



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA OBTENCIÓN DEL
GAS POBRE EN EL GASIFICADOR DOWNDRAFT DE
LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA”**

VILLACÍS MONTOYA DIANA ISABEL

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERA MECÁNICA

**RIOBAMBA – ECUADOR
2016**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2014-08-07

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

VILLACÍS MONTOYA DIANA ISABEL

Titulada:

**“DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA OBTENCIÓN DEL GAS POBRE EN EL
GASIFICADOR DOWNDRAFT DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el título de:

INGENIERA MECÁNICA

Ing. Marco Santillán Gallegos
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Ángel Jácome Domínguez
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Luis Tierra Tingo
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: VILLACÍS MONTOYA DIANA ISABEL

TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA OBTENCIÓN DEL GAS POBRE EN EL GASIFICADOR DOWNDRAFT DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA”

Fecha de Examinación: 2016-02-25

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Viteri Núñez PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Ángel Jácome Domínguez DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Luis Tierra Tingo ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Edwin Viteri Núñez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual e industrial le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Villacís Montoya Diana Isabel

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Yo, Villacís Montoya Diana Isabel, declaro que el presente trabajo de grado es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autora, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Villacís Montoya Diana Isabel
Cedula de Identidad: 060393946-3

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mi madre quien ha cumplido un rol muy importante en mi vida, ha sido el soporte que me ha permitido no derrumbarme ante la adversidad, el ejemplo de perseverancia, sacrificio y entrega hasta ver las metas cumplidas, es gracias a ella todo lo que soy el día de hoy.

Diana Villacís M.

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser el dador de la vida; a mi madre por todo el esfuerzo y dedicación en mi preparación tanto personal como profesional, a mi esposo Jaime que con su paciencia y ánimo supo ayudarme a culminar uno de mis logros, a mi familia por el apoyo y consejo brindado.

A los profesores de Ingeniería Mecánica por los conocimientos impartidos para culminar con éxito una etapa más de mi vida.

Villacís Montoya Diana Isabel

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación.....	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivo general	2
1.3.2	Objetivos específicos:.....	2
2.	MARCO TEÓRICO	
2.1	Gasificación.....	3
2.1.2	Pirolisis.....	3
2.2	Biomasa	4
2.3	Poder calorífico.....	4
2.4	Intercambiadores de calor	4
2.5	Alquitrán	5
2.6	Temperatura de rocío	5
2.7	Medidores de caudal por diferencia de presión.....	5
2.8	Depuración de gases producto de la gasificación	5
2.9	Gasificador Downdraft	5
2.9.1	Tratamiento de gases productos de la gasificación.	10
3.	DISEÑO DEL SISTEMA PARA LA OBTENCIÓN DEL GAS POBRE	
3.1	Definición del problema	18
3.2	Alternativas de solución para el sistema de filtrado	18
3.2.1	Filtros de tela.....	21
3.3	Diseño del sistema de filtrado.....	22
3.3.1	Mecanismo de limpieza.....	22
3.3.2	Velocidad de Filtración	22
3.3.3	Área de tela.....	23
3.3.4	Cálculo de espesor de aislante.....	28
3.4	Alternativas de solución para el sistema de medición de caudal.....	31
3.4.1	Placa orificio.....	31
3.4.2	La tobera de flujo.....	32
3.4.3	El tubo de Venturi	32
3.4.4	La Cuña de Flujo.....	32
3.5	Diseño del sistema de medición de caudal	33
3.5.1	Cálculo de la densidad del fluido en el manómetro	35
3.5.2	Dimensiones recomendadas para la construcción de una placa orificio.....	35
3.5.3	Ubicación de las tomas de presión	37
3.5.4	Calculo para el caudal que pasa por la placa orificio	38
3.6	Alternativas de solución para el sistema de refrigeración de los gases.....	41
3.6.1	Intercambiadores de calor de tubos concéntricos.....	43
3.6.2	Intercambiadores de calor de flujo cruzado	43
3.7	Diseño del sistema de enfriamiento	44
3.7.1	Dimensionamiento del Intercambiador de calor	49
3.7.2	Cálculo teórico coeficiente global de transferencia de calor.....	50
4.	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	
4.1	Diagrama de proceso para construcción de la placa orificio	63
4.1.1	Construcción de las placas orificio.....	63

4.1.2	Bridas de acero	63
4.2	Ensamble del sistema de medición de caudal mediante placa orificio	63
4.3	Actividades de construcción del sistema de enfriamiento	64
4.4	Ensamble del sistema de enfriamiento	65
4.4.1	Ensamble sección intercambiador de calor.....	65
4.4.2	Ensamble del depurador.....	65
4.4.3	Ensamble de la chimenea	65
4.4.4	Ensamble sección intercambiador de calor. - cubierta	66
4.5	Descripción de procesos	66
4.5.1	Construcción del intercambiador de calor	66
4.5.2	Chimenea	66
4.5.3	Depurador	67
4.5.4	Cubierta.....	67
4.6	Actividades previas a la fase de construcción del el sistema de filtrado.....	68
4.7	Descripción de procesos y métodos para el sistema de filtrado	68
4.7.1	Aislamiento de la cámara de filtrado	68
4.7.2	Cilindro exterior	68
4.7.3	Cámara de recolección de gases y cono para depósito de sedimentos	69
4.7.4	Distribución y perforación de la cámara	70
4.7.5	Filtros roscados	70
4.7.6	Entrada y salidas de gases.....	71
4.7.7	Estructura.....	71
5.	FASE EXPERIMENTAL	
5.1	Pruebas de funcionamiento del gasificador	72
5.1.1	Puesta en marcha del gasificador.....	72
5.2	Comprobación del medidor de caudal 1, material PVC.....	79
5.2.1	Experimentación 1, material PVC.....	79
5.2.2	Experimentación 2, material PVC.....	80
5.2.3	Experimentación 3, material PVC.....	81
5.2.4	Experimentación 4, material PVC.....	82
5.2.5	Experimentación 5, material PVC.....	83
5.2.6	Ecuación total, material PVC.....	83
5.3	Comprobación del medidor de caudal 2, material acero.....	85
5.3.1	Experimentación 1, material acero.....	85
5.3.2	Experimentación 2, material acero.....	86
5.3.3	Experimentación 3, material acero.....	87
5.3.4	Experimentación 4, material acero.....	88
5.3.5	Experimentación 5, material acero.....	89
5.3.6	Ecuación total, material acero.....	90
6.	ANÁLISIS DE COSTOS	
6.1	Costos directos.....	92
6.2	Costos indirectos	98
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1	Conclusiones.....	100
7.2	Recomendaciones.....	102

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

Pág.

1	Compuestos del gas de gasificación y sus efectos	10
2	Distribución por tamaños del polvo del gas Pobre	14
3	Velocidades de filtración recomendadas para filtros de fibra de vidrio	22
4	Factor de corrección por área de la tela.....	24
5	Factores de resistencia para telas de tejido plano	26
6	Factores de resistencia de ciertas partículas	27
7	Cantidades comunes de elementos contaminantes del gas pobre.....	27
8	Valores mínimo y máximo de los espesores para placas orificio	36
9	Dimensiones de la placa orificio de PVC y acero.....	36
10	Posiciones de las tomas de presión.....	37
11	Coeficientes de descarga para diferentes diámetros de la placa orificio.	41
12	Composición volumétrica del gas pobre	46
13	Composición volumétrica del gas pobre	47
14	Constantes C y m para el banco de tubos en flujo cruzado.	50
15	Factor de corrección C2 para $NL < 20$ ($Re > 10^3$).	51
16	Código ASME.....	62
17	Altura vs velocidad - experimentación 1, material PVC.....	79
18	Altura vs velocidad - experimentación 2, material PVC.....	80
19	Altura vs velocidad - experimentación 3, material PVC.....	81
20	Altura vs velocidad - experimentación 4, material PVC.....	82
21	Altura vs velocidad - experimentación 5, material PVC.....	83
22	Comparación de los valores de las constantes numéricas, material PVC.....	84
23	Altura vs velocidad - experimentación 1, material acero.	85
24	Altura vs velocidad - experimentación 2, material acero.	86
25	Altura vs velocidad - experimentación 3, material acero.	87
26	Altura vs velocidad - experimentación 4, material acero.	88
27	Altura vs velocidad - experimentación 5, material acero.	89
28	Comparación de los valores de las constantes numéricas, material acero. ...	90
29	Costo de materiales para medidor de caudal por placa orificio de PVC.....	92
30	Costo de materiales para medidor de caudal por placa orificio de acero.	93
31	Costo de materiales extras para medidor de caudal por placa orificio	93
32	Costo de total de materiales para la placa orificio.....	93
33	Costo de envío y transporte para la placa orificio	94
34	Costo de mano de obra para la placa orificio.....	94
35	Costos directos para medidor de caudal por placa orificio	94
36	Costo de materiales para el sistema de enfriamiento.....	94
37	Costo de materiales estructurales para el montaje del sist de enfriamiento ...	94
38	Costo de materiales para el sistema de enfriamiento.....	95
39	Costo de materiales extras para el sistema de enfriamiento.....	95
40	Costo de total materiales para el sistema de enfriamiento.....	95
41	Costo de envío y transporte para el sistema de enfriamiento.....	96
42	Costo de mano de obra para el sistema de enfriamiento	96
43	Costos directos para el sistema de enfriamiento.....	96

44	Costo de materiales para sistema de filtrado	97
45	Costo de materiales extras para el sistema de filtrado.....	97
46	Costo de total de mariales para el sistema de filtrado.....	97
47	Costo de envío y transporte para el sistema de filtrado	98
48	Costo de mano de obra para el sistema de filtrado.....	98
49	Costos directos para el sistema de filtrado	98
50	Costos indirectos	98
51	Costo total del equipo	99

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Gasificador Downdraft	1
2 Tipos de biomasa como fuente de energía	4
3 Productos de gasificación	6
4 Proceso de gasificación	7
5 Gasificador de lecho fijo	8
6 Colectores de baja energía	19
7 Lavadores de media energía.	20
8 Separadores de alta energía.	20
9 Filtros de tela	21
10 Esquema del proceso de filtrado	22
11 Medicion de la velocidad de filtracion.	23
12 Filtro	24
13 Sección transversal de la pared del filtro	30
14 Tipos de placa orificio	31
15 Unión de placa orificio.	32
16 Tubo Venturi	32
17 Cuña de flujo.	33
18 Cotas dimensionales de la placa orificio	35
19 Tomas de presión a D-D/2	37
20 Tomas de presión a 1 pulgada	37
21 Tomas de presión en los bornes	38
22 Esquema de la placa orificio	41
23 Intercambiador de coraza y tubo	42
24 Placa deflectora en el intercambiador de calor coraza y tubo.	42
25 Intercambiador de tubos concéntricos.	42
26 Distribución de tubos en forma cuadrada	43
27 Distribución de tubos en ajuste cuadrado girado.	43
28 Distribución de tubos en ajuste triangular.	44
29 Intercambiador de calor.	49
30 Dimensiones y distribución de la tubería de cobre del intercambiador.	49
31 Distribución de las aletas	50
32 Distribución geométrica de un banco de tubos lisos.	52
33 Diámetro de collar del banco de tubos de aletas continuas.	55
34 Arreglos de bancos con placas corrugadas.	56
35 Arreglo hexagonal de los tubos.	59
36 Esquema de placa orificio	63
37 Bridas de acero	63
38 Ensamble medidor de caudal de PVC – placa orificio	64
39 Ensamble medidor de caudal de acero – placa orificio	64
40 Ensamble sección intercambiador de calor	65
41 Ensamble del depurador	65
42 Ensamble de la chimenea	65
43 Ensamble sección intercambiador de calor. - cubierta	66

44	Sección del intercambiador de calor.....	66
45	Chimenea.....	67
46	Depurador.....	67
47	Depurador.....	67
48	Cámara de filtrado.....	68
49	Cámara de filtrado aislada con cilindro exterior.....	69
50	Cámara de filtrado aislada-ensamblada al cilindro exterior mediante bridas..	69
51	Cilindro exterior de la cámara de recolección de gases.....	69
52	Cámara de recolección de gases y cono para depósito de sedimentos.....	69
53	Cámara de recolección de gases montando al cilindro exterior.....	70
54	Pernos y tuercas de los filtros.....	70
55	Cámara de filtrado con cavidades par localización de filtros.....	70
56	Filtros roscados.....	71
57	Entrada y salida de gases.....	71
58	Encendido del gasificador.....	72
59	Instalación del medidor de caudal 1 PVC.....	73
60	Instalación del medidor de caudal 2 acero.....	73
61	Verificación de funcionamiento de los medidores de caudal.....	73
62	Calentamiento del gasificador.....	74
63	Registro de peso de biomasa a ser procesada.....	74
64	Cierre de puertas en el equipo.....	74
65	Combustión del gas pobre.....	75
66	Combustión antes de finalizar las pruebas.....	75
67	Lectura de presión diferencial en el medidor 1 PVC.....	75
68	Lectura de presión diferencial en el medidor 2.....	76
69	Recomendaciones de instalación para el ventilador.....	76
70	Forma de instalación de la placa orificio para pruebas de medición.....	77
71	Medición de la presión diferencial en el tubo en U.....	78
72	Altura vs velocidad - experimentación 1, material PVC.....	79
73	Altura vs velocidad - experimentación 2, material PVC.....	80
74	Altura vs velocidad - experimentación 3, material PVC.....	81
75	Altura vs velocidad - experimentación 4, material PVC.....	82
76	Altura vs velocidad - experimentación 5, material PVC.....	83
77	Altura vs velocidad - ecuación total, material PVC.....	84
78	Altura vs velocidad - experimentación 1, material acero.....	85
79	Altura vs velocidad - experimentación 2, material acero.....	86
80	Altura vs velocidad - experimentación 3, material acero.....	87
81	Altura vs velocidad - experimentación 4, material acero.....	88
82	Altura vs velocidad - experimentación 5, material acero.....	89
83	Altura vs velocidad - ecuación total, material acero.....	90

