voltios (BRIDGEWATER, 2009), bobinas de mayor capacidad se comercializan normalmente para vehículos de competencia y motores que se desea mejorar su performance; por citar una, la bobina ACCEL SUPER COIL 140001 (ACCEL, 2014) que a continuación se indica sus especificaciones, y se puede observar que su tensión es de 45.000 voltios.

Tabla 3.1 Características de la bobina ACCELSUPER COIL 140001

122		17 7 1 1	
Tipo	SuperCoil 140001		
Alimentación	10-12V		
Carcaza	Aluminio con aletas de refrigeración		
	integradas		
Refrigerante	Aceite de alta conductividad térmica		
Conector	Torre bronceada		
Tensión	45.000 Voltios		
Chispas	18.000/minute		
Resistencia de los	Primario	1,62,2Ω	
enrollamientos	Secundario	6,510.8ΚΩ	
	Pre-resistor	0,85Ω	
Aplicación	Motores de 4, 6 y 8 cilindros		

Fuente: www.accel-ignition.com/stealth-supercoil.html;Enero 2014

3.2.3. Adelanto al encendido.

El gasógeno tiene una combustión más lenta, para compensar en parte este tiempo se realiza el adelanto al punto de encendido (FAO 2, 1993).

3.2.4. Colocar aceite propio para motores con combustible gaseoso.

Tener aceite adecuado para el funcionamiento del motor con combustible gaseoso ayuda a evacuar más fácilmente los residuos originados por la combustión, evita oxidación de los cilindros y además existe mejor estanqueidad del motor. Únicamente como referencia a continuación se indican dos marcas de lubricantes que producen aceites propiamente formulados para combustibles gaseosos: el aceite Mobil Pegasus™ 1005 y Valvoline Gas Power, en la actualidad existe gran diversidad de marcas que ofrecen este tipo de aceite. En la ficha técnica de Mobil Pegasus™ 1005 y Valvoline Gas Power describe que son aceites que brindan mayor protección antidesgaste a altas temperaturas, mejor control de depósitos de carbón a altas temperaturas, y alta resistencia contra la oxidación y nitratación de los componentes del motor (MOBIL, 2014) (VALVOLINE, 2013), por estas ventajas que presentan recomiendan el uso de aceite apropiado para motores con combustibles gaseosos.

3.3. Eficiencia teórica del motor funcionando a gasógeno.

Para determinar la eficiencia teórica con la que un motor Otto transforma la energía térmica del gasógeno en potencia mecánica, se realiza de la siguiente manera:

$$\mathbf{\eta} = 1 - \frac{1}{\mathbf{r}^{\gamma - 1}} \tag{3.1}$$

Donde:

η = Eficiencia teórica del gasógeno

r = Relación de compresión

γ = Coeficiente de dilatación adiabático, para la mezcla aire gasógeno este valor es considerado 1.3 de acuerdo al estudio "Pequeños gasificadores de madera y carbón vegetal para el funcionamiento de motores de combustión interna". (FAO 2, 1993)

A continuación se considera una relación de compresión de 8.5:1

$$\mathbf{\eta} = 1 - \frac{1}{8.5^{1.3-1}} = 47\%$$

Con el fin de notar la mejora de eficiencia del motor al aumentar la relación de compresión ahora se considera 11:1

$$\mathbf{\eta} = 1 - \frac{1}{11^{1.3-1}} = 51\%$$

En estas expresiones se puede observar que la eficiencia depende directamente de la relación de compresión, sin embargo no se puede superar el valor de relación de compresión recomendado ya que esto originara una auto inflamación de la mezcla aire gasógeno en el interior de los cilindros del motor.

3.4. Potencia del motor cuando se utiliza gasógeno.

La potencia de un motor que funcione a gasógeno, viene determinado por los mismos factores que en el caso de los motores que funcionan con gasolina, es decir: (FAO 5, 1993)

- El valor calorífico de la mezcla aire/gasógeno que entra en el motor en cada fase de admisión.
- La cantidad de mezcla combustible que entra en el motor durante cada admisión.
- La eficiencia con que el motor transforma la energía térmica de la mezcla en energía mecánica (potencia).
- El número de RPM que el motor puede alcanzar.

