



**SISTEMA DE FILTRADO Y ENFRIAMIENTO DE SYNGAS COMO MEJORA AL PROCESO DE GASIFICACION DOWNDRAFT**

**SYSTEM OF FILTERING AND COOLING OF SYNGAS AS IMPROVEMENT TO THE DOWNDRAFT GASIFICATION PROCESS**

**Lenin Santiago Orozco Cantos**

Docente. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba – Ecuador  
Ingeniero Mecánico, Magister en Eficiencia Energética  
Isorozco@epoch.edu.ec / leninomega6@hotmail.com

**Edwin Ángel Jácome Domínguez**

Docente. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.  
Riobamba - Ecuador  
Ingeniero Mecánico, Magister en Eficiencia Energética  
ejacome@epoch.edu.ec / angel891611@hotmail.com

**Sayuri Monserrath Bonilla Novillo**

Docente. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba - Ecuador  
Ingeniera Mecánica, Magister en Gestión Industrial y Sistemas Productivos  
smbonilla@epoch.edu.ec / sayitomonse@hotmail.com

**Juan Carlos Castelo Valdiviezo**

Docente. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba – Ecuador  
Ingeniero Automotriz, Magister en Sistemas Automotrices  
j\_castelo@epoch.edu.ec

**Gloria Elizabeth Miño Cascante**

Vicerrectora Académica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba - Ecuador  
Phd. en Ciencias Económicas, Magíster en Dirección de Empresas Mención Proyectos, Magister en Docencia Universitaria e Investigación Educativa  
gmino@epoch.edu.ec / gloriamino@yahoo.es

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Lenin Santiago Orozco Cantos, Edwin Ángel Jácome Domínguez, Sayuri Monserrath Bonilla Novillo, Juan Carlos Castelo Valdiviezo y Gloria Elizabeth Miño Cascante (2018): "Sistema de filtrado y enfriamiento de syngas como mejora al proceso de gasificación downdraft", Revista Caribeña de Ciencias Sociales (marzo 2018). En línea:

<https://www.eumed.net/2/rev/caribe/2018/03/filtrado-enfriamiento-syngas.html>

**RESUMEN**

El presente trabajo indica el diseño e implementación de un sistema de captación de syngas en un gasificador de tipo Downdraft, con el cual se pretende mejorar la calidad del gas producido en términos de reducción de material particulado y aumento de la densidad a través de su enfriamiento. El gasificador utilizado procesa 40 kg/h de biomasa, las pruebas se enmarcaron en el

funcionamiento de la planta a una capacidad del 75% de la potencia instalada. Atendiendo a la pureza del gas, se establece un filtro exterior de tela con la capacidad de retener partículas de un tamaño menor a 50  $\mu\text{m}$ . Para tener un control del flujo del agente gasificante y cuantificar la cantidad de gas producido también se diseña e implementa, a través de la norma ISO 5167, dos caudalímetros de presión diferencial de tipo placa orificio. Y finalmente, en torno al tema del valor de la densidad, se propone que el gas pobre sea enfriado en un intercambiador de calor, y el fluido que se calienta sea el aire que se introduce como agente gasificante. En las pruebas de funcionamiento se corrobora el dimensionamiento adecuado de los sistemas antes mencionados. Con las adecuaciones realizadas se llega a tener un equipo de gasificación con el potencial de alimentar de combustible gaseoso a un motor de combustión interna y se plantea la conformación inicial para los estudios de una planta prototipo de generación de energía continua a partir de la biomasa.

**Palabras clave:** gasificación, biomasa, syngas, filtración de gas.

## **ABSTRACT**

The present paper shows the design and implementation of a syngas capture system in a Downdraft gasifier, with which it is intended to improve the quality of the gas produced in terms of reduction of particulate material and increase of the density through its cooling. The gasifier used processes 40 kg /h of biomass, the tests were framed in the operation of the plant with a capacity of 75% of the installed power. Attending to the purity of the gas, an outer cloth filter with the capacity to retain particles smaller than 50  $\mu\text{m}$  is established. In order to control the flow of the gasifying agent and quantify the amount of gas produced, two orifice plate type differential pressure flowmeters are designed and implemented through the ISO 5167 standard. And finally, around the issue of density value, it is proposed that the lean gas be cooled in a heat exchanger, and the fluid that is heated be the air that is introduced as a gasifying agent. In the performance tests, the appropriate sizing of the aforementioned systems is corroborated. With the adjustments made, it is possible to have a gasification equipment with the potential of feeding gaseous fuel to an internal combustion engine and the initial conformation for the studies of a prototype plant for the generation of continuous energy from biomass is considered.

**Keywords:** gasification, biomass, syngas, gas filtration.

## **1. INTRODUCCION**

Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas que se produce en un ambiente pobre de oxígeno, que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina, o en un motor tras ser debidamente acondicionados. (Collazo Sanmartín , 2015) (Basu, 2010) (Castro, 2015)

En el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrógeno, esta mezcla de gases se denomina "Syngas" o gas de síntesis. (Zainal, Rifau, Quadir, & Seetharamu, 2002)

La gasificación de biomasa es una tecnología utilizada para producir gas de ciudad a finales del siglo XIX y durante el siglo XX y desde sus orígenes ha ido mejorando desde el punto de vista de la eficiencia de las emisiones al medio ambiente. (FAO, 2010)

Los primeros gasificadores de carbón fueron construidos en Alemania por Bischof en 1839 y por Siemens en 1861. El gas era utilizado como combustible para los hornos de la industria siderúrgica, luego mediante la aplicación de mecanismos de limpieza del gas, desarrollados en Inglaterra por Dowson en 1881, el uso de gasificadores se extendió a hornos pequeños y motores de combustión interna. A principios del siglo XX se utilizaron en barcos, automóviles, camiones y

tractores. Durante la II guerra mundial, debido a la escasez del petróleo, la gasificación fue ampliamente utilizada. (Martinez Jesus, 2014) (Basu, 2010)

En Francia y en Suiza se utilizaba gas de madera como combustible, el cual era obtenido por gasificación a partir del carbón vegetal. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, 1993) (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, 1993)

Actualmente existe un gasificador de tipo Downdraft en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Mecánica; a lo largo de los años se han dado ciertas modificaciones con la finalidad de repotenciarlo; su funcionamiento radica en la utilización de biomasa (tales como cascarilla de arroz o briquetas de madera) para obtener gas combustible que puede ser utilizado en diferentes procesos, hoy en día el gas pobre producido, no es utilizado, simplemente es liberado al ambiente y combustionado en la línea de llama, entonces se ve la necesidad de implementar un sistema para su adecuada obtención y que cumpla las condiciones para usos más sofisticados.

## 2. MATERIALES Y METODOS

Se provee diseñar e implementar un sistema para la obtención de gas pobre en el gasificador Downdraft, para lo cual se utiliza un sistema de filtrado, un sistema de refrigeración o enfriamiento y un sistema de medición de caudal entre otros implementos los mismos que serán colocados basados en las normas técnicas establecida para causar el mínimo impacto posible al medio ambiente. (Zainal, Rifau, Quadir, & Seetharamu, 2002)

El gas resultante del proceso de gasificación contiene partículas, el cual debe ser limpiado lo máximo posible para poder utilizarlo como combustible limpio para generar agua caliente o a su vez ser utilizado en motores de combustión interna para generación de energía eléctrica a partir de biomasa residual. (System, 2010)

Uno de los factores más importantes es la baja densidad del gas debido a las altas temperaturas obtenidas en la gasificación lo que ocasiona un problema de producción al momento de ingresar en cualquier aplicación por lo que se pretende diseñar un sistema de filtrado para retención de partículas sólidas y un sistema de enfriamiento para aumentar la densidad que trabaje de manera eficiente, con un mínimo consumo de energía, en menor tiempo y de fácil limpieza, después de su uso. (Londoño, 2008)

El diseño del sistema de obtención de gas pobre se realiza en tres partes principales:

- El sistema de filtrado
- Determinación del caudal de aire para el correcto funcionamiento del gasificador Downdraft
- El sistema de enfriamiento.