SIMBOLOGÍA

z	Altura respecto al nivel de referencia	m
L_1	Ancho de banco de tubos	m
A	Área	m^2
A_{filtrado}	Área de filtrado	m^2
ΔP	Caída de presión	mmH ₂ O
C_p	Calor específico	kJ/kg.K
Q_a	Calor sensible del aire	W
Q	Caudal	m^3/s
C	Coeficiente C para bancos de tubos de flujo cruzado	
$h_{\infty \text{aire}}$	Coeficiente convectivo exterior Aire	W/ $m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
C_d	Coeficiente de descarga del caudalímetro	
β	Coeficiente de expansión	1/C
k	Coeficiente de pérdidas por el accesorio	
U_{rec}	Coeficiente global de transferencia de calor	W/ $m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
m	Coeficiente m para bancos de tubos de flujo cruzado	
x_i	Composición másica del constituyente i	kgi/kg
y_i	Composición volumétrica del constituyente i	kmoli/kmol
C_p	Concentración de partículas en la corriente gaseosa	g/m^3
k	Conductividad térmica	W/ $m \text{ } ^\circ\text{C}$
R	Constante particular de la mezcla	KJ/ kg K
R_i	Constante particular del constituyente i	KJ/ kg K
P	Densidad del fluido que pasa por la tubería	kg/m^3
D	Diámetro de la tubería	m
ΔT_a	Diferencia de temperatura del aire de enfriamiento	K
Δh	Diferencial de alturas	m
ΔP	Diferencial de presiones	Pa
S_T	Distancia vertical entre los tubos en la primera hilera	m
E	Espesor de la lámina de la placa orificio	m
T	Espesor de las aletas	m
e	Espesor del borde de la placa orificio	m
K_2	Factor de resistencia debido a la capa de partículas	mmH ₂ O ms/g
K_1	Factor de resistencia del tejido	mmH ₂ O s/m
\dot{m}_a	Flujo másico de aire de enfriamiento	kg/s
\dot{m}_g	Flujo másico del gas pobre	kg/s
M_i	Masa molar del constituyente i	kg/kmol
N_f	Número de aletas sobre unidad de longitud	
Nu_D	Número de Nusselt	
Pr	Número de Prandtl	
Pr_s	Número de Prandtl evaluado a temperatura de pared	

Re	Número de Reynolds	
N_t	Número de tubos	
P	Presión	Pa
L_1	Relación entre la distancia la placa orificio - tubería	M
Q_T	Representa el caudal teórico	m^3/s
T_s	Temperatura de superficie	$^{\circ}C$
σ	Tiempo de acumulación de las partículas	S
H_r	Valor de las pérdidas de energía	Mca
V	Velocidad del fluido que pasa por el accesorio	m/s
γ	Viscosidad cinemática	m^2/s
μ_a	Viscosidad dinámica del aire	kg/ms

LISTA DE ABREVIACIONES

ART	Normas para Compañías Aseguradoras
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
AISI	Instituto Americano del hierro y el acero
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
API	Interfaz de Programación de Aplicaciones
LMTD	Diferencia de temperatura media logarítmica

LISTA DE ANEXOS

- A** Formación de escoria de residuos agrícolas en un gasificador de tiro invertido
- B** Propiedades de los principales materiales de tela.
- C** Valores calculados para la estimación del error en las lecturas del caudal 1
- D** Valores calculados para la estimación del error en las lecturas del caudal 2
- E** Propiedades del aire
- F** Propiedades geométricas de banco de tubos.

RESUMEN

El presente trabajo de tesis, presenta el diseño e implementación de un sistema de captación de gas pobre en un gasificador de tipo Downdraft, con el cual se pretende mejorar la calidad del gas producido en términos de reducción de material particulado, control de los caudales de flujo gaseoso y densidad.

Previo al dimensionamiento de los equipos se realizaron pruebas de funcionamiento del equipo de gasificación, para corroborar los valores teóricos de capacidad de procesamiento, caudales y temperaturas. El gasificador ha sido diseñado para alimentarse de 40kg/h de biomasa, las pruebas se enmarcaron en el funcionamiento de la planta a una capacidad del 75% de la potencia instalada.

A través de los valores de diseño establecidos se diseña e implementa los diversos sistemas para mejoramiento de calidad del biogas. 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 μm . Para tener un control del flujo del agente gasificante y cuantificar la cantidad de gas producido se diseña, a través de la norma ISO 5167, dos caudalímetros por 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.

ABSTRACT

This thesis presents the design and implementation of a collection system lean gas in a gasifier Downdraft type, with which it aims to improve the quality of the gas produced in terms of reducing particulate matter control flows gas flow and density.

Prior to sizing equipment function tests they were performed gasification equipment to corroborate the theoretical values of processing capacity, flows and temperatures. The gasifier is designed to feed biomass 40kg, tests were part of the plant operation training to 75% of the installed power.

Through established design values it is designed and implemented various systems to improve gas quality. Considering the purity of the gas, an outer fabric filter capable of retaining particles of a size less than 50 μ m is set. For a flow control and gasifying agent quantify the amount of gas produced by ISO 5167, it is designed cuadalímetros two differential pressure orifice plate type. And finally, on the subject of density value, it is proposed that the poor gas is cooled in a heat exchanger, and the heated fluid is air which is introduced as a gasifying agent. In performance test the proper sizing of the above systems is confirmed.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

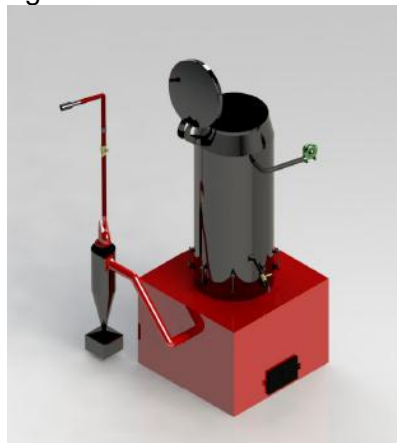
1.1 Antecedentes

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.

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. Los primeros gasificadores de carbón fueron construidos en Alemania por Bischof en 1839 y por Siemens en 1861. En Francia y en Suiza se utilizaba gas de madera como combustible, el cual era obtenido por gasificación a partir del carbón vegetal.

Actualmente existe el gasificador Downdraft en la escuela de ingeniería mecánica de la facultad de mecánica, a lo largo de los años se han dado diversas modificaciones con la finalidad de repotenciarlo; su funcionamiento radica en la utilización de biomasa(cascarilla de arroz o briquetas de madera) para obtener gas combustible que puede ser utilizado en diferentes procesos, hoy en día el gas producto de la combustión no es utilizado, simplemente es liberado al ambiente, entonces se ve la necesidad de implementar un sistema para la obtención del mismo.

Figura 1. Gasificador Downdraft



FUENTE: (Tierra, 2011)

1.2 Justificación

La presente tesis provee diseñar e implementar un sistema para la obtención de gas pobre en el gasificador Downdraft, para lo cual se utilizar 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.

El desarrollo de la presente tesis permitirá una reducción de costos en la utilización del gas combustible para producir electricidad y/o energía térmica o como gas de síntesis transformándose en productos de mayor valor, ya sea en motores de combustión interna, calefones, entre otros.

Uno de los principales problemas en el gasificador Downdraft de la Escuela de Ingeniería Mecánica es el desconocimiento de parámetros de funcionamiento, para lo cual se plantea una medición de caudal de gases tanto a la entrada(aire) como a la salida (gas pobre).

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general:* Diseñar un sistema para la obtención del gas pobre en el gasificador Downdraft de la Escuela de Ingeniería Mecánica

1.3.2 *Objetivos específicos:*

- Analizar el marco teórico sobre la obtención del gas pobre.
- Diseñar el sistema de filtración del gas pobre
- Diseñar el sistema de medición de flujo.
- Diseñar el sistema de refrigeración del gas pobre
- Implementar el sistema para la obtención del gas pobre.
- Realizar pruebas de funcionamiento del gasificador.
- Analizar costos del proyecto.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Gasificación

Es un proceso termo-químico en el que la biomasa, normalmente de origen leñoso, es transformada en un gas combustible. Se considera que el gas producido tiene un bajo o medio poder calorífico (1.000 - 3.000 kCal/ N.m³) si es comparado con el gas natural (9.000 kCal/ N.m³), el butano (28.000 kCal/N.m³) o el hidrógeno (2.500 kCal/N.m³). (WIKIPEDIA, 2016)

2.1.1 Gas de Síntesis. Gas sintético o gas productor, pueden producirse a partir de una variedad de diferentes materiales que contienen carbono. Estos pueden incluir biomasa (gas de madera), plástico, carbón, residuos municipales o materiales similares. Los motores de gas que utilizan gas de síntesis como combustible se pueden configurar en un calor y potencia combinada de configuración con el fin de maximizar la eficiencia del sistema. El gas de síntesis es creado por la gasificación o pirólisis de materiales carbonosos. La gasificación implica someter estos materiales a altas temperaturas, en presencia controlada de oxígeno sólo con combustión limitada para proporcionar energía térmica para mantener la reacción. Cuando se utiliza aire, en este caso la entrada se limita entre un 20 y un 40% del teóricamente necesario para una combustión completa, y la temperatura de operación oscila entre 700 y 1.400°C según el tipo de tecnología utilizada y las condiciones del proceso. (ENERGYCLARK, 2015)

2.1.2 Pirolisis. Es la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante que contenga oxígeno (aire, agua, dióxido de carbono) a altas temperaturas (200°C - 500°C). En este proceso se destruyen las ausencias orgánicas mediante el calentamiento en un ambiente libre de oxígeno, dando como resultado de esta reacción, fracciones gaseosas, líquidas y sólidas. La pirólisis se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas además de procesos de transferencia de materia y calor, se puede considerar que la pirólisis comienza en torno a los 200°C, llegando a ser prácticamente completa en torno a los 500°C. Aunque la pirólisis está en función del tiempo de residencia del residuo del reactor. (Castro, 2015)

2.2 Biomasa

Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. En términos energéticos formales las plantas transforman la energía radiante del Sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esa energía química queda almacenada en forma de materia orgánica; la energía química de la biomasa puede recuperarse quemándola directamente o transformándola en combustible. La biomasa podría proporcionar energías sustitutivas a los combustibles fósiles, gracias a agrocombustibles líquidos (como el biodiésel o el bioetanol), gaseosos (gas metano) o sólidos (leña). (*wikipedia, 2001*)

Figura 2. Tipos de biomasa como fuente de energía



Fuente: (NOA, 2015)

2.3 Poder calorífico

Es la cantidad de calor que entrega un kilogramo o un metro cúbico de combustible al oxidarse en forma completa, puede ser superior o inferior; el superior se refiere cuando el vapor de agua contenido en los gases de la combustión se condensa y en el inferior no. (**Tingo, 2011**)

2.4 Intercambiadores de calor

Es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos medios, que estén separados por una barrera o que se encuentren en contacto, son esenciales en procesos de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesos químicos. (**Fundación Wikipedia, Inc, 2015**)

2.5 Alquitrán

Es una sustancia densa y pegajosa, de color oscuro y olor fuerte, se obtiene de la destilación del petróleo, madera, carbón vegetal o materia orgánica. Tiene distintas aplicaciones industriales. **(Wikipedia, 2015)**

2.6 Temperatura de rocío

Es la temperatura a la cual empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire, produciendo rocío, neblina, o escarcha cuando la temperatura sea lo suficiente baja. **(Wikipedia, 2015)**

2.7 Medidores de caudal por diferencia de presión

Dentro de los dispositivos para la medición de flujo volumétrico se encuentran básicamente de dos tipos. Directos, cuya medición la realizan por desplazamiento de elementos mecánicos; Indirectos, cuya medición la realizan por la medición de presiones diferenciales, esta clase de medidores presenta una reducción de la sección de paso del fluido, dando lugar a que el fluido aumente su velocidad, lo que origina un aumento de su energía cinética y, por consiguiente, su presión tiende a disminuir en el medidor. **(INSTRUMENTACIONYCONTROL, 2014)**

2.8 Depuración de gases producto de la gasificación

En el proceso de la gasificación se presentan dos elementos residuales que son indeseables, el alquitrán y las cenizas, la presencia de estos minora la calidad del gas pobre que se podrá utilizar para fines energéticos.

Los sistemas de depuración de gases deberán ser capaces de retener estos dos elementos citados anteriormente por diversos medios mecánicos o químicos, con el objetivo de mejorar el estado final del gas producido para su utilización. **(FAO, 2010)**

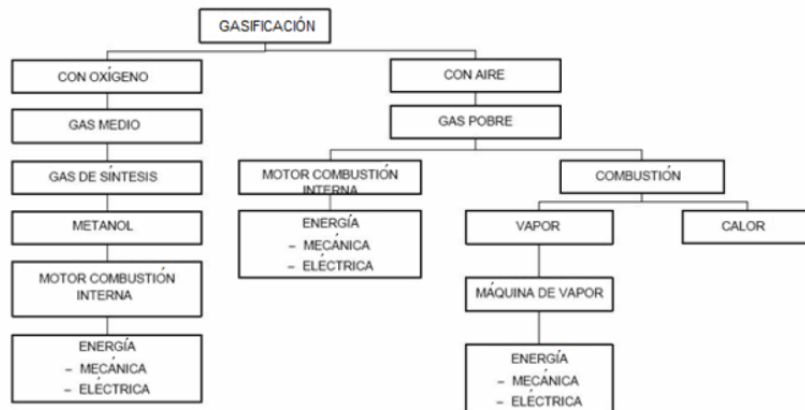
2.9 Gasificador Downdraft

Las tecnologías de gasificación de biomasa, tienen sus antecedentes directos en los gasificadores de carbón, que tuvieron un desarrollo continuo desde la primera mitad del siglo XIX, en el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos

más ligeros. El agente gasificante es un gas, o mezcla de ellos que aporta calor para iniciar las reacciones y oxígeno. El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. El resto de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del gas de síntesis, necesario para su secado y filtración, y en el lavado.