3.4.1. Valor calorífico de una mezcla estequiométrica de aire gasógeno.

El poder calorífico del gasógeno según estudios de la FAO se puede considerar 4.800 KJ/m³ y de la mezcla estequiométrica aire gasógeno alrededor de 2.625,75 kJ/m³, y cuando se compara este valor con el valor calorífico de una mezcla estequiométrica de aire gasolina que es alrededor de 3.700 kJ/m³, resulta evidente la diferencia de potencia que un motor determinado, alimentado con gasolina y con gasógeno. Puede esperarse una pérdida de eficiencia de alrededor del 30%, este porcentaje se obtiene de dividir el valor calorífico de la mezcla estequiométrica aire gasógeno para el valor calorífico de la mezcla estequiométrica aire gasógeno para el valor calorífico de la mezcla aire gasógeno se obtiene el porcentaje de pérdida de eficiencia del motor Otto funcionando con gasógeno (FAO 5, 1993).

3.4.2. Cantidad de mezcla suministrada al cilindro.

La cantidad de mezcla que realmente entra en el cilindro de un motor viene determinada por el volumen del cilindro y la presión de la mezcla en el momento del cierre de la válvula de admisión.

El volumen del cilindro es constante, sin embargo la presión real de la mezcla al comienzo de la carrera de compresión depende de las características del motor (especialmente el diseño del múltiple de admisión y el paso de admisión de mezcla), la relación entre la presión real de la mezcla en el cilindro y la presión teórica (1 atmósfera). Normalmente, cuando los motores funcionan a las velocidades de diseño, muestran eficiencias volumétricas que varían entre 0,7 y 0,9 (FAO 2, 1993).

3.4.3. Pérdida de eficiencia del motor Otto funcionando con gasógeno respecto a la gasolina.

Para realizar este cálculo se necesita el valor calorífico de la mezcla estequiométrica aire gasógeno y aire gasolina, mismos que ya se indicaron anteriormente en el ítem 3.4.1.

VCEgasógeno = El valor calorífico de la mezcla estequiométrica aire gasógeno es alrededor de: 2.625,75 kJ/m³.

VCEgasolina = El valor calorífico de la mezcla estequiométrica aire gasolina es alrededor de: 3.700 kJ/m³.

 Ω_e = Eficiencia del motor Otto funcionando con gasógeno respecto a la gasolina.

 Ω_g = Pérdida de eficiencia del motor Otto funcionando con gasógeno respecto a la gasolina.

$$De = \frac{\text{VCEgasógeno}}{\text{VCEgasolina}}$$

$$Dg = 100\% - De$$

$$De = \frac{2.625,25 \text{ KJ/m}^3}{3.700,00 \text{KJ/m}^3}$$

$$Dg = 100\% - 70,97\%$$
[3.2]

$$\Omega g = 29,03\%$$

3.5. Potencia mecánica máxima de un motor Otto funcionando a gasógeno.

La potencia mecánica máxima de un motor Otto funcionando a gasógeno se puede obtener realizando los siguientes cálculos:

• Cilindrada = C

$$C = \frac{\pi \times d^2}{4} \times h \times Ncil$$
 [3.3]

Donde:

d = diámetro del cilindro (cm)

h = carrera del pistón (cm)

Ncil.= número de cilindros

• Entrada máxima de aire gasógeno = E

$$E = \frac{0.5 \, x \, (rpm) x \, C}{60 \, x \, 1000000} = m^3/s$$
 [3.4]

• Coeficiente estequiométrico aire gasógeno = CE

CE = 1.33 (Se especifica anteriormente en el ítem 1.5.1)

• Máxima entrada de gasógeno = $ME \rightarrow m^3/s$

$$ME = \frac{1}{CE} \times E$$
 [3.5]

Entrada real de gasógeno = ER

$$ER = ME \times f = m^3/s$$
 [3.6]

Donde:

- f = es la eficiencia volumétrica del motor Otto, se considera entre 0,7 y 0,9 (Se especifica anteriormente en el ítem 3.4.2)
- Potencia térmica del gasógeno = Pg

$$P_g = ER \times Pcg = KW$$
 [3.7]

Donde:

Pcg: Poder calorífico del gasógeno, 4.800 KJ/m³ se especifica en el ítem 3.4.1

• Pérdida de eficiencia del motor Otto cuando funciona con gasógeno = Dg

 $\Omega_g = 29,03\%$ (se calculó anteriormente en el ítem 3.4.3)

• Potencia mecánica máxima del motor Otto funcionando con gasógeno

$$P_{M}m\acute{a}x. = P_{g}x \ D_{g} = KW$$
 [3.8]

Teniendo en cuenta la potencia mecánica máxima que se obtiene en los cálculos para un motor Otto específico, se puede instalar cualquier actuador que requiera una potencia mecánica igual o inferior a la obtenida.

3.5.1. Cálculo de la potencia mecánica máxima de un motor Nissan A 12 funcionando a gasógeno.

Para realizar el cálculo de potencia mecánica máxima se considera un motor Otto que es muy conocido en el medio, el motor Nissan A12 del cual se observa las características de fabricación en la tabla 3.2 que a continuación se ilustra:

Tabla 3.2 Características del motor Nissan A 12

MOTOR NISSAN A 12			
Motor a gasoline	4 cilindros/4 tiempos		
Carrera/diámetro del pistón(mm)	70/73		
Cilindrada	1.172,00cc		
Relación de compresión	8.5:1		
Potencia máxima CV/rpm – KW/rpm	70/6.000 - 51.48/6.000		
Par máximo Nm/rpm	94.9/4100		

Fuente: https://www.nissan.com/Catalago_A12_ES.pdf; Enero 2015

Cálculo de la cilindrada en centímetros cúbicos:

$$C = \frac{\pi x d^2}{4} x h x Ncil$$

Donde:

d = 73mm = 7.3cm

h = 70mm = 7.0cm

 $N_{cil.} = 4$

$$C = \frac{\pi \times 7.3^2}{4} \times 7.0 \times 4 = 1.172 \text{ cm}^3$$

Cálculo de máxima entrada de aire gasógeno en m³/s:

$$E = \frac{0.5 \text{ x (rpm)x C}}{60 \text{ x } 1000000}$$

Donde:

 $C = 1.172 \text{cm}^3$

RPM = 6.000rpm

$$E = \frac{0.5 \times (6.000) \times 1.172}{60 \times 1.000.000} = 0.0586 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo de máxima entrada de gasógeno en m³/s:

$$ME = \frac{1}{CE} \times E$$

Donde:

CE = 1.33

 $E = 0.0586 m^3/s$

$$ME = \frac{1}{1.33} \times 0.0586 = 0.044 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo de entrada real de gasógeno en m³/s:

$$ER = ME \times f$$

Donde:

 $ME = 0.044 \text{m}^3/\text{s}$

f = 0.7 (diseño del motor se considera entre 0.7 y 0.9)

$$ER = 0.044 \times 0.7 = 0.0308 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo de la potencia térmica del gasógeno en KW:

$$P_g = ER \times Pcg$$

Donde:

 $ER = 0.0308 \text{ m}^3/\text{s}$

 $Pcg = 4.800 \text{ KJ/m}^3$

$$P_{\rm g} = 0.0308~x~4.800 = 147.84~KW$$

Cálculo de la potencia mecánica máxima del motor Nissan A 12 funcionando a gasógeno a un régimen de 6.000rpm:

$$P_M$$
máx. = P_g x D_g

Donde:

Pg = 147.84 KW

 $\Omega_g = 0.2903$

$$P_{M}$$
máx. = 147.84x 0.2903 = 42.92 KW

$$P_{M}$$
máx. = 42.92 KW

3.6. Mantenimiento del sistema de gasógeno para un óptimo rendimiento del motorOtto estacionario.

Para obtener el máximo rendimiento del motor Otto funcionando con gasógeno se debe tener en cuenta los intervalos de servicios y mantenimientos que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 3.3 Intervalos de servicio y mantenimiento