### Diseño del sistema de filtrado

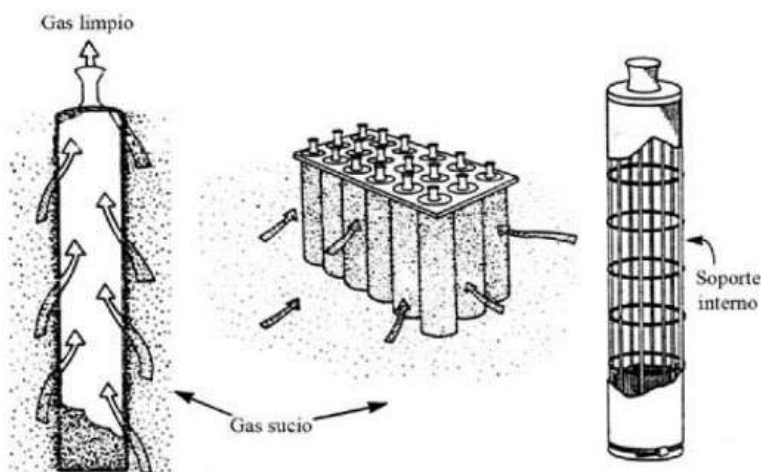
Se selecciona la propuesta de filtración por tela, la configuración geométrica será en mangas. Esto debido a que las partículas a filtrar corresponden a un tamaño de 0,6-0,75  $\mu\text{m}$ . La caída de presión por estos tipos de filtros es relativamente baja en comparación con depuradores húmedos, 250 y 1000  $\text{mmH}_2\text{O}$  respectivamente. Adicionalmente los depuradores húmedos para poder capturar partículas del tamaño requerido, corresponderían a los de alta energía, lo cual amerita introducir un nuevo equipo (bomba centrífuga), el mismo que consumirá energía. Una de las principales posturas en la adecuación de un sistema de gasificación es el menor uso de energía añadida, de manera que al realizar un balance de energía total, se pueda obtener la mayor eficiencia con el equipo. (Echeverri Londoño, 2008)

Medios filtrantes: El cual corresponde a la Fibra de vidrio, esto debido a la temperatura de funcionamiento, la cual según registros en las pruebas de gasificación es de 115 °C.

Modo de filtración: En este caso el modo más adecuado es el de filtración exterior, debido a que el gas que se debe filtrar, posteriormente se lo conduce a otro proceso y no se lo libera directamente a la atmosfera.

En la Figura 1 se puede visualizar Mecanismo de limpieza. Dado el tamaño relativamente pequeño del filtro, añadido a la facilidad de desmontaje del mismo no será necesario añadir un mecanismo de limpieza para los filtros. El mantenimiento de estos, el cual se aconseja sea cada 100-150h, se lo realizará con un desmontaje, limpieza manual del material filtrante o en el caso de ser necesario su recambio.

La velocidad de filtración: Este es uno de los parámetros más importantes en el proceso de filtración, dado que se corresponde con el tipo de gas así como del material filtrante, el objetivo final es que en el filtro se reduzca la velocidad del gas pobre, y de esta manera al pasar por el medio filtrante, las partículas sólidas que lleva sean retenidas. (Echeverri Londoño, 2008) (MATAIX, 1986)



**Figura 1.** Esquema del proceso de filtrado  
Fuente: Propia

Tabla 1.

*Velocidades de filtración recomendadas para filtros de fibra de vidrio*

<b>Velocidades de filtración recomendadas para filtros de fibra de vidrio</b>	
<b>Polvo</b>	<b>Velocidad de filtración (m/min)</b>
Humos metalúrgicos	0,45-0,54
Hornos de cal y cemento, hornos de fundición	0,54-0,60
Calderas de carbón	0,60-0,70

Fuente: (Echeverri Londoño, 2008)

En la Tabla 1 se puede visualizar una recomendación de las velocidades para el proceso de filtrado.

Por tanto se opta por una velocidad de filtrado de 0,6 m/min.

Área de tela: Con el valor de la velocidad de filtrado y el caudal del gas pobre producido en el gasificador se calcula el área Neta de Filtrado, que correspondería al área de la tela.

A través de la ecuación de continuidad:

$$Q_{sg} = V_{sg} \cdot A_T \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

$Q_{sg}$ : Caudal de gas de síntesis, en m<sup>3</sup>/s.

$V_{sg}$ : Velocidad de gas de síntesis, en m/s. este valor corresponde a 4m/s, dato obtenido a través de medición experimental

$A_T$ : Área de la Tubería que conduce al gas de síntesis, en m<sup>2</sup>

Este valor corresponde a 0,0031m<sup>2</sup>, dato obtenido a través de la tubería de PVC de 2" nominal ( $D_{interior} = 60mm$ ) (Londoño, 2008). De lo anteriormente descrito se tiene:

$$Q_{sg} = 0,0156 \text{ m}^3/\text{s}$$

De la misma manera utilizando la misma ecuación de continuidad:

$$Q_{sg} = V_{gf} \cdot A_{filtrado}$$

Dónde:

$V_{gf}$ : Velocidad de filtración del gas, en m/s, este valor corresponde de a 0,6m/min, recomendado (Londoño, 2008)

$A_{filtrado}$ : Área de filtrado, en m<sup>2</sup>.

Despejando el área de filtrado y resolviendo la ecuación anterior, se obtiene:

$$A_{filtrado} = 1,13\text{m}^2$$



**Figura 2.** Medición de la velocidad de filtración.  
Fuente: Propia

Al valor de área obtenido, se lo debe multiplicar por un factor recomendado según el mismo resultado de este, se observa en la siguiente tabla:

Tabla 2.  
Factor de corrección por área de la tela

AREA DE TELA NETA (m <sup>2</sup> )	MULTIPLICAR EL ÁREA NETA POR
1 - 370	2
371 - 1,115	1.5
1,116 - 2,230	1.25
2,231 - 3,350	1.17
3,351 - 4,460	1.125
4,461 - 5,580	1.11
5,581 - 6,690	1.10
6,691 - 7,810	1.09
7,811 - 8,920	1.08
8,921 - 10,040	1.07
10,041 - 12,270	1.06
12,271 - 16,730	1.05
>16,730	1.04

Fuente: (Echeverri Londoño, 2008)

Por tanto el valor del área de filtrado total resulta:

$$A_{\text{filtrado TOTAL}} = 1,13\text{m}^2 \times 2 = 2,26 \text{ m}^2$$

Como la propuesta del sistema de filtrado es en mangas, la configuración de las mismas será en una matriz circular, con una manga central, según se indica en los planos adjuntos.

Las dimensiones de dichas mangas se indica a continuación, únicamente atendiendo a que el área total de filtrado se dividirá para 6.