La Figura 3 muestra los subproductos que se pueden obtener a partir del agente gasificante empleado, es importante destacar que con ambos elementos se puede llegar al mismo resultado, sin embargo, al utilizar oxígeno el proceso se vuelve más eficiente pero costoso por lo tanto es recomendable utilizar métodos específicos para aprovechar dicha ventaja.

Figura 3. Productos de gasificación



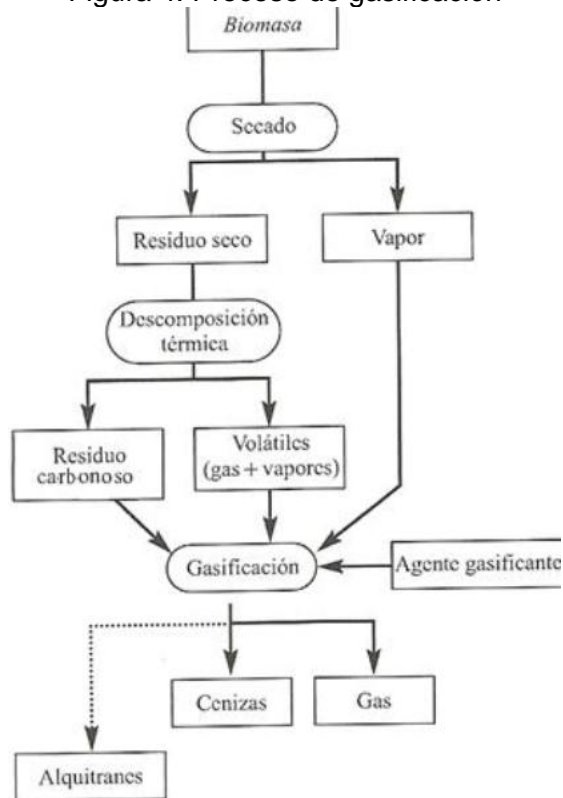
Fuente: (SENER, 2003)

En el proceso de gasificación de biomasa tienen lugar varias reacciones cuyo orden e importancia depende de las condiciones de operación, del combustible y de los elementos del agente gasificante utilizado. Las mismas que se presentan a continuación en la Figura 4.

Como se mencionó anteriormente se tiene como parte de los residuos de la gasificación alquitranes y Cenizas, se ha encontrado una solución al problema del arrastre de alquitrán con la corriente de gas, diseñando gasificadores de tiro invertido o corriente descendente (Downdraft), en los cuales el aire de primera gasificación se introduce en la zona de oxidación del gasificador o por encima de ésta.

El gas pobre sale por el fondo del aparato de modo que el combustible y el gas se mueven en la misma dirección.

Figura 4. Proceso de gasificación



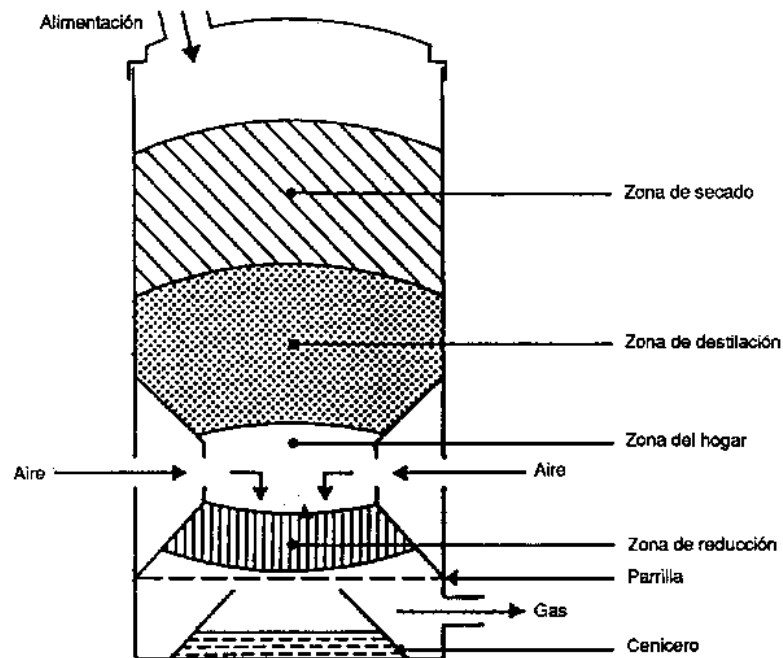
Fuente: (SENER, 2003)

Este tipo de Gasificador es un compartimento cerrado herméticamente constituido por un cilindro cónico metálico, y una tapa metálica en la parte superior, en la base mampostería de material refractario reforzado con chapa metálica; en su interior ocurrirán los procesos para generar los gases combustibles (oxidación y reducción)

El gasificador Downdraft es de lecho fijo, es decir que la materia prima descansa sobre una rejilla en el fondo del reactor, la misma que se introduce desde la parte superior y llega por gravedad al lecho en la misma velocidad que lo consume, el tiempo de permanencia es largo y la velocidad del gas es baja; es de flujo descendente, ya que el gas pobre abandona el reactor por el fondo, mediante un blower se insufla aire a través de una tubería ubicada en la parte central del cuerpo y llega hasta la zona de combustión para la salida del gas producido, las cenizas por su bajo tamaño y cohesión quedan como sólido inerte en la parte inferior de la parrilla, su principal ventaja es la baja producción de alquitranes. (Martinez Jesus, 2014)

En el gasificador de tiro invertido, que se presenta esquemáticamente en la Figura 5 el combustible se introduce por la parte superior, el aire normalmente se introduce en un nivel intermedio, aunque también se lo puede hacer desde la parte superior y conduciéndolo hacia la zona de combustión, y el gas se extrae por el fondo.

Figura 5. Gasificador de lecho fijo



Fuente: (FAO, 2010)

En el gasificador es posible distinguir cuatro zonas independientes, cada una de ellas caracterizadas por un paso importante en el proceso de transformación del combustible en gas combustible. A continuación se examinan los procesos de las cuatro zonas:

Sección del depósito (zona de secado): El combustible sólido se introduce en el gasificador por la parte superior. No es necesario utilizar un equipo complicado de alimentación de combustible porque en este lugar se puede tolerar una pequeña cantidad de escape de aire. Como resultado de la transferencia de calor procedente de las partes inferiores del gasificador se produce un secado de la madera, o combustible de biomasa, en la sección del depósito.

El vapor de agua circulará hacia abajo y se añadirá al vapor de agua formado en la zona de oxidación. Parte de ella puede reducirse a hidrógeno y el resto acabará como humedad en el gas.

Zona de pirólisis: A temperaturas superiores a los 250°C, el combustible de biomasa comienza a pirolizarse. Los detalles de estas reacciones de pirólisis no son bien conocidos, pero se puede suponer que las grandes moléculas se descomponen en moléculas de tamaño medio y carbono durante el calentamiento del material de alimentación. Los productos de la pirólisis caen hacia abajo, a las zonas más calientes

del gasificador. Parte de ellos se queman en la zona de oxidación y el resto se descompone en moléculas aún menores de hidrógeno, metano, monóxido de carbono, etano, etileno, etc. si permanecen suficiente tiempo en la zona caliente.

Si el tiempo de estancia en la zona caliente es demasiado corto o la temperatura demasiado baja, las moléculas de tamaño medio pueden escapar y condensarse en forma de alquitranes y aceites, en las partes de menor temperatura del sistema.

Zona de oxidación: Una zona de combustión (oxidación) se forma en el nivel en que se introduce el oxígeno (aire). Las reacciones con el oxígeno son muy exotérmicas, traduciéndose en una rápida elevación de la temperatura hasta 1 200 a 1 500°C.

Como se mencionó anteriormente, una función importante de la zona de oxidación, aparte de la generación de calor, es transformar y oxidar prácticamente todos los productos condensables procedentes de la zona de pirólisis.

Generalmente se emplean dos métodos para obtener una distribución uniforme de la temperatura:

- Reducción de la superficie de la sección transversal a una cierta altura del reactor (concepto "garganta").
- Distribución de las toberas de entrada de aire a lo largo de la circunferencia de la superficie transversal reducida, o utilización alternativa de una entrada central de aire, con un dispositivo apropiado de pulverización.

Zona de reducción: Los productos de reacción de la zona de oxidación (gases calientes y carbón vegetal incandescente) se desplazan en sentido descendente hacia la zona de reducción. En esta zona, el calor sensible de los gases y el carbón vegetal se transforma al máximo posible en energía química del gas pobre.

El producto final de las reacciones químicas que tienen lugar en la zona de reducción es un gas combustible que puede emplearse como combustible en quemadores y después de quitarle el polvo y refrigerarlo, es apropiado para motores de combustión interna.

Las cenizas que resultan de la gasificación de la biomasa deben extraerse de vez en

cuando del gasificador. Normalmente se considera necesaria una parrilla móvil en la parte inferior del equipo. Esto permite batir el lecho de carbón vegetal, en la zona de reducción, ayudando de este modo a evitar los bloqueos que pueden motivar la obstrucción de la corriente de gas.

La principal ventaja de los gasificadores de tipo invertido radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán apropiado para aplicarlo a motores. Sin embargo, en la práctica es muy raro lograr un gas libre de alquitranes, en todo el funcionamiento del equipo. Los gasificadores de tiro invertido sufren también los problemas relacionados con los combustibles de alto contenido de cenizas (formación de escoria), en mayor proporción que los gasificadores de tiro directo (Castro, 2015).

2.9.1 Tratamiento de gases productos de la gasificación. Dentro del proceso de gasificación de biomasa el gas obtenido es utilizable en calderas, motores, sistemas de acondicionamiento, entre otros.

Pero para ellos es necesario un proceso de depuración y acondicionamiento para tratar de eliminar contaminantes a niveles suficientemente bajos para cumplir con la normativa ambiental y la tolerancia de los sistemas de conversión del gas, ajustar la relación CO/H₂ y mejorar la calidad del gas previo a la aplicación en combustibles limpios y contribuir a la reducción progresiva de emisiones de acidificación y del efecto invernadero.

A continuación se presenta una tabla con los contaminantes del gas de gasificación y sus posibles efectos

Tabla 1. Compuestos del gas de gasificación y sus efectos

Contaminante	Ejemplo	Problemas
Partículas	Cenizas, char	Erosión
Haluros	Cl, Br, F	Corrosión, envenenamiento
Metales alcalinos	Na, K	Catalizadores
Otros metales traza Mg	Hg, etc.	Legislación
Compuestos N	NH ₃ , HCN	Emisiones
Compuestos S	H ₂ S	Emisión, corrosión, envenenamiento 0.13
Alquitranes	Ligeros, pesados 15.24	Taponamiento, atascos, desactivación

Fuente: (FAO, 2010)

Por tanto, para el tratamiento de los gases producidos, se debe partir la comprensión

del uso final que van a tener los mismos, además de la materia prima (biomasa) que se está utilizando, a continuación se detalla rápidamente dichas condiciones.

Contenido de humedad del combustible: El valor calorífico del gas producido por cualquier tipo de gasificador depende, al menos en parte, del contenido de humedad del combustible (C.H.). El contenido de humedad se puede determinar sobre base seca o sobre base húmeda, se define del modo siguiente:

$$C.H._{seco} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100\% \quad (1)$$

Por otra parte, el contenido de humedad sobre base húmeda se define del modo siguiente:

$$C.H._{húmedo} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso húmedo}} \times 100\% \quad (2)$$

Las transformaciones de uno a otro se pueden obtener del modo siguiente:

$$C.H._{seco} = \frac{100 \times C.H._{húmedo}}{100 - C.H._{húmedo}} \times 100\% \quad (3)$$

$$C.H._{shúmedo} = \frac{100 \times C.H._{seco}}{100 - C.H._{seco}} \times 100\% \quad (4)$$

Un alto contenido de humedad reduce la eficiencia térmica porque el calor se emplea para eliminar el agua y, en consecuencia, esta energía no está disponible para las reacciones de reducción y para la transformación de la energía térmica en energía química del gas. Por lo tanto, un alto contenido de humedad se traduce en valores caloríficos bajos del gas.

Cuando el gas se emplea para fines de combustión directa, unos valores caloríficos bajos pueden ser tolerables y el uso de combustibles con contenidos de humedad (base seca) hasta de un 40 a un 50%, es viable, especialmente cuando se emplean gasificadores de tiro directo.

Debido, de una parte, al valor calorífico del gas (los motores necesitan gas de 4 200 kJ/m³ como mínimo para mantener una eficiencia razonable) y, de otra, al problema del arrastre de alquitranes, los gasificadores de tiro directo necesitan combustibles bastante secos (menos del 25 por ciento de humedad, de base seca).

Contenido de materias volátiles del combustible. La cantidad de volátiles en el material de alimentación determina la necesidad de medidas especiales (ya sea en el diseño del gasificador o en el proyecto del conjunto de depuración del gas) a fin de extraer los alquitranes del gas producido, en aplicaciones para motores.

En la práctica, el único combustible de biomasa que no necesita esta atención especial es el carbón vegetal de buena calidad.

Sin embargo, se subestima con frecuencia el contenido de materias volátiles del carbón vegetal que puede ser en la práctica del 3% al 30% o más. Como norma general, si el combustible contiene más del 10% de materias volátiles, debe emplearse en gasógenos de tiro invertido pero, incluso en este caso, hay que tener en cuenta el método de producción del carbón vegetal. El carbón vegetal producido en grandes retortas suele ser bastante constante respecto al contenido de materias volátiles, pero se pueden observar grandes diferencias en el carbón vegetal producido en pozos abiertos de pequeña dimensión o en hornos metálicos portátiles, que son corrientes en muchos países en desarrollo.