Trabajo a ejecutar	Frecuencia	Tiempo requerido
Recarga de madera.	Cada 1 hora	5 minutos
Drenaje de líquidos condensados en el secador y enfriador de gasógeno.	Cada 3 horas	5 minutos
Limpieza de cenizas del gasificador.	Cada 12 horas	20 minutos
Drenaje de líquidos condensados en el gasificador.	Cada 12 horas	5 minutos
Limpieza del filtro ciclón.	Cada 24 horas	20 minutos
Limpieza del filtro cerámico.	Cada 72 horas	60 minutos
Recambio de juntas defectuosas en los conductos de admisión.	Cada 500 horas	120 minutos
Limpieza del intercooler y ductos de admisión.	Cada 500 horas	90 minutos
Recambio del retén de la tapa de carga del gasificador.	Cada 750 horas	30 minutos
Cambio de tapa de carga del gasificador.	Cada 3000 horas	60 minutos

Fuente: http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s04.htm; Marzo 2012

Si no se realizan los mantenimientos en los intervalos indicados, según el estudio "Experiencias suecas recientes sobre el funcionamiento de vehículos con gas de madera" realizado por la FAO (FAO 5, 1993), la eficiencia del sistema disminuirá notablemente hasta terminar bloqueado.

Es mejor realizar los trabajos de prevención, para de esta forma evitar paradas no programadas con alto costo de reparación y pérdidas de tiempo largas.

3.7. Ventajas y desventajas de utilizar gasógeno en un motor Otto estacionario.

3.7.1. Ventajas

- El uso del gasógeno en el motor Otto, reduce las emisiones de gases contaminantes que este expulsa a la atmósfera.
- Incremento del uso de las energías renovables para la generación de energía mecánica.
- La madera constituye una fuente de energía renovable.
- El utilizar madera como combustible, contribuye a la reducción de la dependencia de los combustibles líquidos.

3.7.2. Desventajas

- Menor eficiencia del motor Otto.
- Para la operación del sistema de gasificación el operario tiene que estar bien capacitado. Debido a que el gasógeno tiene componentes tóxicos que requieren cuidados especiales, si se trabaja en lugares cerrados puede convertirse en un grave riesgo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El objetivo principal del estudio fue analizar el gasógeno como combustible para un motor Otto, para lo cual se citó los diferentes tipos de gasificadores que son útiles para la conversión de la madera en un gas combustible que sustituya al combustible líquido convencional. La selección correcta del gasificador de acuerdo al tipo de materia prima que se vaya a emplear, mejora su funcionamiento y produce un gasógeno más limpio, lo que facilita el funcionamiento de los demás componentes del sistema de alimentación de gasógeno al motor, en especial de los filtros, que al estar expuestos a un gas contaminado presentarán saturación y disminuirá la eficiencia de funcionamiento del motor Otto.
- En un gasificador se puede emplear madera de dimensiones pequeñas (virutas o astillas), que por lo general son desechadas de aserríos debido a su tamaño, esto permite optimizar estos recursos y convertirlos en combustible gaseoso apto para alimentar motores de combustión interna que proporcionen energía mecánica para diversos fines o necesidades, por ejemplo: generación de energía eléctrica o irrigación con moto-bomba.
- La madera es una fuente de energía renovable que permite disminuir el uso de los combustibles clásicos convencionales como es la gasolina. El gasógeno se puede emplear en el funcionamiento de un motor Otto sin realizar modificaciones mayores.
- El motor Otto funcionando a gasógeno disminuye su potencia en aproximadamente 30%, para reducir esta pérdida se debe realizar modificaciones en el motor que ayuden a mitigar este inconveniente, no obstante sin realizar modificaciones únicamente reemplazando el sistema de alimentación el Motor Otto puede funcionar.