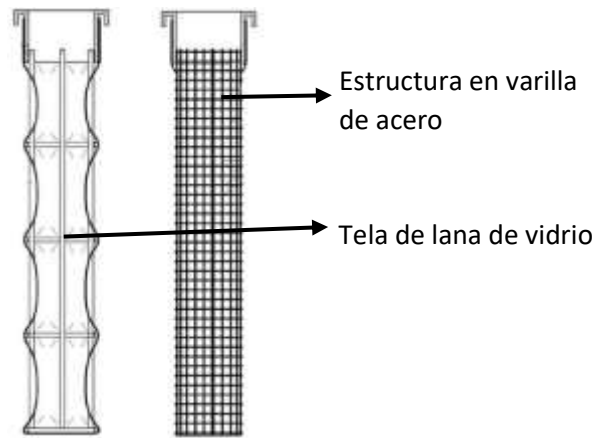
Numero de mangas: 6

Diámetro: 0,15m

Longitud: 0,75m

Área unitaria: 0,35m<sup>2</sup>

$A_{\text{filtrado TOTAL para construcción}} = 2,13\text{m}^2$



**Figura 3.** Manga de Filtro  
Fuente: Propia

Por tanto se nota que el área de filtrado total para construcción es un poco menor que el área de filtrado total, aproximadamente 1,4%, lo cual es completamente tolerable dado que se atendió al factor de mayoramiento. (Londoño, 2008)

Estimación de la caída de presión. Este es otro parámetro de vital importancia en el dimensionamiento del equipo de filtración, el mismo que ayudara a determinar el valor del aporte energético que tendrá el ventilador que se seleccione. (Londoño, 2008)

La caída de presión está compuesta por la resistencia que presenta la tela, más la de la capa de partículas que se forma. La caída de presión presentada por la capa de partículas es la que más contribuye a la caída de presión total en el filtro. A medida que la capa de partículas crece sobre la superficie de la talega, la caída de presión aumenta.

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_f + \Delta P_p \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

$\Delta P$ : Caída de presión total [ $\text{mmH}_2\text{O}$ ]

$\Delta P_s$ : Caída de presión a través del compartimiento, en  $\text{mmH}_2\text{O}$ .

$\Delta P_f$ : Caída de presión a través de la tela, en  $\text{mmH}_2\text{O}$ .

$\Delta P_p$ : Caída de presión a través de la capa de partículas, en  $\text{mmH}_2\text{O}$ .

La caída de presión a través del compartimiento usualmente es baja y puede ser ignorada. Cuando la tela del filtro ya se encuentra en funcionamiento, la caída de presión a través del compartimiento se determina junto con la caída de presión a través de la tela, por lo que puede decirse que este término se hace despreciable o está contemplado en la caída de presión a través de la tela.

La caída de presión a través de la tela se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_j = K_1 \cdot V_{gf} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

$\Delta P_j$ : Caída de presión a través de la tela, en  $mmH_2O$ .

$K_1$ : Factor de resistencia del tejido, en  $mmH_2O \text{ s/m}$ .

Tabla 3.  
Factores de resistencia para telas de tejido plano

TELA	TEJIDO (HILOS/CM)	$K_1$ (mm H <sub>2</sub> O .8/m)
Algodón	18x22	125.0
	41x27	138.9
Lana	16x20	29.8
	14x13	13.5
	11x12	22.7
	12x10	45.5
Nylon	15x15	156.3
Orlón	29x15	67.6
Fibra de vidrio	13x11	147.1
Dacrón	24x16	75.8
	30x19	263.2
Teflón	30x28	125.0

Fuente: (Echeverri Londoño, 2008)

Por lo tanto al escoger un valor de  $K_1 = 147,1 \text{ mmH}_2\text{O.s/m}$ , nos queda la caída de presión por la tela:

$$\Delta P_j = 1,471 \text{ mmH}_2\text{O}$$

La caída de presión que se presenta en la capa de partículas que se han acumulado sobre la tela se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_p = K_2 C_p V_{gf}^2 \theta \quad (\text{Ec. 4})$$



Dónde:

$K_2$ : Factor de resistencia debido a la capa de partículas, en  $mmH_2O \text{ m s/g}$ .

$C_p$ : Concentración de partículas en la corriente gaseosa, en  $g/m^3$ .

$\theta$ : Tiempo de acumulación de las partículas o de filtración, en s.

Con las referencias de la Tabla 4, se puede calcular el valor de  $K_2$

Se ha estimado por tanto un valor de  $K_2 = 48,337 mmH_2O \text{ m s/g}$

Tabla 4.  
Factores de resistencia de ciertas partículas

PARTÍCULAS	$K_2$ (mm H <sub>2</sub> O .m.s/g)					
	833 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	45 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Granito	1.618	2.253				20.277
Fundición	0.635	1.618			3.871	
Yeso					6.452	19.355
Feldespatos					6.452	27.957
Piedra	0.983		6.452			
Cenizas (negro de humo)						48.337
Óxido de zinc						16.078
Madera			6.452			
Resina (fría)		0.635				25.807
Avena	1.618		9.831	11.265		
Maíz	0.635		3.871	9.012	9.228	

Fuente: (Echeverri Londoño, 2008)

Nota: Cálculos basados en mediciones con aire. Para gases diferentes al aire, los valores de  $K_2$  estipulados en la tabla se deben multiplicar por la viscosidad real del gas dividida por la viscosidad del aire. (Londoño, 2008)

El valor de  $C_p$ , según el material a filtrarse se estima en  $50 \text{ mg/m}^3$  del gas, observar la Tabla 5:

Tabla 5.  
Cantidades comunes de elementos contaminantes del gas pobre

<b>Polvo:</b>	Menos de $50 \text{ mg/m}^3$ de gas. Preferentemente $5 \text{ mg/m}^3$ de gas.
<b>Alquitranes:</b>	menos de $500 \text{ mg/m}^3$ de gas
<b>Ácidos:</b>	menos de $50 \text{ mg/m}^3$ de gas (medido como ácido acético)

Fuente: (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, 1993)

El valor del tiempo  $\theta$  corresponderá al valor recomendado de operación antes de limpiar los filtros el cual es 100 horas, equivalentes a 360 000 s (FAO, 2010)

Por tanto el valor de la caída de presión por la capa de partículas es:

$$\Delta P_p = 87 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Se nota claramente que este valor varía directamente con el aumento de la velocidad de filtración o con el contenido de material particulado (concentración de partículas), es decir a mayor velocidad

de filtración o mayor material particulado, se tendrá en un mismo tiempo un mayor valor de caída de presión en el filtro.

Finalmente se calcula la caída de presión que se tendrá en el filtro cuando cumpla el tiempo recomendado de operación antes de realizar su limpieza:

$$\Delta P = 88,47 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Este valor podría ser el referente a través del cual, con la lectura de presión diferencial en el filtro, se estime que sea necesaria una limpieza; en el caso de ocurrir alguna alteración de su funcionamiento y no se haya cumplido las 100 horas como es el referente.

### **Diseño del sistema de medición de caudal.**

De los medidores de caudal por presión diferencial, se selecciona el tipo placa orificio, por su facilidad de construcción, favorable costo de construcción, ausencia de sólidos en suspensión que puedan deteriorar rápidamente al elemento los datos de construcción y que la instalación cuente con un tramo recto para su instalación. Las dimensiones constructivas así como también, recomendaciones de instalación, se encuentran ampliamente detallados en la NORMA ISO 5167. Este modelo será el tema de nuestro análisis en el diseño. (ISO5167, 2003)

Son dos los puntos en los que se requiere medir el caudal. El primero es el ingreso de aire como agente gasificante, el cual interesa medirlo para obtener eficiencias altas en el gasificador, manteniendo las reacciones con deficiencia de oxígeno. El segundo punto es el valor total de gas pobre producido, evidentemente este dato es necesario para conocer el potencial de generación del gasificador.

La placa orificio propiamente dicha se construye de acero según la normalización, en nuestro caso los demás componentes como tubería y bridas, en nuestro caso, son de diferentes materiales. En el caso del medidor de aire al ingreso del gasificador el material de construcción del conjunto es de PVC, mientras que el medidor de gas pobre es de acero. La razón es la temperatura de trabajo, en el primer medidor el flujo no supera los 30°C mientras que en el segundo bordea los 100 - 115 °C.