Contenido de cenizas y composición química de las cenizas. Las cenizas pueden causar diversos problemas, sobre todo en los gasificadores de tiro directo o de tiro invertido. La formación de escoria o de Clinker en el reactor, ocasionada por la fusión y aglomeración de cenizas, en el mejor de los casos representará un aumento importante de la mano de obra necesaria para el funcionamiento del gasificador. Si no se adoptan medidas especiales, la acumulación de escoria puede ocasionar la formación excesiva de alquitrán y el bloqueo total del reactor. En el caso peor, existe la posibilidad de que se produzcan fugas de aire con el consiguiente riesgo de explosión, especialmente en los gasificadores de tiro directo.

El que se produzca o no la formación de escoria, depende del contenido de cenizas del combustible, de las características de fusión de las cenizas y de la distribución de la temperatura en el gasificador.

En general, no se observa formación de escoria con combustibles que poseen un contenido de cenizas inferior al 5 ó 6%. Cabe esperar una importante formación de escoria en el caso de combustibles que posean un contenido de cenizas del 12 por ciento y más. En lo que se refiere al contenido de cenizas, la madera en bruto y los carbones de madera rara vez presentan problemas, siendo su contenido de cenizas

normalmente del 0,72 al 2,5 por ciento. Observar el Anexo A.

Posteriormente se realiza un resumen descriptivo de la materia prima que se tiene, con lo cual se identificara claramente las condiciones para el acondicionamiento del gas resultante.

Serrín. La mayoría de los gasificadores de tiro invertido actualmente disponibles no son apropiados para serrín que no esté granulado. Los problemas que se presentan son: producción excesiva de alquitrán, caída inadmisible de presión y falta de circulación en el depósito de combustible. Los gasificadores de lecho fluidizado pueden aceptar pequeñas partículas de serrín y producir un gas de buena calidad para hornos. Para su empleo en motores es necesario un sistema de depuración bastante complicado.

Madera. La mayoría de las especies de madera tienen contenidos de ceniza inferiores al 2 por ciento, siendo, por lo tanto, combustibles apropiados para los gasificadores de lecho fijo. Debido al alto contenido de sustancias de la madera, los sistemas de tiro directo producen gas que contiene alquitrán, apropiado sobre todo para combustión directa. La depuración del gas para hacerlo apropiado para motores, es bastante difícil y requiere un esfuerzo importante de capital y mano de obra, se requiere que se la biomasa forestal sea procesada por un gasificador de tiro invertido para conseguir un gas prácticamente libre de alquitrán, y después de pasar por un conjunto relativamente sencillo de depuración, el gas se puede utilizar para motores de combustión interna.

Limpieza del polvo del gas, sistema de filtrado. El problema principal de la producción de un gas de calidad para motores es la eliminación del polvo. La cantidad de polvo existente en el gas pobre a la salida del gasificador depende del diseño del equipo, de la carga del gasificador y del tipo de combustible empleado. La cantidad de polvo por m³ existente en el gas aumenta generalmente con la carga del gasificador, por la simple razón de que a mayores cargas se producen mayores velocidades del gas y, con ello, un mayor arrastre de polvo.

El tipo de combustible tiene también su influencia: como el origen de la biomasa a utilizarse en forestal, las arboleas frondosas generalmente producen menos polvo que las resinosas. Nordström realizó investigaciones sobre la dimensión y distribución por tamaño del polvo del gas del generador, cuyos resultados se reproducen en la tabla siguiente. (FAO, 2010)

Tabla 2. Distribución por tamaños del polvo del gas pobre

Tamaño de las partículas de polvo m[10 ⁻⁶]	Porcentaje en el gas [%]
más de 1 000	1,7
1 000 – 250	24,7
250 – 102	23,7
102 – 75	7,1
75 – 60	8,3
menos de 60	30,3
Pérdidas	4,2

Fuente: (FAO, 2010)

Es posible separar alrededor del 60% al 70% de este polvo, de la corriente de gas, por medio de un ciclón bien diseñado. El resto (partículas de polvo de diámetro menor) tiene que eliminarse por otros medios.

Durante la Segunda Guerra Mundial se empleó una multitud de filtros secos, con lana de madera, fibra de sisal, lana de vidrio, astillas de madera empapadas de aceite y otros tipos de material fibroso o granular, para la extracción del polvo fino (tamaño medio de partículas inferior a 60 micrones), pero su éxito fue muy limitado.

Los purificadores húmedos como las depuradoras de agua y aceite son también eficaces pero sólo dentro de ciertos límites.

El mejor efecto de depuración se obtiene utilizando filtros de tela. Sin embargo, los filtros normales de tela son muy sensibles a la temperatura del gas. En el caso de la gasificación de madera o residuos agrícolas, el punto de condensación del gas está alrededor de los 70°C. Por debajo de esta temperatura el agua se condensa en los filtros, ocasionando la obstrucción de la corriente de gas y una caída inaceptable de presión en la sección de filtrado del sistema de gasificación.

A temperaturas superiores, los filtros normales de tela tienden a carbonizarse y a descomponerse en la corriente de gas caliente. Otro de sus inconvenientes es que están sujetos a una acumulación rápida de polvo, por lo que necesitan una limpieza frecuente si no se utilizan junto con un proceso previo de filtrado.

Los inconvenientes de los filtros de tela se pueden resolver en parte utilizando bolsas de filtro de lana de vidrio tejida. Este material se puede utilizar con temperaturas hasta de 300°C. Calentando (con aislamiento) la envoltura del filtro por medio de una

corriente de gas caliente procedente del gasificador, se puede mantener en el filtro temperaturas superiores a 100°C, evitando de este modo la condensación y la caída de presión. Si se emplea un proceso de filtrado previo consistente en un ciclón y/o un filtro de choque, es posible mantener los intervalos de servicio y mantenimiento dentro de límites razonables, o sea una limpieza cada 100 a 150 h. (FAO, 2010).

También es conocido que los filtros electrostáticos tienen excelentes propiedades para la separación de partículas y que muy probablemente se podrían emplear también para producir un gas de calidad aceptable. Sin embargo, estos filtros son caros y por esta razón sólo se prevé su empleo en instalaciones grandes, es decir, equipos que producen 500 kW o más de potencia eléctrica.

Medición de caudal de fluidos gaseosos a la entrada y salida. En torno al tratamiento de los gases productos de la gasificación, a más de su adecuación propiamente establecida por sus parámetros anteriormente mencionados, se hace necesaria su medición. Al tratarse de un flujo gaseoso hay varias alternativas, cada una de ellas con sus correspondientes ventajas.

Es muy importante tener en cuenta que una adecuada cuantificación del flujo volumétrico del gas producido ayudará a la estimación del potencial energético real del gasificador, en tanto que la medición correcta del agente gasificante (en nuestro caso aire) como en la operación adecuada del equipo en su conjunto, proporcionando eficiencias relativamente altas.

En los medidores de caudal, los parámetros a tomar en cuenta son los siguientes:

Rango: los medidores disponibles en el mercado pueden medir flujos desde varios mililitros por segundo (ml/s) para experimentos precisos de laboratorio hasta varios miles de metros cúbicos por segundo (m^3/s) para sistemas de irrigación de agua o agua municipal o sistemas de drenaje.

Exactitud requerida: cualquier dispositivo de medición de flujo instalado y operado adecuadamente puede proporcionar una exactitud dentro del 5% del flujo real. La mayoría de los medidores en el mercado tienen una exactitud del 2% y algunos dicen tener una exactitud de más del 0.5%.

Pérdida de presión: debido a que los detalles de construcción de los distintos

medidores son muy diferentes, éstos proporcionan diversas cantidades de pérdida de energía o pérdida de presión conforme el fluido corre a través de ellos. Excepto algunos tipos, los medidores de fluido llevan a cabo la medición estableciendo una restricción o un dispositivo mecánico en la corriente de flujo, causando así la pérdida de energía.

Tipo de fluido: el funcionamiento de algunos medidores de fluido se encuentra afectado por las propiedades y condiciones del fluido. Una consideración básica es si el fluido es un líquido o un gas. Otros factores que pueden ser importantes son la viscosidad, la temperatura, la corrosión, la conductividad eléctrica, la claridad óptica, las propiedades de lubricación y homogeneidad.

Calibración: se requiere de calibración en algunos tipos de medidores. Algunos fabricantes proporcionan una calibración en forma de una gráfica o esquema del flujo real versus indicación de la lectura. Algunos están equipados para hacer la lectura en forma directa con escalas calibradas en las unidades de flujo que se deseen. En el caso del tipo más básico de los medidores, tales como los de cabeza variable, se han determinado formas geométricas y dimensiones estándar para las que se encuentran datos empíricos disponibles. Estos datos relacionan el flujo con una variable fácil de medición, tal como una diferencia de presión o un nivel de fluido.

Refrigeración del gas. Los principales factores a tener en cuenta son el calor perceptible del gas, el contenido de vapor de agua y su calor de condensación y los efectos de incrustación del refrigerador. Los refrigeradores del gas del generador corresponden a tres grandes categorías: refrigeradores de convección natural, de convección forzada y de agua.

Los refrigeradores de convección natural consisten simplemente en una cierta longitud de tubo. Son sencillos de emplear y limpiar y no requieren aporte adicional de energía. Pueden ser bastante voluminosos aunque este problema se puede resolver en parte utilizando tubo delgado a fin de incrementar la superficie de conducción. Los refrigeradores de convección forzada van equipados con un ventilador que fuerza la circulación del aire refrigerado alrededor de los tubos de gas. Este tipo de refrigerador puede ser mucho más pequeño que los refrigeradores de convección natural. Sus inconvenientes son: el aporte adicional de energía para el ventilador y la necesidad de utilizar tubos de refrigeración del gas de pequeño diámetro que pueden producir

problemas de incrustación. El primero se puede resolver en algunos casos utilizando el aire de refrigeración suministrado por el ventilador del motor.

Hay refrigeradores de agua de dos tipos, el lavador de gases y el intercambiador de calor; independientemente de que se utilice uno u otro, el objetivo es generalmente enfriar y limpiar el gas en una sola operación.

Existen lavadores de gases de tipos muy diferentes, pero el principio siempre es el mismo: se lleva el gas en contacto directo con un medio fluido (generalmente agua) que se rocía en la corriente de gas por medio de un dispositivo de inyección apropiado. La ventaja de este sistema es su pequeño tamaño. Los inconvenientes son la necesidad de agua dulce, la mayor complicación del mantenimiento y cierto consumo de energía resultante de la utilización de una bomba hidráulica.

La depuración del agua de refrigeración de fenoles y otros componentes de alquitrán será necesaria también, con toda probabilidad, lo que constituye una operación engorrosa. Pero hasta ahora sólo se dispone de muy pocas experiencias y de cálculos de costes del tratamiento del agua de desecho.

Es posible también enfriar el gas por medio de un intercambiador de calor de agua refrigerada. Este es un método apropiado cuando se dispone de forma continua de una fuente de agua dulce y se puede justificar la inversión adicional y el consumo energético de una bomba hidráulica apropiada.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE OBTENCION DEL GAS POBRE

3.1 Definición del problema

Se requiere diseñar un sistema para la obtención del gas pobre en el gasificador Downdraft de la Escuela de Ingeniería Mecánica, en el cual el gas resultante del proceso de gasificación sale con partículas y componentes contaminantes, el mismo que 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.

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.

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

- El sistema de filtrado
- Caudal de aire para el correcto funcionamiento del gasificador
- El sistema de enfriamiento.

3.2 Alternativas de solución para el sistema de filtrado

Conforme se describe en el marco teórico, existen varias alternativas para la filtración del gas producido, según el tipo de materia prima utilizada y el diseño del gasificador se tiene las siguientes opciones:

Purificadores Húmedo. *Este apartado se centra en la eliminación de partículas sólidas.* La separación se realiza por medio de una corriente líquida pulverizada (gotas), que es inyectada dentro de una cámara por donde circulan el gas contaminado.

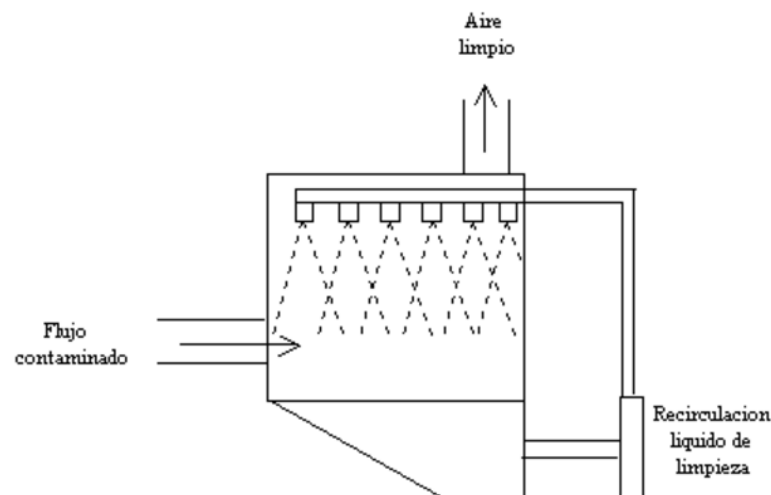
Las partículas se ven arrastradas por la corriente líquida hacia la parte inferior del equipo, que será posteriormente recogido y tratado.

El contacto de las partículas con el medio líquido puede efectuarse de diversos modos, el equipo más común es el equipo tipo Venturi. La eficacia depende del grado de contacto e interacción que tengan las partículas con el líquido; es por ello que es muy importante la atomización del líquido y un adecuado tiempo de contacto. Los lavadores logran buenas eficiencias de captura para partículas de tamaño de 0,1 a 20 μm .