- El uso de gasógeno disminuye la emisión de gases contaminantes por el tubo de escape del motor, contribuyendo positivamente a la reducción del efecto invernadero del planeta.
- En el funcionamiento del sistema de gasógeno, el operario debe tener mucha atención y precaución en los ductos y componentes que conducen el gasógeno desde el gasificador hacia el motor, que se encuentren sellados herméticamente, ya que una fuga de este gas combustible durante su operación puede ocasionar un incendio o explosión de todos los componentes incluido el motor y gasificador. Por esta razón se debe montar el gasificador y motor en espacios con buena ventilación.

RECOMENDACIONES

- El estudio puede ser empleado como base para el desarrollado de nuevos proyectos que aporten a la implementación del gasógeno, como combustible para motores Otto estacionarios, que generalmente se pueden implementar en el área rural para la generación de energía eléctrica o con fines agrícolas como puede ser la irrigación con moto-bomba.
- La gasificación también se puede utilizar de forma ilustrativa para concientizar el grado de dependencia que se tiene con los combustibles líquidos, existiendo alternativas que están al alcance y existe la materia prima para su funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- ACCEL. (29 Enero 2014). Ignition. Obtenido de http://www.accelignition.com/stealth-supercoil.html.
- Actualidad Motor. (17 Marzo de 2012). Funcionamiento del sistema integro de gasógeno, el gasógeno (ii): funcionamiento del sistema. Obtenido de www.actualidadmotor.com/2011/10/29/el-gasógeno-ii-funcionamiento-del-sistema/.
- Alonso, J. (2001). Técnicas del automóvil. Tomo IV Motor. Editorial Paraninfo, España.
- ARALCO. (25 Marzo de 2012). Filtro tipo lavador de gases venturi. Obtenido de http://www.comercialaralco.com/LavadorDeGasesVenturi.pdf.
- BRIDGEWATER, A. (2009). Energías Alternativas. Editorial Paraninfo, España.
- Bueno, L. (10 Febrero de 2012). Funcionamiento de gasificadores Updraft. Obtenido de http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/11591/1/Memoria.pdf.
- Bueno, L. (10 Febrero de 2012). Funcionamiento de gasificadores e ilustraciones esquemáticas. Obtenido de http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/11591/1/Memoria.pdf.
- Bueno, L. (09 Marzo de 2012). Sistema de enfriamiento de gases con diseño basico de gasificación. Obtenido de http://es.scribd.com/doc/71813376/34/Enfriamiento-reaprovechamiento-energetico.
- Cándido, F. (15 Febrero de 2012). Ventilador de gases. Obtenido de www.almadeherrero.blogspot.com/2009/10/gasogeno-renault-paratractores.html.
- CEAC. (2003). Manual CEAC del Automóvil. 2da. Edicion España. Grupo Editorial CEAC, Barcelona.
- Educastur Princast. (23 Marzo de 2012). Densidades de diferentes sustancias.

 Obtenido de

 http://web.educastur.princast.es/proyectos/formadultos/materiayenergia/uuno
 _captres_pauno.htm.
- FAO 1, 1993. (28 Enero 2014). Madera para producir energía, 1993. Obtenido de http://www.fao.org/docrep/q4960s/q4960s04.htm.
- FAO 2, 1993. (15 Marzo 2012). Pequeños gasificadores de madera y carbón vegetal para el funcionamiento de motores de combustión interna, 1993. Obtenido de http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s03.htm.
- FAO 3, 1993. (28 Enero 2014). El gas de madera como combustible para motores, 1993. Obtenido de http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s00.htm.