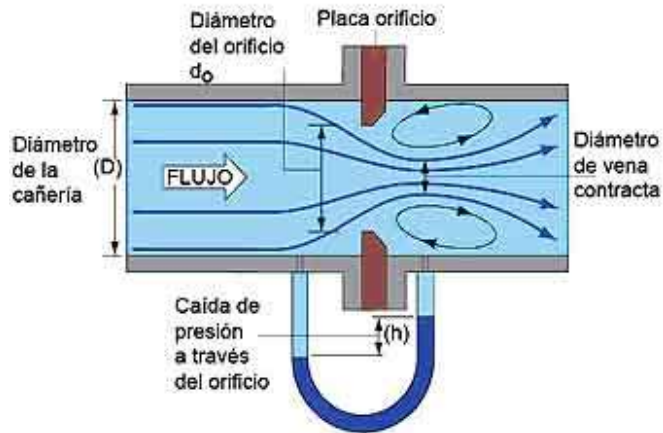
En los dos casos la presión diferencial que será medida se la realizara en un tubo en U. Al tratarse de un gasificador de 30 kW, los flujos volumétricos gaseosos no son tan grandes, hablamos de caudales no mayores a 0,02 m³/s; por tanto la presión diferencial será notablemente baja, para mayorar la cota de presión diferencial y así tener lecturas de mejor apreciación se utiliza Acetona como el líquido que reposara en el tubo en U, esto gracias a que su densidad es menor que la del agua. (INSTRUMENTACIONYCONTROL, 2014)

Para el dimensionamiento de este tipo de medición de caudal es necesario conocer lo siguiente:

- Principio de operación
- Partes que lo integran
- Especificaciones técnicas
- Requisitos de instalación
- Cálculo del gasto
- Manejo de datos
- Técnicas de mantenimiento

Los parámetros fundamentales que se utilizan para el diseño de la placa son los siguientes:

- Diámetro de la tubería:  $D = 2 \text{ plg}$
- Diámetro de la perforación en la placa orificio:  $d = 1 \text{ plg}$
- Densidad del fluido en el manómetro:  $\rho = 772 \text{ Kg/m}^3$  (acetona)



**Figura 4.** Esquema de funcionamiento de placa orificio con tubo en U.  
Fuente: (MATAIX, 1986)

Cálculo de la densidad del fluido en el manómetro

Se utiliza acetona comercial, de la cual para tener una mayor confiabilidad se determina su densidad. Para un determinado volumen de fluido se pesa su contenido, la relación entre estos valores se conoce como la propiedad denominada densidad.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde:

m: Masa del fluido en el manómetro [kg]

V: Volumen del fluido en el manómetro [m<sup>3</sup>]

$\rho$ : Densidad del fluido en el manómetro

$$\rho = \frac{0.01967 \text{ kg}}{2.546 \times 10^{-5} \text{ m}^3}$$

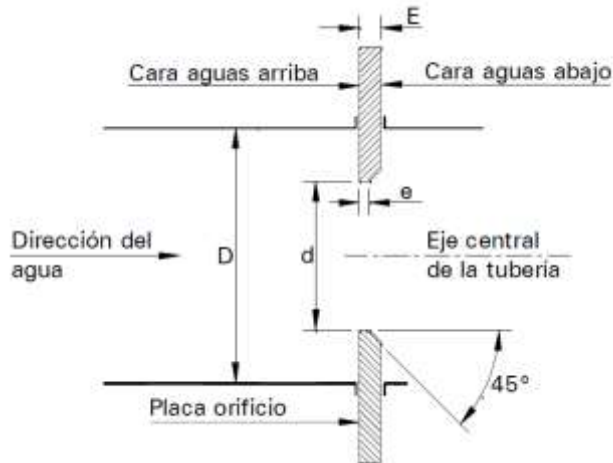
$$\rho = 772 \text{ kg/m}^3$$

Tabla 6.

*Valores mínimo y máximo de los espesores para la construcción de placas orificio*

Dimensión	Mínimo	Máximo
e	0.005D	0.02D
E	0.005D	0.05D
d	½ plg	38 plg
d/D	0.20	0.75

Fuente: (ISO5167, 2003)



**Figura 5.** Cotas dimensionales de la placa orificio  
Fuente: (ISO5167, 2003)

La Tabla 6 muestra los valores mínimo y máximo de los espesores  $e$  y  $E$ , en función del diámetro de la tubería que se utilice. También, el valor mínimo y máximo del diámetro del orificio a partir de la relación de diámetros más conocida como  $\beta$ .

Por tanto en nuestro caso a partir de los diámetros de las tuberías en las que van a ser instalados los caudalímetros, los cuales son de 2" nominales cada uno (material de PVC y acero cedula estándar), se escoge un valor de 1 in para el orificio de la palca

Según la norma ISO 5167-1980 la relación de diámetros queda definida por el valor adimensional de  $\beta$ .

El espesor para este tipo de construcción de placa es despreciable puesto que es muy delgada.

$$0,005 \cdot D \leq e \leq 0,02D$$

$$0,005 \cdot D \leq E \leq 0,05D$$

Dónde:

$D$ : Diámetro de la tubería, en m

$e$ : Espesor del borde de la placa orificio, en m

$E$ : Espesor de la lámina de la placa orificio, en m.

$$0,000315m \leq e \leq 0,00126m$$

$$0,315mm \leq e \leq 1,26mm$$

$$0,315mm \leq E \leq 3,15mm$$

Tabla 7.  
*Dimensiones de la placa orificio de PVC y acero*

Material	Diámetro Nominal(plg)	Diámetro interior(mm)
PVC	2	63
Acero	2	50.8
Placa orificio	-----	25.4

La construcción de la placa se la llevo a cabo en lámina de acero de 2mm de espesor, y se biselo sus bordes hasta alcanzar el espesor de borde requerido de 1,26mm.

Para que el cálculo deba ser correcto debe cumplir la siguiente condición.

Cálculo para el valor de  $\beta$  del Medidor 2, (material acero)

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{0,0254 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\beta = 0,5$$

$$0,1 \leq 0,5 \leq 0,75$$

Calculo para el valor de  $\beta$  del Medidor 1, (material PVC)

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{0,0254 \text{ m}}{0,0630 \text{ m}}$$

$$\beta = 0,4$$

$$0,1 \leq 0,4 \leq 0,75$$

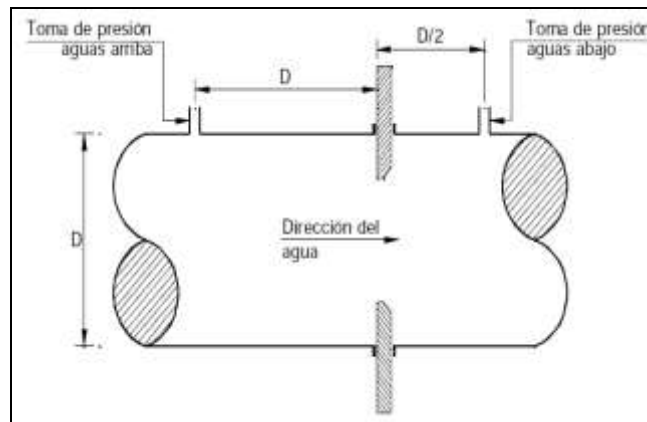
Ubicación de las tomas de presión. Existen tres posiciones de instalación, la tabla siguiente muestra las distancias requeridas aguas arriba (L1) y aguas abajo (L2) para cada tipo de instalación. (ISO5167, 2003)

Tabla 8.  
*Posiciones de las tomas de presión*

Tipo de instalación	L1	L2
D-D/2	D	D/2
A una plg		1 plg
En los bordes		Cero

Fuente: (ISO5167, 2003)

En las siguientes figuras, observas secciones transversales de los tres tipos de instalaciones:



**Figura 6.** Tomas de presión a D-D/2

Fuente: (ISO5167, 2003)

Para el caso de estudio se selecciona la primera alternativa Tomas de presión a D-D/2, esto por facilidad de construcción, ya que con la presencia de las bridas será imposible construir de las otras dos maneras. (ISO5167, 2003)

Cálculo para el caudal que pasa por la placa orificio. La siguiente formula es la que proporciona la Norma para el cálculo del caudal:

$$Q_R = \frac{C_d \cdot \pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho (1-\beta^4)}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Con esta ecuación se puede determinar el caudal que se pasa por la placa orificio, tan solo con medir la diferencia de alturas que se manifiesta en el tubo en U.