Hay tres tipos de colectores húmedos dependiendo de la cantidad de energía suministrada o utilizada en el sistema de limpieza. La eficiencia de remoción de partículas está directamente relacionada con la energía requerida por el separador húmedo.

Colectores de baja energía. Son aquellos en los que el flujo de aire contaminado pasa por una niebla o cortina de agua. Son para atrapar partículas de más de 50 micras o para hacer reacciones químicas o térmicas con los contaminantes. Los más conocidos son las cajas de aspersión, en los que el flujo contaminado pasa por una cámara en la que se ponen en contacto el gas y el agua mediante la aspersión del líquido.

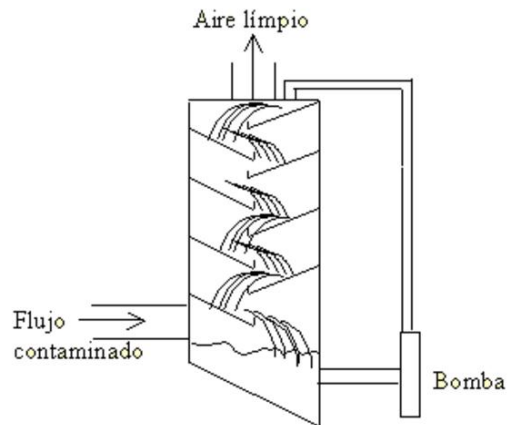
Figura 6. Colectores de baja energía.



Fuente: (MILIARIUM, 2012)

Lavadores de media energía. En ellos flujo de contaminantes pasa por una serie de mamparas con cortinas de agua o junto a las paredes húmedas de los lavadores, las partículas del contaminante se unen al agua y luego ésta es tratada para separarla de los contaminantes.

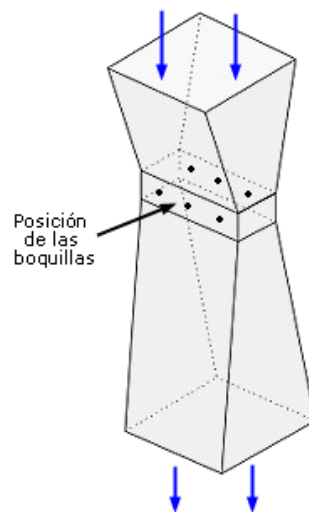
Figura 7. Lavadores de media energía.



Fuente: (MILIARIUM, 2012)

Separadores de alta energía. Son aquellos equipos que utilizan la energía para mezclar con gran eficiencia a las emisiones y el agua, los equipos más conocidos son los Venturi de alta energía. Estos equipos logran capturar con 99% de eficiencia a partículas de 0.5 de micra.

Figura 8. Separadores de alta energía.



Fuente: (MILIARIUM, 2012)

Para lograr estas eficiencias se llegan a tener caídas de presión hasta de 1000 mm de agua, lo que implica el uso de mucha potencia. En el separador de Venturi el gas contaminado circula por un tubo que tiene un estrechamiento, esta constricción hace que el flujo de gas se acelere cuando aumenta la presión. El flujo de gas recibe un rocío de agua antes o durante la constricción en el tubo. La diferencia de velocidad y presión, y la turbulencia que resulta de la constricción hace que las partículas y el agua se mezclen y combinen. La reducción de la velocidad en la sección expandida del cuello permite que las gotas de agua con partículas caigan del flujo de gas.

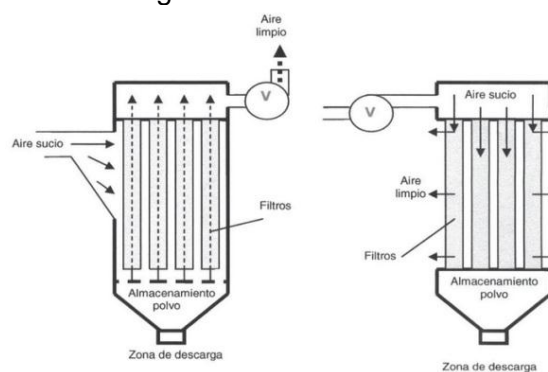
3.2.1 Filtros de tela. Los filtros son materiales porosos a través de los cuales se hace pasar una corriente gaseosa cargada de partículas, que quedarán retenidas en el filtro.

La mayoría de los filtros de tela tienen un tamaño de poro bastante grande en relación con las partículas que se quieren eliminar, pero el poder de filtración radica en la acumulación de partículas en la superficie del filtro, que forma una torta que colabora fuertemente en el poder de retención de partículas.

Alcanzado cierto límite de volumen de las tortas, las pérdidas de presión son elevadas, lo que motiva que los filtros tengan sistemas de limpieza periódica depositando la torta formada en una tolva. Habitualmente la limpieza requiere de una parada del sistema o al menos del compartimento en limpieza. Sus limitantes son la temperatura y la humedad; ya que no pueden manejar flujos a más de 200 °C.

Una unidad de filtro de tela consiste de uno o más compartimientos aislados conteniendo hileras de bolsas de tela, en la forma de tubos redondos, planos o de cartuchos plisados. El gas cargado de partículas pasa generalmente a lo largo del área de las bolsas y luego a través de la tela. Las partículas son retenidas en la cara de las bolsas corriente arriba y el gas limpio es ventilado hacia la atmósfera.

Figura 9. Filtros de tela.



Fuente: (MILIARIUM, 2012)

El parámetro de diseño más importante es flujo volumétrico de gas en relación con la superficie de tela, y el parámetro de operación de interés por lo general es la caída de presión a través del sistema de filtro. La característica de operación principal de los filtros de tela que los distingue de otros filtros de gas es la capacidad de renovar la superficie de filtración, sin tener que desecharlos cada vez que se ha alcanzado una importante acumulación de polvo

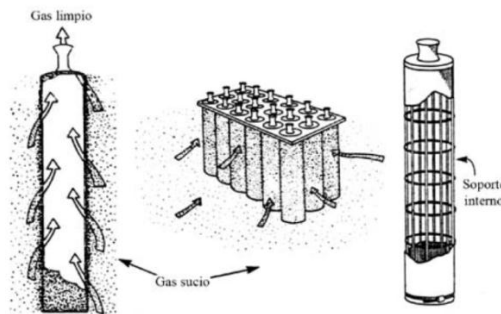
3.3 Diseño del sistema de filtrado

Se selecciona filtración por tela, la configuración geométrica será en mangas, debido a que las partículas a filtrar corresponden a un tamaño de 0,6 - 0,75 μm .

Medios filtrantes. Según el ANEXO B se selecciona el medio filtrante para nuestra utilización, el cual corresponde a la Fibra de vidrio.

Modo de filtración. Filtración exterior debida a que el gas que se debe filtrar, posteriormente se lo conduce a otro proceso y no se lo libera directamente a la atmósfera.

Figura 10. Esquema del proceso de filtrado



Fuente: (Londoño, 2008)

3.3.1 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.

3.3.2 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:

Tabla 3. Velocidades de filtración recomendadas para filtros de fibra de vidrio

Polvo	Velocidad de filtración [m/min]
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: (UCLM, 2010)

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

3.3.3 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:

$$Q_{sg} = V_{sg} \cdot A_T \quad (5)$$

Dónde:

Q_{sg} = Caudal de gas de síntesis [m^3/s]

V_{sg} = Velocidad de gas de síntesis corresponde a 4 m/s, dato obtenido a través de medición experimental

A_T = Área de la tubería que conduce al gas de síntesis corresponde a 0,003 1 m^2 , dato obtenido a través de la tubería de PVC de 2 plg nominal ($d_{interior} = 60$ mm)

De lo anteriormente descrito se tiene:

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

Figura 11. Medición de la velocidad de filtración.



Fuente: Autor

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

Dónde:

V_{gf} = Velocidad de filtración del gas [m/s], corresponde a 0,6 m/min, Tabla 3.

$A_{filtrado}$ = Área de filtrado [m^2]

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

Al valor de área obtenido, se lo debe multiplicar por un factor recomendado:

Tabla 4. Factor de corrección por área de la tela

Área de tela neta [m ²]	Multiplicador del área
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: (Londoño, 2008)

Por tanto el valor del área de filtrado total resulta:

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

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.

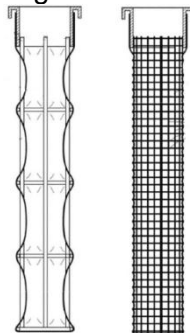
Número de mangas = 6

Diámetro = 0,15m

Longitud = 0,75m

Área unitaria = 0,35m²

Figura 12. Filtro



Fuente: (Londoño, 2008)

Entonces con el cálculo encontramos que el área total para la construcción de los filtros es de:

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

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.

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

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 tela, la caída de presión aumenta.

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_f + \Delta P_p$$

Dónde:

ΔP = Caída de presión total [mmH₂O]

ΔP_s = Caída de presión a través del compartimiento [mmH₂O]

ΔP_f = Caída de presión a través de la tela [mmH₂O]

ΔP_p = Caída de presión a través de la capa de partículas [mmH₂O]

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:

$$\Delta P_f = K_1 \cdot V_{gf}$$

Dónde:

ΔP_f = Caída de presión a través de la tela [mmH₂O]

K_1 = Factor de resistencia del tejido [mmH₂O s/m]

Por lo tanto al escoger un valor de $K_1 = 147,1$ mm H₂O .s/m nos queda la caída de presión por la tela:

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

Tabla 5. Factores de resistencia para telas de tejido plano

Tela	Tejido [hilos/cm]	K_1 [mm H ₂ O .s/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: (Londoño, 2008)

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:

$$\Delta P_p = K_2 C_p V_{gf}^2 \theta$$

Dónde:

K_2 = Factor de resistencia debido a la capa de partículas [mmH₂O m s/g]

C_p = Concentración de partículas en la corriente gaseosa [g/m³]

σ = Tiempo de acumulación de las partículas o de filtración [s]

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.

Se estimado por tanto un valor de $K_2 = 48,337 \text{ mmH}_2\text{O m s/g}$ de la Tabla 6

Tabla 6. Factores de resistencia de ciertas partículas

Partículas	K_2 [mm H ₂ O .m.s/g]						
	833 μm	110 μm	90 μm	45 μm	40 μm	20 μm	
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: (Londoño, 2008)

El valor de C_p según el material a filtrarse se estima en 50 mg/m^3 del gas, Tabla 7:

Tabla 7. Cantidades comunes de elementos contaminantes del gas pobre

Polvo:	Menos de 50 mg/m^3 de gas. Preferentemente 5 mg/m^3 de gas.
Alquitranes:	menos de 500 mg/m^3 de gas
Ácidos:	menos de 50 mg/m^3 de gas (medido como ácido acético)

Fuente: (FAO, 2010)

El valor del tiempo σ corresponderá al valor recomendado de operación antes de limpiar los filtros el cual es 100 horas, equivalentes a 360 000 s

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.

3.3.4 Cálculo de espesor de aislante El aislante térmico es importante en el diseño para evitar que se produzcan grandes pérdidas de calor al equipo, el aislante que se va a ocupar es fibra de lana de vidrio la cual es ideal para este rango de temperaturas.

Convección libre - aire exterior. Para el cálculo del coeficiente convectivo por convección libre entre al aire que se encuentra en el interior del laboratorio de Transferencia de Calor y las paredes exteriores del filtro lo hacemos con los números adimensionales:

Número de Grashof. Las propiedades físicas del fluido (Pr , ν , α y β) se deben evaluar a temperatura de la capa límite también llamada fílmica definida por:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (14)$$

Dónde:

$T_s = 80^\circ\text{C}$ Temperatura de superficie se asume para después iterar

$T_{\infty \text{aire}} = 22^\circ\text{C}$ Temperatura del aire

$$T_f = \frac{(80)^\circ\text{C} + (22)^\circ\text{C}}{2} = 51^\circ\text{C}$$

Propiedades del aire evaluado a temperatura fílmica

Densidad $\rho = 1,2956 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Viscosidad dinámica $\mu = 192360 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}$

Viscosidad cinemática	$\gamma = 1,6 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$
Conductividad térmica	$k = 0,02576 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
Calor específico	$Cp = 1,005 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Número de Prandtl	$Pr = 1,2056$
Coefficiente de Expansión:	$\beta = 0,04762 \frac{1}{^\circ C}$

$$Gr = \frac{g \beta}{\gamma^2} (T_s - T_\infty) L^3 \quad (6)$$

$$Gr = 6,1 * 10^8$$

Número de Rayleigh:

$$Ra = Gr * Pr \quad (7)$$

$$Ra = 4,33 * 10^8$$

Número de Nusselt:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (8)$$

$$Nu = 95,034$$

Coefficiente Convectivo

$$Nu = \frac{h_{\infty \text{aire}} D}{K} \quad (9)$$

$$h_{\infty \text{aire}} = \frac{Nu k}{D} = 4,45 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Convección forzada. Para el cálculo del coeficiente convectivo entre los gases y las paredes internas del filtro se utilizan los siguientes números adimensionales:

$$Re_{gases} = \frac{V_{gases} D h_{extr}}{\vartheta_{gases}} = 1299772,47$$

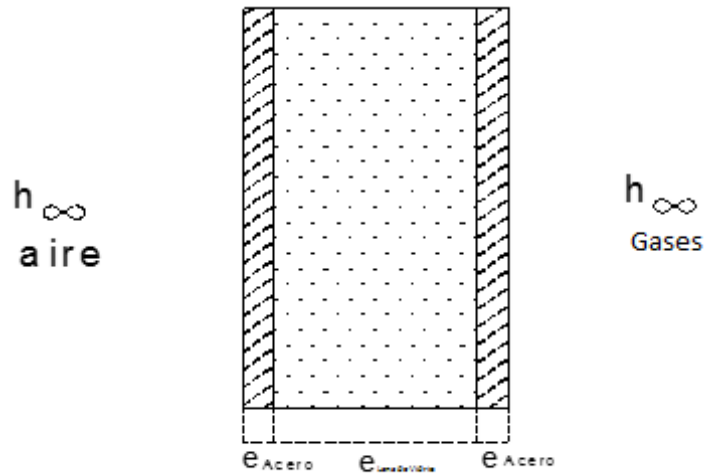
$$Nu_{gases} = 0,027 Re_{gases}^{0,805} Pr_{gases}^{1/3}$$

$$Nu_{gases} = 0,027 (1299772,47)^{0,805} (0,7323)^{1/3} = 2031,998171$$

$$Nu_{gases} = \frac{h_{\infty} D h_{gases}}{K_{gases}} \quad ; \text{ despejar } h_{\infty}$$

$$h_{\infty} = 21,06586377 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

Figura 13. Sección transversal de la pared del filtro



Fuente: Autor

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

$$R_{Total} = \frac{1}{UA} \quad (37)$$

$$Uo = \frac{1}{R_{Total} Ao}$$

$$R_{Total} = R_{conv 1} + R_{acero} + R_{lana \ de \ vidrio} + R_{acero} + R_{conv 2}$$

$$R_{Total} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{e_{acero}}{k_{acero} A} + \frac{e_{lana \ de \ vidrio \ calculado}}{k_{poliuretano} A} + \frac{e_{acero}}{k_{acero} A} + \frac{1}{h_2 A} \quad (10)$$