- FAO 4, 1981. (08 Marzo 2012). Técnicas simples para la obtención de combustibles básicos, 1981. Obtenido de http://www.fao.org/docrep/p2070s/p2070s06.htm.
- FAO 5, 1993. (19 Marzo 2012). Mezclador aire gasógeno, 1993. Obtenido de http://www.fao.org/docrept05125/to5125.
- FAO 6, 1993. (14 Marzo 2012). Experiencias suecas recientes sobre el funcionamiento de vehículos con gas de madera y carbón vegetal, 1993. Obtenido de http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s04.htm#topofpage.
- FAO. (7 Febrero de 2012). Gasificación, gases combustibles resultantes, funcionamiento y esquemas de gasificadores. Obtenido de http://www.fao.org/docrep/T0512S/t0512s03.htm.
- FAO. (07 Marzo de 2012). Valores calorificos y porcentaje energético de la madera. Obtenido de http://www.fao.org/docrep/p2070s/p2070s06.htm.
- Feders y Colaboradores. (2008). Enciclopedia Mecánica Popular. cap. 8 página 1025. Larouse.
- García, P. (2000). Gasificación de biomasa, Revista Energía No. 1.
- García, T. (11 Marzo de 2012). Contenidos de ceniza en los gasificadores. Obtenido de http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/biblos/pdf/1987/09-1987-04.pdf.
- García, T. (19 Marzo de 2012). Estequiometría aire gasógeno. Obtenido de http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/biblos/pdf/1987/09-1987-04.pdf.
- Guerra, Y. (28 Enero 2014). Gasificador de lecho descendente o fijo en contra corriente. Obtenido de http://www.monografias.com/trabajos66/residuos-solidos-toronja/residuos-solidos-toronja2.shtml.
- González, A. (2004). Tratamiento y valorización energética de residuos. Editorial Paraninfo, España.
- Handbook de Química. (2008). Universidad de Pensilvania. EEUU.
- HUMEDADCONTROLADA. (17 Marzo de 2012). Contenidos de humedad de la madera. Obtenido de http://www.humedadcontrolada.com/humedad-en-lamadera/.
- H, Vogel y S. Kedrers. (1998). SCIENCIE.
- MAC GRAW HILL. (2008). Handbook de química.
- MADRIMASD. (17 Febrero de 2012). Diferencia entre gasificadores. Obtenido de http://www.madrimasd.org/blogs/renovables_medioambiente/2010/11/05/131 947
- Martínez, C. (02 Marzo de 2012). Características de gasificadores. Obtenido de http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3157/1/54671-1.pdf.
- Meléndez, J. (11 Marzo de 2012). Implementación de la técnologia de la gasificación para operar en los beneficio de cafe, 2006 (Componentes toxico nocivos del

- gasógeno). Obtenido de http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/gasificacion_beneficios _cafe.pdf.
- MOBIL. (29 Enero 2014). Manual de lubricación. Obtenido de http://www.mobilindustrial.com/ind/spanish/products_pegasus1005.aspx.
- MULTITEK. (10 Febrero de 2012). Etapas de la gasificación. Asturias, España. Obtenido http://www.multitekingenieros.com/gasificacion_madera_que_es.
- MULTITEK. (10 Febrero de 2012). Pirolisis y oxidación. Asturias, España. Obtenido de http://www.multitekingenieros.com/gasificacion.
- Pablo, L. A. V. (2004). Ingeniería del Automóvil. Editorial Thomson.
- SWAGELOCK. (21 Febrero de 2012). Filtro tipo ceramico. Obtenido de http://www.swagelock.com.
- Tamayo, M. (04 Marzo de 2012). Comparación entre gasificadores. Obtenido de http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5173/1/T-ESPE-033171.pdf .
- Thomasse, C. (2004). Pequeño manual del Foguista. 1ra Edición. Uruguay.
- Toalongo, M. (2007). Métodos y Técnicas de Investigación. 1ra Edición. Universidad del Azuay. Cuenca-Ecuador.
- Toalongo, M. (2008). Fundamentos de soldadura. 2da Edición. Universidad del Azuay. Cuenca-Ecuador.
- Toscano, L. (2009). Nuevas tendencias en electricidad autogenerada. Universidad Central de Venezuela.
- Vals, R. V. (2001). Bioresource Tecnología. Alemania.
- Valvoline. (2013). Manual Técnico 2013.
- Valvoline. (29 Enero 2014). Manual técnico Valvoline 2013. Obtenido de http://www.valvoline.com.ec/valint/ecuador/spanish/static_document/Valvoline_ManualTecnico2013.pdf.
- WIKI. (27 Marzo de 2012). Estrategias para el control (Filtro tipo ciclon). Obtenido de http://catmosferica1.wikispaces.com/Estrategias+para+el+control.