Para el valor del coeficiente de descarga se utiliza la siguiente expresión:

$$C_d = 0,05959 + 0,0312 \beta^{2,10} - 0,1840 \beta^8 + 0,0029 \beta^{2,50} \left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0,75} + \frac{0,0900 L_1 \beta^4}{1-\beta^4} - 0,0337 L_2 \beta^3 \quad (\text{Ec. 8})$$

Dónde:

$L_1$ : Relación entre la distancia desde la toma aguas arriba hasta la placa orificio y el diámetro de la tubería, en m.

$L_2$ : Relación entre la distancia desde la toma aguas abajo hasta la placa orificio y el diámetro de la tubería, en m.

$Re$ : Número de Reynolds, adimensional.

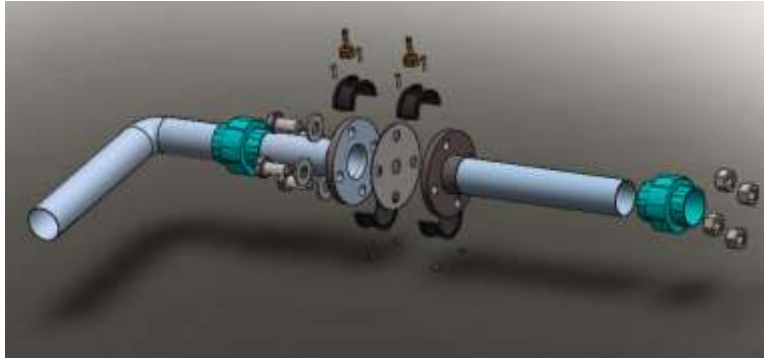
Como es de esperarse, si el coeficiente de descarga depende del número de Reynolds, este dato no es constante en todas las mediciones, ya que al variar el caudal, se modificara el valor de la velocidad y consecuentemente el número de Reynolds. Este parámetro se lo analizará con más detenimiento en la fase experimental.

Sin embargo existen valores tabulados bastante aproximados a lo real, de los cuales se puede hacer uso.

Tabla 9.  
*Coefficientes de descarga para diferentes diámetros de la placa orificio.*

Diámetro del orificio de la placa orificio en plg	Valor de $C_d$ :
3/4	0,6111
1	0,6097
3/2	0,6085
2	0,6083

Consecuentemente se obtiene un valor de  $C_d = 0,6097$ , que corresponde a 1 plg, diámetro seleccionado de la placa orificio.



**Figura 7.** Esquema de la placa orificio.  
Fuente: Propia

### Diseño del sistema de enfriamiento

Para el diseño del sistema de enfriamiento se parte de los datos ambientales y datos de las pruebas de gasificaciones previas.

Propiedades del aire evaluadas a temperatura promedio

$$T_p = \frac{T_{a1} + T_{a2}}{2} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$T_p = \frac{21^\circ\text{C} + 80^\circ\text{C}}{2} = 50,5^\circ\text{C}$$

Donde:

Calor específico:  $C_p = 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

Conductividad térmica  $K_a = 0,02811 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$

Viscosidad:  $\mu = 0,00001965 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

Prandt:  $Pr = 0,7044$

Densidad del aire  $\rho = 0,7749$

Cálculo del flujo másico del aire:

Caudal de succión del ventilador 8 l/s o 0,008 m<sup>3</sup>/s

$$\rho = \frac{m_a}{V} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\dot{m}_a = \rho \dot{V}$$

$$\dot{m}_a = \left(0,7749 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0,008 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

$$\dot{m}_a = 0,006199 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Cálculo del área aproximada

Velocidad del aire en la entrada del banco:  $\vec{V}_1 = 0,10 \frac{m}{s}$  (INCROPERA, 1999)

$$\dot{V}_1 = \vec{V}_1 (A_1)$$
$$A_1 = \frac{0,008 \frac{m^3}{s}}{0,10 \frac{m}{s}}$$
$$A_1 = 0,08 m^2$$

Cálculo de la LMTD:

Para el cálculo de la diferencia media térmica logarítmica como se mencionó en el capítulo anterior se debe realizar en un flujo cruzado, para lo cual se toma como una diferencia de temperatura de los gases de 65 K (FAO, 2010). Se necesita además el incremento de la temperatura de los gases producto de la gasificación para lo cual se calcula el calor sensible de cada uno de ellos

$$Q_a = \dot{m}_a (c_{p_a}) (\Delta T_a) \quad (\text{Ec. 11})$$

Dónde:

$Q_a$ = Calos sensible del aire, en W.

$\dot{m}_a$ = Flujo másico de aire de enfriamiento, en  $\frac{kg}{s}$ .

$\Delta T_a$ = Diferencia de temperatura del aire de enfriamiento, en K.

$$Q_g = \dot{m}_g (c_{p_g}) (\Delta T_g) \quad (\text{Ec. 12})$$

Dónde:

$Q_g$ = Calos sensible del gas pobre, en W.

$\dot{m}_g$ = Flujo másico del gas pobre, en  $\frac{kg}{s}$ .

$\Delta T_a$ = Diferencia de temperatura del aire de enfriamiento, en K.

Debido a que el gas es una mezcla de varios gases se procede a calcular las propiedades de la mezcla. (Collazo Sanmartín , 2015)

Tabla 10.  
*Composición volumétrica del gas pobre*

Composición	Bio-Gas
Hidrógeno (H2)	0,18
Monóxido de Carbono (CO)	0,24
Dióxido de Carbono (CO2)	0,06
Oxígeno (O2)	0,04



Metano(CH4)	0,03
Nitrógeno (N2)	0,45
Total	1

Fuente: (Zainal, Rifau, Quadir, & Seetharamu, 2002)

Primero se debe transformar la composición volumétrica a composición másica con la ecuación:

$$x_i = \frac{y_i M_i}{\sum y_i M_i} \quad (\text{Ec. 13})$$

Dónde:

$x_i$  = Composición másica del constituyente i, en  $\frac{kg_i}{kg}$ .

$y_i$  = Composición volumétrica del constituyente i, en  $\frac{kmol_i}{kmol}$ .

$M_i$  = Masa molar del constituyente i, en  $\frac{kg}{kmol}$ .

Tabla 11.

Composición volumétrica del gas pobre

Composición	Bio-Gas	R $[\frac{KJ}{kg K}]$	M [kg/kmol]	X
Hidrógeno (H2)	0,18	4,1214	2	1,50%
Monóxido de Carbono (CO)	0,24	0,2968	28	27,91%
Dióxido de Carbono (CO2)	0,06	0,1889	44	10,96%
Oxígeno (O2)	0,04	0,2598	32	5,32%
Metano(CH4)	0,03	0,5182	16	1,99%
Nitrógeno (N2)	0,45	0,2968	28	52,33%
Total	1			1

Fuente: (INCROPERA, 1999)

El calor específico a presión constante se calcula con la siguiente ecuación:

$$c_p = \sum c_{p_i} (x_i) \quad (\text{Ec. 14})$$

Dónde:

$c_p$  = Calor específico a presión constante de la mezcla, en  $\frac{KJ}{kg K}$ .

$c_{p_i}$  = Calor específico a presión constante del constituyente i, en  $\frac{KJ}{kg K}$ .

$c_p = 1,234259801 \frac{KJ}{kg K}$ .

La constante particular del gas R se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \sum R_i (x_i) \quad (1)$$

Dónde:

R = Constante particular de la mezcla, en  $\frac{KJ}{kg K}$ .