Dónde:

Espesor de acero $e_{acero} = 0,009 \ m$

Conductividad térmica de acero $k_{acero} = 14,9 \ \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

Conductividad térmica de la lana de vidrio $k_{lana \ de \ vidrio} = 0,017 \ \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

Coefficiente convectivo interior gases $h_1 = h_{\infty gases} = 297,3595 \ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Coefficiente convectivo exterior Aire $h_2 = h_{\infty aire} = 4,45 \ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Coefficiente global de transferencia de calor recomendado $Uo = U_{rec} = 0,378 \ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Para las paredes:

$$U_{rec} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_{acero}}{k_{acero}} + \frac{e_{lana\ de\ vidrio\ calculado}}{k_{poliuretano}} + \frac{e_{acero}}{k_{acero}} + \frac{1}{h_2}}$$

$$e_{lana\ de\ vidrio\ calculado\ pared} = k_{lana\ de\ vidrio} \left(\frac{1}{U_{rec}} - \frac{1}{h_1} - \frac{e_{acero}}{k_{acero}} - \frac{e_{acero}}{k_{acero}} - \frac{1}{h_2} \right)$$

$$e_{lana\ de\ vidrio\ calculado\ pared} = 0,01996\ m$$

Como el espesor obtenido es $e_{poliuretano} = 0,019\ 96\ m$ se selecciona un espesor de aislante de 1 plg (0,0254 m).

3.4 Alternativas de solución para el sistema de medición de caudal

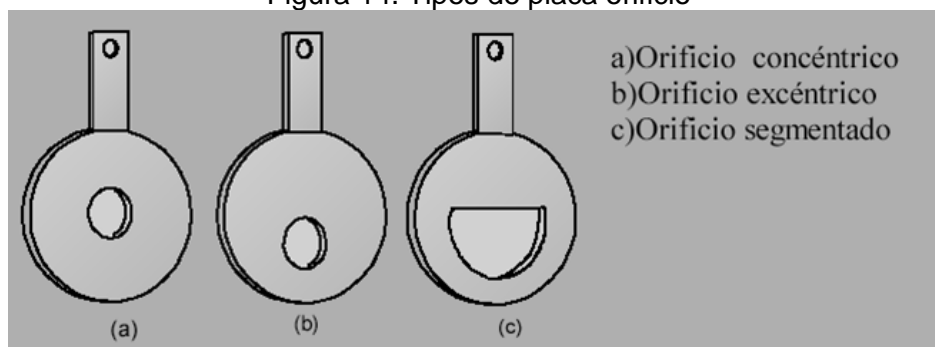
En torno a las alternativas para la medición del caudal, los parámetros a tomarse en cuenta son la composición del fluido y las factibilidad de su construcción o adquisición evaluando además los valores de exactitud que pudieran ofrecer los mismos.

En nuestro caso, se opta por medidores de caudal basados en presión diferencial, los mismos que se encuentran normados bajo la ISO 5167.

3.4.1 Placa orificio. La placa de orificio o diafragma consiste en una placa perforada instalada en la tubería, dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal.

El orificio de la placa puede tener diferentes posiciones. La placa se construye de acero inoxidable tipo 316 para garantizar propiedades de resistencia a la corrosión, buena resistencia (dureza), maleabilidad y excelente soldabilidad. Recomendación según la normativa.

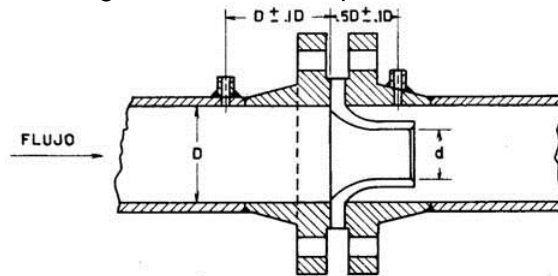
Figura 14. Tipos de placa orificio



Fuente: (INSTRUMENTACIONYCONTROL, 2014)

3.4.2 *La tobera de flujo.* La tobera consiste en una entrada de forma cónica, redondeada y restringida mientras que la salida es una expansión abrupta. Estos instrumentos se utilizan en aplicaciones donde el fluido trae consigo sólidos en suspensión, aunque si estos son abrasivos pueden afectar la precisión del instrumento existen diversas formas estandarizadas para las toberas de flujo.

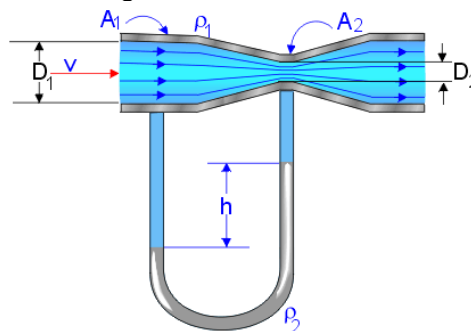
Figura 15. Unión de placa orificio.



Fuente: (INSTRUMENTACIONYCONTROL, 2014)

3.4.3 *El tubo de Venturi.* Consiste en un conjunto de bridas y tuberías con un cono de entrada convergente y un cono de salida divergente los cuales guían el flujo hacia la continuación de la tubería, la garganta es la unión de los dos conos y es la parte más estrecha del tubo. El cono de salida se dice que es de recuperación porque recupera hasta un cierto

Figura 16. Tubo Venturi

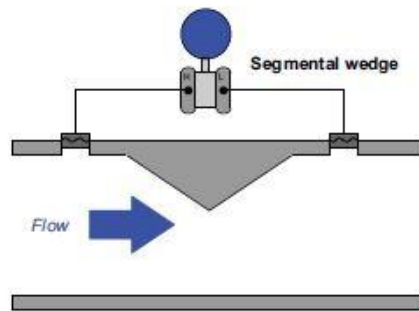


Fuente: (INSTRUMENTACIONYCONTROL, 2014)

3.4.4 *La Cuña de Flujo.* Es una restricción al flujo en forma de V que se coloca dentro de la tubería, produce una presión diferencial la cual permite medir el flujo en un amplio rango de números de Reynolds. Las tomas de presión son equidistantes viene suministradas por el fabricante junto con el elemento que viene instalado dentro de un tubo corto.

No hay datos de normalización ISO-5167 para este elemento.

Figura 17. Cuña de flujo.

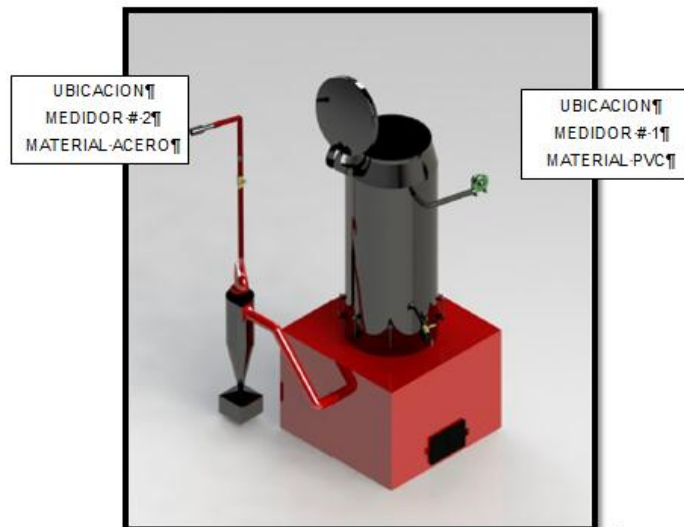


Fuente: (INSTRUMENTACIONYCONTROL, 2014)

3.5 Diseño del sistema de medición de caudal

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.

Figura 18. Gasificador Downdraft



FUENTE: (Tierra, 2011)

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.

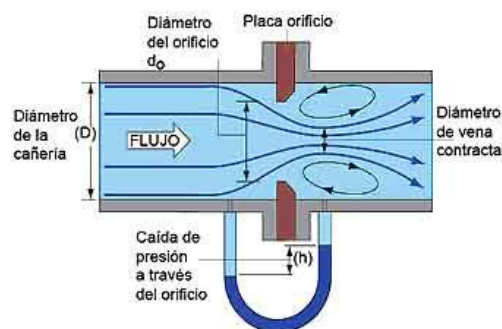
Son dos los puntos en los que se requiere medir el caudal. El primero es el ingreso de aire como agente gasificante, el cual interesa medirlo para obtener eficiencias altas en el gasificador, manteniendo las reacciones con deficiencia de oxígeno. El segundo

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 realizará 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 tomar lecturas de mejor apreciación se utiliza acetona como el líquido que reposará en el tubo en U, esto gracias a que su densidad es menor que la del agua.

Figura 19. Esquema de funcionamiento de placa orificio con tubo en U.



Fuente: (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]

3.5.1 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.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dónde:

m = Masa del fluido en el manómetro [kg]

v = Volumen del fluido en el manómetro [m^3]

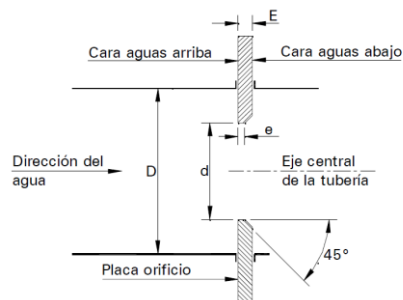
ρ = Densidad del fluido en el manómetro [kg/ m^3]

$$\rho = \frac{0.01967 \text{ kg}}{2.546 * 10^{-5} \text{ m}^3} = 772 \text{ kg/m}^3$$

3.5.2 Dimensiones recomendadas para la construcción de una placa orificio

En la figura siguiente se puede ver la sección transversal de una placa orificio y sus características geométricas, la tabla contigua muestra los valores mínimo y máximo de los espesores e y E , en función del diámetro de la tubería que se utilice.

Figura 18. Cotas dimensionales de la placa orificio



Fuente: (ISO5167, 2003)

Tabla 8. Valores mínimo y máximo de los espesores para placas orificio

Dimensión	Mínimo	Máximo
E	0,005D	0,02D
E	0,005D	0,05D
D	½ pulg	38 pulg
d/D	0,20	0,75

Fuente: (ISO5167, 2003)

Por tanto, en nuestro caso a partir de los diámetros de las tuberías en las que van a ser instalados los caudalímetros, [2 plg nominales cada uno material de PVC y acero cédula estándar], se escoge un valor de 1 plg para el orificio de la placa

Según la norma ISO 5167-1980 la relación de diámetros queda definida por el valor adimensional de β . El espesor para este tipo de construcción de placa es despreciable puesto que es muy delgada.

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

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

Dónde:

D = Diámetro de la tubería [m]

e = Espesor del borde de la placa orificio [m]

E = Espesor de la lámina de la placa orificio [m]

$$0,000315 \text{ m} \leq e \leq 0,00126 \text{ m}$$

$$0,315 \text{ mm} \leq e \leq 1,26 \text{ mm}$$

$$0,315 \text{ mm} \leq E \leq 3,15 \text{ mm}$$

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

Tabla 9. 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

Fuente: (ISO5167, 2003)

Cálculo para el valor de β del Medidor 2, [material acero]

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{0,0254 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} = 0,5$$

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

Cálculo para el valor de β del Medidor 1, [material PVC]

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{0,0254 \text{ m}}{0,0630 \text{ m}} = 0,4$$

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

3.5.3 Ubicación de las tomas de presión. Existen tres posiciones de instalación las distancias requeridas aguas arriba (L1) y aguas abajo (L2) para cada tipo.

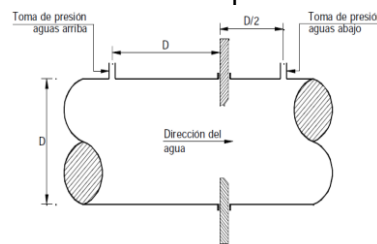
Tabla 10. Posiciones de las tomas de presión

Tipo de instalación	L ₁	L ₂
D-D/2	D	D/2
A 1 plg	1 pulg	
En los bordes	Cero	

Fuente: (ISO5167, 2003)

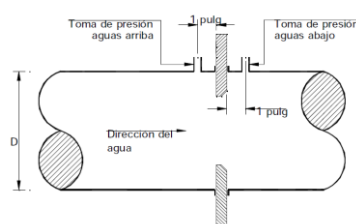
En las siguientes figuras se observan los tres tipos de instalaciones:

Figura 19. Tomas de presión a D-D/2



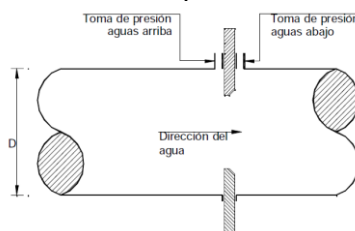
Fuente: (ISO5167, 2003)

Figura 20. Tomas de presión a 1 pulgada



Fuente: (ISO5167, 2003)

Figura 21. Tomas de presión en los bornes



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.

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

$$Q_R = \frac{C_d \cdot \pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho (1 - \beta^4)}} \quad (11)$$

A continuación se realiza la demostración de dicha ecuación; teniendo en cuenta la figura 19 se aplica un balance de energía mecánica, tomando en cuenta el punto 1, como la toma de presión antes de la placa orificio, y el punto 2, la toma de presión después de la placa orificio, se tiene:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_r = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (12)$$

Dónde:

$P/\rho g$ = Presión estática del fluido que circula [m]

$V^2/2g$ = Presión dinámica del fluido que circula [m]

z = Altura respecto al nivel de referencia [m]

H_r = Valor de las pérdidas de energía [m]

P = Presión [Pa]

ρ = Densidad del fluido que pasa por la tubería [kg/m^3]

g = Aceleración de la gravedad [m^2/s]

v = Velocidad del fluido que pasa por el accesorio [m/s]

Reduciendo términos queda:

$$H_r = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (13)$$

Además se conoce que el valor de las pérdidas, en este caso, es únicamente por un accesorio que corresponde a la presencia de la placa orificio:

$$H_r = \frac{k \cdot V^2}{2g} \quad (14)$$

Dónde:

k = Coeficiente de pérdidas por el accesorio [adimensional]

Al igualar estas dos expresiones de Hr se obtiene:

$$\frac{k \cdot V^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

$$\frac{k \cdot Q_T^2}{2g \cdot A^2} = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

$$Q_T = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho k}}$$

Dónde:

Q_T = Representa el caudal teórico [m^3/s]

ΔP = Diferencial de presiones [Pa]

El valor de $k = (1 - \beta^4)$, representa las pérdidas de la placa según la norma ISO-5167.

Para el Medidor 1 (Material PVC), $k = 0,9375$

Para el Medidor 2 (Material Acero), $k = 0,9794$

Como en todo medidor de caudal existe un factor llamado coeficiente de descarga C_d , el cual es un valor adimensional que relaciona el valor del caudal teórico, con el valor del caudal experimental o real Q_R . Este valor es siempre menor que 1.

$$Q_R = C_d \cdot Q_T \quad (15)$$

Dónde:

Q_R = Caudal real medido por la placa orificio [m^3/s]

C_d = Coeficiente de descarga del caudalímetro [adimensional]

Por tanto finalmente nos queda el valor del caudal real medido:

$$Q_R = \frac{C_d \cdot \pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho (1-\beta^4)}} \quad (16)$$

Por tanto queda demostrada la ecuación para medir el caudal en una placa orificio, ésta depende del valor del diferencial de presión ΔP .

$$\Delta P = \rho g \Delta h \quad (17)$$

Dónde:

Δh = Diferencial de alturas [m], se tiene:

$$Q_R = \frac{C_d \cdot \pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta h}{(1-\beta^4)}} \quad (18)$$

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:

$$C_d = 0,05959 + 0,0312 \beta^{2.10} - 0,1840 \beta^8 + 0,0029 \beta^{2.50} \left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0,75} + \frac{0,0900 L_1 \beta^4}{1-\beta^4} - 0,0337 L_2 \beta^3 \quad (19)$$

Dónde:

L_1 = Relación entre la distancia desde la toma aguas arriba hasta la placa orificio y el diámetro de la tubería [m]

L_2 = Relación entre la distancia desde la toma aguas abajo hasta la placa orificio y el diámetro de la tubería, [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.

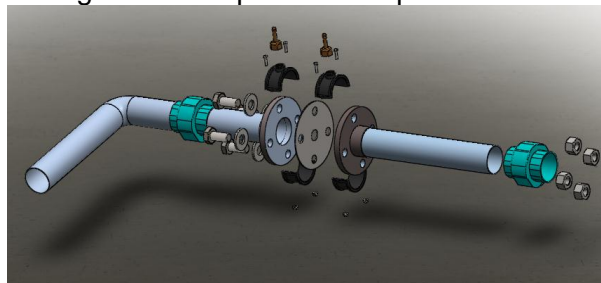
Tabla 11. Coeficientes de descarga para diferentes diámetros de la placa orificio.

Diámetro del orificio de la placa orificio [plg]	Valor de C_d :
$\frac{3}{4}$	0,6111
1	0,6097
$\frac{3}{2}$	0,6085
2	0,6083

Fuente: (ISO5167, 2003)

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

Figura 22. Esquema de la placa orificio.



Fuente: Autor.

3.6 Alternativas de solución para el sistema de refrigeración de los gases

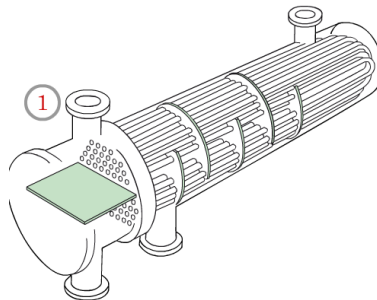
Uno de los factores más importantes en el proceso de combustión del gas pobre es la densidad del mismo ya que nos conviene tener más masa de gas por unidad de volumen es decir más densidad, con esto elevamos el poder calórico del mismo, y esto se lo consigue enfriando al gas a una temperatura entre 40 y 70 °C. (FAO, 2010).

Intercambiador de calor de coraza y tubos. El intercambiador de calor de coraza y tubos es el más utilizado en la industria. Está formado por una coraza y por multitud de tubos. En los intercambiadores de calor de paso múltiple se utiliza un número par de

pasos en el lado del tubo y un paso o más por el lado de la coraza.

Así por ejemplo el primer intercambiador que hay representado es el de la figura 22, es decir, que el fluido circula una vez por la coraza y el que se encuentra en el interior de los tubos pasa dos veces.

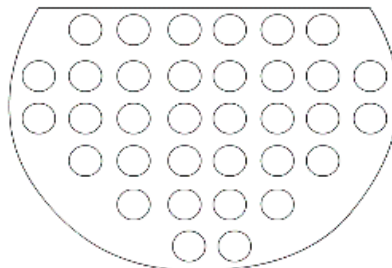
Figura 23. Intercambiador de coraza y tubo



Fuente: (Barcelona, 2015)

Los tubos que van por dentro de la coraza son colocados mediante una placa deflectora perforada, representada a continuación:

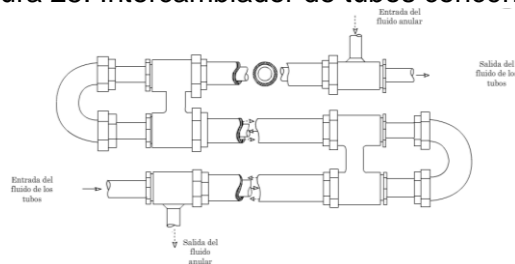
Figura 24. Placa deflectora en el intercambiador de calor coraza y tubo.



Fuente: (Barcelona, 2015)

Estas placas deflectoras están puestas para generar un flujo cruzado e inducir una mezcla turbulenta en el fluido que va por la coraza, la cual mejora el intercambio por convección.

Figura 25. Intercambiador de tubos concéntricos.



Fuente: (Barcelona, 2015)

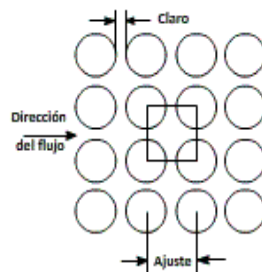
3.6.1 Intercambiadores de calor de tubos concéntricos. Los intercambiadores de calor de tubos concéntricos o doble tubo son los más sencillos que existen, están constituidos por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes.

Uno de los fluidos fluye por el interior del tubo de menor diámetro y el otro fluido fluye por el espacio anular entre los dos tubos. Hay dos posibles configuraciones en cuanto a la dirección de los fluidos: a contracorriente y en paralelo. A contracorriente los dos fluidos entran por los extremos opuestos y fluyen en sentidos opuestos; en cambio en paralelo entran por el mismo extremo y fluyen en el mismo sentido.

3.6.2 Intercambiadores de calor de flujo cruzado. Los intercambiadores de calor de flujo cruzado uno de los fluidos va por el interior de los tubos mientras el otro atraviesa por fuera de los tubos en los cuales la distribución de la tubería es un factor determinante en el diseño.

Distribución de tubos ajuste cuadrado. Esta configuración permite una mejor limpieza de los tubos. También hace que haya una menor caída de presión en el lado de la coraza.

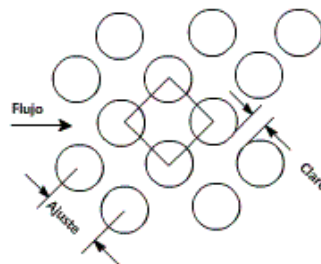
Figura 26. Distribución de tubos en forma cuadrada.



Fuente: (Barcelona, 2015)

Ajuste cuadrado girado: Las ventajas de esta distribución es la misma que el anterior.

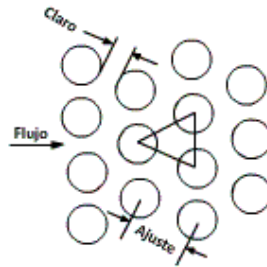
Figura 27. Distribución de tubos en ajuste cuadrado girado.



Fuente: (Barcelona, 2015)

Ajuste triangular. Se consigue una mayor superficie de transferencia de calor que con el ajuste cuadrado no se consigue. Si la distancia de centro a centro de los tubos es muy pequeña, no se puede limpiar.

Figura 28. Distribución de tubos en ajuste triangular.



Fuente: (Barcelona, 2015)

3.7 Diseño del sistema de enfriamiento

En los tres tipos de intercambiador se puede obtener un trabajo eficiente y enfriar los gases a la temperatura deseada, pero el costo de un intercambiador de coraza y tubo o un intercambiador de tubos concéntricos es demasiado para obtener una ganancia en la producción de energía limpia además en estos tipos funciona de manera eficiente con un fluido adicional como refrigerante lo que incrementa al tamaño del equipo. Por lo que se selecciona la alternativa 3 Intercambiadores de calor de flujo cruzado, con un arreglo de tubos en ajuste triangular que promociona una mayor eficiencia y menor costo de fabricación que las otras dos alternativas anteriores Además la limpieza del equipo será fácil, y el fluido refrigerante que se calienta será utilizado en el gasificador y así mejor la producción de gas pobre.

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

$$T_p = \frac{T_{a1} + T_{a2}}{2} \quad (20)$$

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

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

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

Viscosidad:	$\mu = 0,00001965 \frac{kg}{m \cdot s}$
Prandtl:	$Pr = 0,7044$
Densidad del aire	$\rho = 0,7749$

$$\rho = \frac{p_a}{RT_p} \quad (21)$$

$$\rho = \frac{72300.4 Pa}{287 \frac{J}{kg \cdot ^\circ K} * 323 ^\circ K} = 0,7749 \frac{kg}{m^3}$$

Cálculo del flujo másico del aire:

Caudal de succión del ventilador 8 l/s o 0,008 m³/s

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

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

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

Cálculo del área aproximada

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

$$\dot{V}_1 = \vec{V}_1 (A_1)$$

$$A_1 = \frac{0,008 \frac{m^3}{s}}{0,10 \frac{m}{s}} = 0,08 m^2$$

Cálculo de la LMTD:

Para el cálculo de la diferencia media térmica logarítmica 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 ello se calcula el calor sensible de cada uno

$$Q_a = \dot{m}_a (c_{p_a}) (\Delta T_a) \quad (22)$$

Dónde:

Q_a = Calor sensible del aire [W]

\dot{m}_a = Flujo másico de aire de enfriamiento [kg/s]

ΔT_a = Diferencia de temperatura del aire de enfriamiento [K]

$$Q_g = \dot{m}_g (c_{p_g}) (\Delta T_g) \quad (23)$$

Dónde:

Q_g = Calor sensible del gas pobre [W]

\dot{m}_g = Flujo másico del gas pobre [kg/s]

ΔT_g = Diferencia de temperatura del aire de enfriamiento [K]

Debido a que el gas es una mezcla de varios gases se procede a calcular las propiedades de la mezcla.