$R_i$  = Constante particular del constituyente i, en  $\frac{KJ}{kg K}$ .

$$R = 0,344595349 \text{ KJ}/\text{kg K}$$

Densidad de los gases, se toma una temperatura promedio de 100°C

$$\rho_g = \frac{p_a}{RT_g} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\rho_g = \frac{72300,4 \text{ Pa}}{344,595 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{K}} * 373 \text{ } ^\circ\text{K}}$$

$$\rho_g = 0,562941371 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo del flujo másico de gases:

Caudal de los gases 10 l/s o 0,01 m<sup>3</sup>/s

$$\rho_g = \frac{m_a}{V_g} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\dot{m}_g = \rho_g \dot{V}_g$$

$$\dot{m}_g = \left(0,562941371 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0,01 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

$$\dot{m}_g = 0,005629 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El calor sensible de los gases será entonces:

$$Q_g = \dot{m}_g (c_{p_g}) (\Delta T_g)$$

$$Q_g = 0,005629 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(1,234259801 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}\right) (65 \text{ K})$$

$$Q_g = 0,4516 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}$$

Como el calor sensible de los gases debe ser igual al calor sensible del aire se tiene:

$$Q_g = Q_a = \dot{m}_a (c_{p_a}) (\Delta T_a) \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\Delta T_a = \frac{Q_g}{\dot{m}_a (c_{p_a})}$$

$$\Delta T_a = \frac{0,4516 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}}{0,006199 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(1007 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right)}$$

$$\Delta T_a = 73,72 \text{ K}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_a - \Delta T_g}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_g}\right)}$$

$$LMTD = \frac{73,72 \text{ K} - 65 \text{ K}}{\ln\left(\frac{73,72 \text{ K}}{65 \text{ K}}\right)}$$

$$LMTD = 68,59 \text{ K}$$

El coeficiente global de transferencia de calor estimado es  $U=20 \frac{W}{m^2 K}$ , tomado como referencia de intercambiadores de calor con aletas.

El área de transferencia de calor estimada es de

$$Q_g = Q_a = U (A_t) LMTD \quad (\text{Ec. 18})$$

$$A_t = \frac{Q_a}{U LMTD}$$

$$A_t = \frac{0,4516 \text{ KJ/kg K}}{\left(20 \frac{W}{m^2 K}\right) 68,59 \text{ K}}$$

$$A_t = 0,3922 \text{ m}^2$$

Se selecciona por facilidad de mantenimiento tubería de cobre de 1/2'

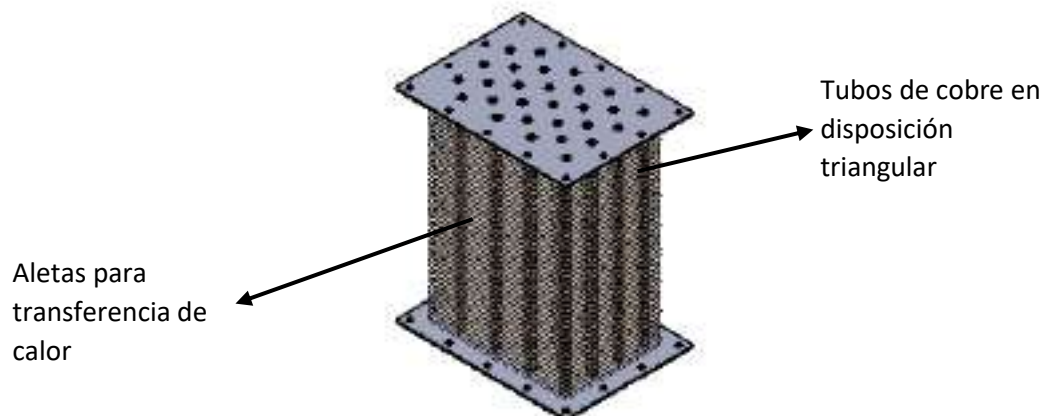
La longitud de tubería será:

$$A_t = \phi_{\text{tub}} (\pi) (L) \quad (\text{Ec. 19})$$

$$L = \frac{A_t}{\phi_{\text{tub}} (\pi)}$$

$$L = \frac{0,3922 \text{ m}^2}{0,0127 \text{ m}^2 (\pi)} = 9,83 \text{ m}$$

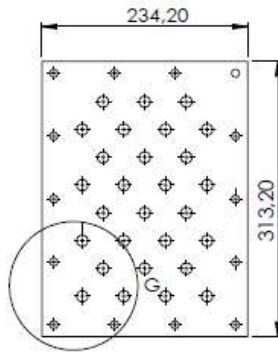
Como la tubería de cobre se comercializa en pedazos de 1,5 m se toma la decisión de hacer con 25 tubos de cobre de una longitud de 0,37 m dando una longitud total de 9,25 m. Hay que recordar que el área debida a las aletas incrementara la transferencia de calor.



**Figura 87.** Intercambiador de calor.  
Fuente: Propia

Dimensionamiento del Intercambiador de calor. Tomando en cuenta la distribución triangular se procede a calcular las dimensiones de la tubería y su separación para un óptimo trabajo.

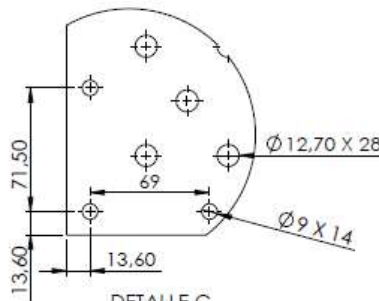
Quedando de la siguiente manera:



VISTA SUPERIOR  
ESCALA 1 : 5

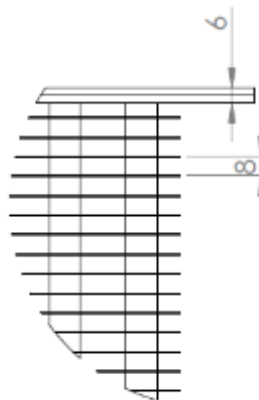
**Figura 9.** Dimensiones de la tubería de cobre del intercambiador  
Fuente: Propia

Para las aletas se construyó con placas de aluminio de 1mm de espesor con una separación de 5 mm quedando una distribución como se muestra en las siguientes figuras:



DETALLE G  
ESCALA 2 : 5

**Figura 10.** Distribución de la tubería de cobre del intercambiador  
Fuente: Propia



**Figura 118.** Distribución de las aletas  
Fuente: Propia

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

La primera fase experimental se encarga de la observación del funcionamiento del gasificador, para lo cual se programan varias puestas en marcha del equipo con la finalidad de afinar datos preliminares para el diseño del sistema de obtención de los gases, valores que ya fueron indicados en la etapa de diseño, como el caudal de ingreso de aire, salida de gases, temperaturas de los fluidos gaseosos.

#### Puesta en marcha del gasificador

A continuación se describe la manera como se ha llevado a cabo el arranque del equipo de gasificación hasta la estabilización del mismo obteniendo de manera continua gas pobre.

Se inicia encendiendo un pequeña braza el en la parte más baja del gasificador, es una zona que se ubica justo antes del lugar donde se producirá la reducción.



**Figura 12.** Encendido del gasificador.  
Fuente: Propia

Se instalan los equipos de medición de caudal así como la fuente de flujo de aire que s el ventilador, la línea de entrega de aire nunca debe estar cerrada, desde el arranque hasta la parada del equipo, debido a que al ser el material de PVC, el mismo flujo interior de aire refrigera la tubería evitando que esta, debido al calor, se deforme.



**Figura 13.** Instalación del medidor de caudal 1 PVC.  
Fuente: Propia



Caudalímetro de  
placa orificio

**Figura 14.** Instalación del medidor de caudal 2 acero.  
Fuente: Propia

Se comprueba el funcionamiento de los mismos in situ y su hermeticidad, así como también es necesario verificar la fuente de alimentación para el ventilador, que es el único elemento que consumirá energía eléctrica.

Posterior a esto, se agrega paulatinamente una cantidad considerable de biomasa, aproximadamente 25kg. Esto servirá para que el equipo se caliente completamente. Por experiencia se sabe que un buen calentamiento del equipo garantizara una estabilización adecuada en corto tiempo, este proceso dura cerca de 35min.



**Figura 15.** Calentamiento del gasificador  
Fuente: Propia

Una vez alcanzado el tiempo indicado, se agrega una cantidad aún mayor de biomasa, según el tiempo que se desee obtener gas pobre, se recuerda que el dato teórico del gasificador es un procesamiento de 40kg/h. En las pruebas realizadas se ha comprobado que en 2 horas de funcionamiento el gasificador procesa 60 kg de biomasa. Para ello es necesario cuantificar el peso de cada carga agregada al equipo.



Biomasa pesada

**Figura 16.** Registro de peso de biomasa a ser procesada.  
Fuente: Propia

Se cierra la parte superior y lógicamente las compuertas inferiores; se deja funcionar otros 15-20 min para poder realizar las pruebas de encendido del gas producido.

Luego de terminar el arranque se comprueba que el gas producido tenga características combustibles.



Gas pobre  
combustionando a la  
salida del gasificador

**Figura 179.** Combustión del gas pobre.  
Fuente: Propia

Desde la primera encendida del gas producido, hasta cuando se tiende desprendimiento de la llama en el mechero se contabilizaron las 2 horas indicadas anteriormente, la carga total de biomasa fue de 60 kg.

Durante las pruebas se registran los valores de temperatura de las diferentes zonas del equipo así como los flujos volumétricos de aire y gas que se tiene.



**Figura 1810.** Combustión antes de finalizar las pruebas.  
Fuente: Propia

#### **4. CONCLUSIONES**

La biomasa por sí misma es una fuente de energía. La manera más simple de aprovechamiento es la combustión directa, pero la misma es un proceso de conversión de energía de muy bajo rendimiento. La gasificación ayuda a que el potencial energético que presenta un cierto tipo de biomasa sea aprovechado de mejor manera y en equipos más sofisticados como combustible de motores por ejemplo. Esto se debe a que su producto, gas pobre es un combustible más limpio y manejable.

La gasificación en un sistema de flujo descendente y paralelo, es un proceso de aprovechamiento de la energía a partir de biomasa, de bajo contenido de humedad y preferentemente de origen forestal, en el cual se obtiene gas pobre de condiciones comparativamente buenas, bajo contenido de alquitrán y cenizas. Su tecnología no es nueva ni muy compleja, pero se debe tener muy en cuenta la materia a procesarse para su dimensionamiento y adecuado funcionamiento.

Una adecuada calidad de gas producido se consigue atendiendo diversos parámetros, como son su pureza (bajo contenido de cenizas y alquitrán), densidad y poder calorífico; Cuanta mejor sea la calidad del gas mejores valores se tendrán de los parámetros descritos. La pureza se consigue con medios de filtración básicamente con ciclones, que es el elemento más básico de recolección de cenizas, y filtros propiamente dichos. Adicionalmente el contenido de alquitrán depende del tipo de biomasa como del diseño del gasificador. La densidad adecuada se consigue con enfriadores en el gas producido, ya que a menor temperatura se conseguiría un gas más denso que tendría mejores prestaciones en un motor de combustión. Finalmente el poder calorífico depende del tipo de biomasa a tratarse, se considera que los materiales forestales son los que proveen de un gas pobre con mejores valores de poder calorífico.

Considerando los 4 parámetros para la calidad del gas pobre, contenido de cenizas, contenido de alquitrán, densidad y poder calorífico, los tres primeros se los puede controlar con adecuaciones al sistema del gasificador ya que incurren en el diseño de equipos; el cuarto parámetro depende del tipo de biomasa que se disponga. Por tanto en temas de acondicionamiento de gasificadores lo que se trata de realizar es una mejora sustancial de la calidad del gas.

Los elementos de filtración o depuradores de los gasificadores, cumplen la función de retener la mayor cantidad de material suspendido en el flujo gaseoso, es decir cenizas. Un gas pobre más limpio puede operar en dispositivos de mayor complejidad como motores de combustión. Las cenizas con tamaños superiores a 50  $\mu\text{m}$  al funcionar en motores, incurrirán en daños en la cámara de combustión, por la diferencia del tiempo de quemado, y en la inyección, por provocar taponamientos.

Los factores de diseño de los filtros son la velocidad de filtración del gas y la caída de presión que genera el conjunto de filtrado. El primer factor, la velocidad, debe ser de un valor bajo de esta manera no podrá el fluido por sí mismo arrastrar al material particulado y al presentarse un agente



que obstaculice el paso, fácilmente los sólidos se quedarán atrapados en este. La caída de presión se torna en un factor importante por dos razones, una por el funcionamiento del filtro y la segunda por el gasto energético que se necesita para vencer la misma. En cuanto al funcionamiento del filtro la caída de presión indica el parámetro a través del cual se observe que el mismo trabaja adecuadamente, un valor alto de caída de presión indicara un filtro sucio y por tanto la necesidad de limpieza del agente filtrante o recambio. Desde el punto de vista energético, un valor muy alto de caída de presión requerirá un ventilador de mayor potencia para que se produzca el flujo del gas, en nuestro caso particular el ventilador debe ser de la menor potencia posible, ya que se desea que en el balance energético global, la energía que ingresa (todo el aporte energético que demanda el equipo) debe ser la más baja posible, en definitiva mientras menos equipos que consuman energía trabajen en el gasificador es mucho mejor, y de ser necesario estos equipos deben ser de la menor potencia admisible.

En los sistemas de filtración de tela no se desea que el gas condense alquitranes debido a que la presencia de este condensado alterara el funcionamiento y vida útil del material filtrante, por tanto se hace necesario el aislamiento térmico del equipo de filtración.

En los filtros de tela los espacios interfibras, pueden ser superiores al tamaño de las partículas que se desean retener, esto debido a que el mecanismo de limpieza se basa a la formación de un "pastel", capa de material particulado sobre la tela, el cual ayudará a la retención de las mismas partículas.

Los depuradores húmedos no son deseables en los gasificadores ya que provocarían condensado de alquitrán al mismo tiempo de la captura de cenizas y por lo tanto se llegaría a tener agua contaminada, cuyo procesamiento generaría más complicaciones que ventajas.

La medición de caudal de fluidos gaseosos tiene una particular importancia en el esquema global del aprovechamiento de la energía. El primer medidor de flujo se instala para cuantificar el caudal de ingreso de aire, un adecuado control del agente gasificante significa niveles de eficiencia altos del gasificador, debido a que el equipo necesita del 20-40% del aire requerido para una combustión completa de la biomasa, es decir se debe controlar la deficiencia de aire en el proceso. El segundo medidor mide el caudal de gas pobre producido, este valor es mayor a la lectura del medidor número 1, debido a que a más del aire que ingresa a la salida se tiene propiamente los gases desprendidos de la degradación térmica de la biomasa, es decir el combustible que se va a aprovechar; el conocer el flujo volumétrico y másico de este gas producido dará a notar claramente el potencial de generación del equipo de gasificación, es decir un valor real de la energía que se dispone, ya sea para fines de combustión directa o motores de combustión.

La elaboración de placas orificio a través de normativa, es un proceso sencillo de bajo costo y con resultados de mediciones de buena confiabilidad.

Con el enfriamiento del gas pobre se consigue dos ventajas, la primera, desde el punto de vista de la calidad del gas, es el aumento de la densidad. La segunda es que el calor que se retira de los gases se los intercambia con el aire de ingreso al gasificador, de esta manera estamos introduciendo aire más caliente al proceso de pirolisis con el objetivo de mejorar la eficiencia del equipo.

De lo descrito anteriormente el sistema de enfriamiento del gas pobre realmente es un intercambiador de calor gas-aire. La energía que pierde el gas es reingresada al proceso a través del calor que le cede al aire. Al elegir un diseño aletado se mayor el área de intercambio de calor y se consigue un dispositivo de buen rendimiento en un tamaño muy compacto.

La construcción de los equipos para su implementación, es una etapa que demanda planificación para mejorar los tiempos totales. Es necesario contar con toda la información preliminar para cada equipo de tal manera que tiempo requerido para su construcción sea el más corto posible.

Para el montaje de las mangas de los filtros, se opta por un conjunto roscado, de esta manera se garantiza la hermeticidad del equipo y la garantía de que todo el gas a filtrarse pasara por el material filtrante.

La misma norma ISO 5167, indica que al construirse un caudalímetro de placa orificio, este debe estar sujeto a revisión para comprobar que las lecturas que proporcione el mismo sea adecuadas, en la etapa experimental se comprueba que las ecuaciones obtenidas a través del diseño de las placas orificio cumplen adecuadamente las mediciones de caudal, dentro de un cierto rango de error -2,4% para el medidor 1 y -1,7 para el medidor 2.

En las pruebas de funcionamiento, conforme pasa el tiempo de gasificación, al no contar con un sistema de alimentación continuo de biomasa, el gas producido en caudal es variable por tanto para mantener la llama de prueba encendida se requiere disminuir el caudal del ingreso de aire, con el fin de mantener la deficiencia del agente gasificante, esta particularidad se nota cuando la llama presenta desprendimiento.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BARBOSA SALDAÑA , J., JIMENEZ BERNAL , J., & GUITIERRES TORRES , C. (2006). PARAMETROS QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DEL CICLON. *Estudio de los parámetros que afectan la eficiencia de separación de los separadores tipo ciclón*, X(2 pp.59-63). MEXICO.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical Design*. Burlington: Academic Press, Elsevier.
- BENITEZ. (15 de Noviembre de 2013). *FLUID DYNAMICS GROUP*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2013, de <http://158.110.32.35/>: <http://158.110.32.35/CLASS/IMP-CHIM/Benitez-cap8.PDF>
- BRAVO ALMEIDA, C. D., & VAZQUEZ FARFAN, S. A. (5 de Noviembre de 2013). *Universidad Politecnica Salesiana*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2013, de <http://www.dspace.ups.edu.ec/>: <http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/821/4/CAPITULO%202.pdf>
- Canet Juric, L. (s.f.). *Lineamientos generales para escribir un artículo científico*. Recuperado el 22 de 02 de 2013, de <http://es.scribd.com/doc/62574419/Lineamientos-Articulo-Cientifico>
- CASAL, J., & MARTINEZ, B. (1989). *Calculo y Diseño de ciclones*. MADRID.
- Castro, S. (2015). *INSTALACION Y ARRANQUE DE UN PROTOTIPO DE GASIFICACION*. Mexico D.F.
- Collazo Sanmartín , M. (14 de Noviembre de 2015). *Biogás*. Obtenido de [http://www.altercexa.eu/images/archivos/Areas%20Tematicas/Biogas/Biogas\\_-\\_ES\\_-\\_Biogas.pdf](http://www.altercexa.eu/images/archivos/Areas%20Tematicas/Biogas/Biogas_-_ES_-_Biogas.pdf)
- DUDA H., W. (2007). *Manual Tecnológico del Cemento 3*. Espana: Spain Parninfo.
- ECHEVERRI , C. (20 de Diciembre de 2013). *Ingeniero Ambiental* . Recuperado el 20 de Diciembre de 2013, de [www.ingenieroambiental.com](http://www.ingenieroambiental.com): 2013
- Echeverri Londoño, C. A. (2008). Diseño de filtros de talegas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12), 18. Obtenido de <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/199>
- ESTRELLA, J., & FONSECA, B. (2009). *Repotenciación, construcción, montaje y pruebas de una planta de balanceado de la comunidad Valle del Anzu provincia de Pastaza TESIS*. Riobamba: Facultad de Mecánica.
- FAO. (2010). *DEPOSITO DE DOCUMENTOS DE LA FAO*. Recuperado el 02 de 2015, de <http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s00.htm#Contents>
- HOLMAN., J. (1999). *Transferencia de Calor*. México: COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL.
- INCROPERA, F. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Prentice Hall.
- INSTRUMENTACIONYCONTROL. (2014). *INTRUMENTACION Y CONTROL, MEDIDORES DE FLUJO*. Recuperado el 21 de 02 de 2016, de <http://planespecifico.blogspot.com/2011/07/medidores-de-flujo.html>
- ISO5167. (2003). *NORMA ISO 5167*. Mexico: ISO.
- KREITH, F. (1993). *Principios de Transferencia de Calor*. USA: CENGAGE.
- Londoño, C. A. (2008). *DISEÑO DE FILTROS DE TALEGAS*. Medellin: Universidad de Medellin.
- Martinez Jesus. (16 de 09 de 2014). *tecnologiayenergiaverde.blogspot.com*. Recuperado el 29 de 06 de 2015, de <https://plus.google.com/+Jes%C3%BAsMart%C3%ADnezReig/posts/2XAUJBcE93a>
- MATAIX, C. (1986). *Mecanica de Fluidos y Maquinas Hidraulicas*. Madrid: Castillos S.A.
- MILIARIUM. (2012). *MILIARIUM, Ingenieria Civil y Medio ambiente*. Recuperado el 02 de 02 de 2016, de <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Atmosfera/SeparadorHumedo.htm>
- MORA, E. (s.f.). Tema 5. Mecanismos de Condensación. Precipitación.
- NOA, G. (2015). *INTI*. Recuperado el 02 de 2016, de [www.inti.gob.ar](http://www.inti.gob.ar)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. (1993). *El gas de madera como combustible para motores*. Roma: FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/T0512S/t0512s00.htm#Contents>

- ORTIZ, R. (2001). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas* (Primera ed.). Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill.
- Peñarrieta, J. (s.f.). *Cómo escribir un paper para las JPC y para el CONIICC*. Recuperado el 23 de 04 de 2013, de [http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=como%20escribir%20un%20paper%2Bpe%C3%B1arrieta&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDwQFjAC&url=http%3A%2F%2Feventos.spc.org.pe%2Fjpc2007%2Fword.dot&ei=mgOMUc7RP1bC4APkyoEw&usg=AFQjCNGF0IGid72p\\_8ODthraZmP3YAjdJQ](http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=como%20escribir%20un%20paper%2Bpe%C3%B1arrieta&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDwQFjAC&url=http%3A%2F%2Feventos.spc.org.pe%2Fjpc2007%2Fword.dot&ei=mgOMUc7RP1bC4APkyoEw&usg=AFQjCNGF0IGid72p_8ODthraZmP3YAjdJQ)
- PERALTA CASTILLO, G. P. (2001). *Calculo y diseño fluidodinamico de un filtro de mangas (Tipo pulse jet) para particulas minerales de origen Industrial*. Guayaquil: ESPOL.
- RAMESH, K. S. (2003). *Fundamentals of heat Exchanger design*. United States: WILEY.
- System, H. o. (2010). *Dr. TLUD*. Recuperado el 10 de 05 de 2016, de <http://www.drTLUD.com/?resource=prs98100>
- Tierra, L. F. (2011). Diseño de briquetas de aserrín y cascarilla de arroz para la producción de gas pobre. Riobamba.
- TURNER , J. H. (28 de Noviembre de 2013). *EPA*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2013, de <http://www.epa.gov/>: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/cs6ch1.pdf>
- Zainal, Z., Rifau, A., Quadir, G., & Seetharamu, K. (2002). Experimental investigation of a downdraft biomass gasifer. *Elsevier*, 7.