Tabla 12. Composición volumétrica del gas pobre

Composición	Biogás
Hidrógeno (H ₂)	0,18
Monóxido de Carbono (CO)	0,24
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,06
Oxígeno (O ₂)	0,04
Metano(CH ₄)	0,03
Nitrógeno (N ₂)	0,45
Total	1

Fuente: (Collazo Sanmartín , 2015)

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

$$x_i = \frac{y_i M_i}{\sum y_i M_i} \quad (24)$$

Dónde:

x_i = Composición másica del constituyente i [kg/kmol]

y_i = Composición volumétrica del constituyente i [kmol_i/kmol]

M_i = Masa molar del constituyente i [kg/kmol]

Tabla 13. Composición volumétrica del gas pobre

Composición	Biogás	R[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: Autor

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

$$cp = \sum cp_i (x_i) \quad (25)$$

Dónde:

cp= Calor específico a presión constante de la mezcla [kJ/kgK]

cp_i= Calor específico a presión constante del constituyente i [kJ/kgK]

$$cp = 1,234259801 \text{ kJ/kg.K}$$

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

$$R = \sum R_i (x_i) \quad (26)$$

Dónde:

R= Constante particular de la mezcla [kJ/kg.K]

R_i= Constante particular del constituyente i [kJ/kg.K]

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

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

$$\rho_g = \frac{p_a}{RT_g}$$

$$\rho_g = \frac{72300,4 \text{ Pa}}{344,595 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 373 \text{ }^\circ\text{K}} = 0,562941371 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo del flujo másico de gases:

Caudal de los gases 10 l/s o 0,01 m³/s

$$\rho_g = \frac{\dot{m}_g}{\dot{V}_g}$$
$$\dot{m}_g = \left(0,562941371 \frac{kg}{m^3}\right) \left(0,01 \frac{m^3}{s}\right)$$
$$\dot{m}_g = 0,005629 \frac{kg}{s}$$

El calor sensible de los gases será entonces:

$$Q_g = \dot{m}_g (c_{p_g}) (\Delta T_g)$$
$$Q_g = 0,005629 \frac{kg}{s} \left(1,234259801 \frac{KJ}{kg K}\right) (65 K)$$
$$Q_g = 0,4516 \frac{KJ}{kg K}$$

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

$$Q_g = Q_a = \dot{m}_a (c_{p_a}) (\Delta T_a)$$
$$\Delta T_a = \frac{Q_g}{\dot{m}_a (c_{p_a})}$$
$$\Delta T_a = \frac{0,4516 \frac{KJ}{kg K}}{0,006199 \frac{kg}{s} \left(1007 \frac{J}{kg ^\circ C}\right)} = 73,72 K$$
$$LMTD = \frac{\Delta T_a - \Delta T_g}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_g}\right)}$$
$$LMTD = 68,59 K$$

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

El área de transferencia de calor estimada es de

$$Q_g = Q_a = U (A_t) LMTD$$

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

Se selecciona por facilidad de mantenimiento tubería de cobre de ½ plg

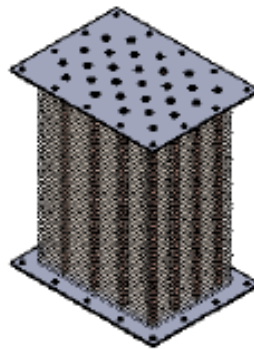
La longitud de tubería será:

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

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

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.

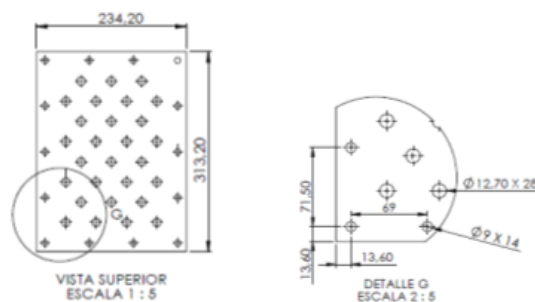
Figura 29. Intercambiador de calor.



Fuente: Autor

3.7.1 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.

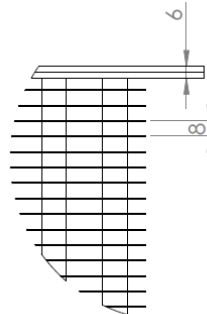
Figura 30. Dimensiones y distribución de la tubería de cobre del intercambiador.



Fuente: Autor

Para las aletas se construyó con placas de aluminio de 1mm de espesor con una separación como se muestra en la figura:

Figura 31. Distribución de las aletas



Fuente: Autor

3.7.2 Cálculo teórico coeficiente global de transferencia de calor

Flujo a través de un banco de tubos. Zukauskas propone el siguiente cálculo para el número de Nusselt través de un banco de tubos.

Tabla 14. Constantes C y m para el banco de tubos en flujo cruzado.

Configuración	$Re_D, \text{máx}$	C	m
Alineado	$10 - 10^2$	0.80	0.40
Escalonado	$10 - 10^2$	0.90	0.40
Alineado	$10^2 - 10^3$	Se aproxima como un cilindro único (aislado)	
Escalonado	$10^2 - 10^3$		
Alineado	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.27	0.63
($S_T/S_L > 0.7$) ^a			
Escalonado	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.60
($S_T/S_L < 2$)			
Escalonado	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.40	0.60
($S_T/S_L > 2$)			
Alineado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.021	0.84
Escalonado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.022	0.84

^aPara $S_T/S_L < 0.7$, la transferencia de calor es ineficiente y los tubos alineados no se deben usar.

Fuente: (INCROPERA, 1999)

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (27)$$

$$\left[\begin{array}{l} N_L \geq 20 \\ 0.7 < Pr < 500 \\ 1000 < Re_D < 2 \times 10^6 \end{array} \right]$$

Dónde:

Nu_D = Número de Nusselt [adimensional]

C y m = Coeficientes para bancos de tubos de flujo cruzado [adimensional]

Re_D = Número de Reynolds [adimensional]

Pr = Número de Prandtl [adimensional]

Pr_s = Número de Prandtl evaluado a temperatura de pared [adimensional]

Donde todas las propiedades excepto Pr_s se evalúan a temperatura filmica, y las constantes C y m se presentan en una lista en la Tabla 13. Si $N_L < 20$, se aplica un factor de corrección, tal que:

$$Nu|_{(NL < 20)} = C_2 Nu|_{(NL \geq 20)} \quad (28)$$

C_2 está dado en la Tabla 14.

Tabla 15. Factor de corrección C_2 para $NL < 20$ ($Re > 10^3$).

NL	1	2	3	4	5	7	10	13	16
Alineado	0,7	0,8	0,86	0,9	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99
Triangular	0,64	0,76	0,84	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99

Fuente: (INCROPERA, 1999)

Para la configuración escalonada, la velocidad máxima ocurre en el plano transversal o en el plano diagonal, en cuyo caso está dada por (INCROPERA, 1999, págs. 8-10, 115-126, 378–380, 424-449,)

$$V_{max} = \frac{V_0 S_T}{S_T - D} \quad (29)$$

Dónde:

$V_{m\acute{a}x}$ = Velocidad máxima de flujo a través del banco [m/s]

V_0 = Velocidad a la entrada del banco [m/s]

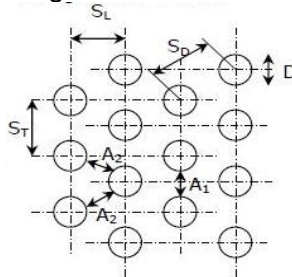
S_T = Distancia vertical entre los tubos en la primera hilera [m]

D = Diámetro del tubo del banco [m]

Chen y Wung validaron la siguiente correlación para el cálculo del número de Nusselt en bancos de tubos lisos. (KREITH, 1993)

$$Nu = .35 \left(\frac{S_T}{S_L} \right)^{0.2} Re^{0.63} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (30)$$

Figura 32. Distribución geométrica de un banco de tubos lisos.



Fuente: (INCROPERA, 1999)

Flujo a través de un banco de tubos con aletas continuas.

Área Exterior. El área total de transferencia de calor consta del área relacionada con los tubos expuestos (área principal) y las aletas (área secundaria).

Área principal.

$$A_p = \pi d_e (L_1 - t N_f L_1) N_t + 2 \left(L_2 L_3 - \frac{\pi d_e^2}{4} N_t \right) \quad (31)$$

$$N_f = \frac{\#aletas}{longitud} \quad (32)$$

Área secundaria:

$$A_f = 2 \left(L_2 L_3 - \frac{\pi d_e^2}{4} N_t \right) N_f L_1 + 2 L_3 t N_f L_1 \quad (33)$$

Área total de transferencia:

$$A = A_p + A_f \quad (34)$$

Dónde:

N_f = Número de aletas sobre unidad de longitud [adimensional]

N_t = Número de tubos [adimensional]

L_1 = Ancho del banco de tubos [m]

L_2 = Ancho de las aletas [m]

L_3 = Altura de las aletas [m]

t = Espesor de las aletas [m]

d_e = Diámetro de los tubos [m]

Área de flujo. Para el arreglo de tubo escalonado, el área libre de circulación mínima podía ocurrir a través de la primera hilera o a través de las diagonales. Donde c es una constante que modifica el arreglo dependiendo la sección bloqueada.

$$A_0 = \left[\left(\frac{L_3}{s_t} - 1 \right) c'' + (s_t - d_e) - (s_t - d_e)tN_f \right] L_1 \quad (35)$$

$$c'' = \begin{cases} 2a'' & \text{si } 2a'' < 2b'' \\ 2b'' & \text{si } 2b'' < 2a'' \end{cases}$$

Las constantes modificadas para s_t para 30° , 45° y 60°

$$2a'' = (s_t - d_e) - (s_t - d_e)tN_f \quad (36)$$

$$b'' = \left[\left(\frac{s_t}{2} \right) + s_L \right]^{0.5} - d_e - (s_t - d_e)tN_f \quad (37)$$

Cálculo del área primaria:

$$A_p = \pi d_e (L_1 - tN_f L_1) N_t + 2 \left(L_2 L_3 - \frac{\pi d_e^2}{4} N_t \right)$$

$$N_f = \frac{\#aletas}{longitud} = 286,79 \frac{aletas}{m}$$

$$A_p = 0,295 \text{ m}^2$$

Área secundaria: con la ecuación (27) determinamos

$$A_f = 2 \left(L_2 L_3 - \frac{\pi d_e^2}{4} N_t \right) N_f L_1 + 2 L_3 t N_f L_1$$

$$A_f = 2,67 \text{ m}^2$$

Área total de transferencia con la ecuación (28) determinamos

$$A = A_p + A_f$$

$$A = (0,295 + 2,67) \text{ m}^2$$

$$A = 2,96 \text{ m}^2$$

Área de flujo se determina por

$$A_0 = \left[\left(\frac{L_3}{s_t} - 1 \right) c'' + (s_t - d_e) - (s_t - d_e)tN_f \right] L_1$$

$$2a'' = (s_t - d_e) - (s_t - d_e)tN_f$$

$$b'' = \left[\left(\frac{s_t}{2} \right) + s_L \right]^{0.5} - d_e - (s_t - d_e)tN_f$$

La corrección de los factores geométricos a'' y b'' se determinan

$$s_t = s_D$$

$$2a'' = (0,026 - 0,00952)m - (0,026 - 0,00952)m * 0,0003m * 286,79 \frac{1}{m}$$

$$2a'' = 0,015m$$

$$b'' = \left[\left(\frac{0,026m}{2} \right)^2 + (0,0228m)^2 \right]^{0.5} - 0,00952m - (0,026 - 0,00952)m * 0,0003m * 286,79 \frac{1}{m}$$

$$b'' = 0,0153m$$

Como $2a'' < 2b''$

$$c'' = 2a''$$

$$A_0 = 0,1045m^2$$

Diámetro hidráulico:

$$D_h = \frac{4\sigma}{\alpha}$$

$$\sigma = \frac{A_0}{A_{fr}}$$

$$A_{fr} = L_1 L_3$$

$$\sigma = \frac{0,1045m^2}{(0,265 * 0,229)m^2} = 1,73$$

$$\alpha = \frac{A}{V}$$

$$V = L_1 L_2 L_3$$

$$\alpha = \frac{2,965 m^2}{(0,265 * 0,088 * 0,229) m^3} = 557,64 m^{-1}$$

$$D_h = \frac{4 * 1,73}{557,64 m^{-1}} = 0,0124 m$$

Numero de Reynolds:

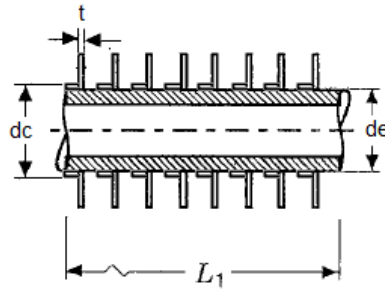
$$Re = \frac{\rho_a V_{max} d_c}{\mu}$$

Velocidad máxima de flujo dentro del banco.

$$V_{max} = \frac{V_0 S_T}{S_T - D}$$

$$V_{max} = \frac{(0,7653 \frac{m}{s})(0,0255m)}{(0,0255 - 0,00952)m} = 1,221 \frac{m}{s}$$

Figura 33. Diámetro de collar del banco de tubos de aletas continuas.



Fuente: Autor

Diámetro de collarín. Debido a la escasa información que existe respecto a este modelo de banco de tubos, se asume que el diámetro de collar, es equivalente al ajuste mecánico que poseen las placas con los tubos.

$$d_c = d_e + 2t \quad (38)$$

$$d_c = (0,00952 + 2 * 0,0003)m = 0,01012m$$

$$Re = \frac{(0,7653 \frac{kg}{m^3})(1,221 \frac{m}{s})(0,01012m)}{1,98 * 10^{-5} \frac{kg}{m s}} = 477,6$$

Número de Nusselt. En flujo laminar completamente desarrollado, el número de Nusselt es en teoría constante, independiente de Pr y también de Re. Dependiendo principalmente del factor de fricción j. (RAMESH, 2003, págs. 510 - 521, 572 - 580)

$$Nu = \frac{j Re}{Pr^{-1/3}} \quad (39)$$

El factor j se relaciona con la pérdida de presión en el banco para ello Wang y Chi suministran las siguientes correlaciones, factor J para arreglos de tubos con aletas planas.

$$j = 0.108Re^{-0.29} \left(\frac{s_l}{s_t}\right)^{c_1} \left(\frac{p_f}{d_e}\right)^{-1.084} \left(\frac{p_f}{D_h}\right)^{c_2} \quad \text{para } N_L = 1 \quad (40)$$

$$j = 0,086Re^{c_3} N_L^{c_4} \left(\frac{p_f}{d_e}\right)^{c_5} \left(\frac{p_f}{D_h}\right)^{c_6} \left(\frac{p_f}{s_t}\right)^{-0,93} \quad \text{para } N_L \geq 2 \quad (41)$$

Dónde:

$$c_1 = 1.9 - 0.23 \ln Re \quad (42)$$

$$c_2 = 0.236 + 0.126 \ln Re \quad (43)$$

$$c_3 = 0.361 - \frac{0,042 N_L}{\ln Re} + 0,158 \ln \left[N_L \left(\frac{p_f}{d_e}\right)^{0,41} \right] \quad (44)$$

$$c_4 = 1,224 - \frac{0,076 \left(\frac{s_l}{D_h}\right)^{1,42}}{\ln Re} \quad (45)$$

$$c_5 = 0.083 + \frac{0.058 N_L}{\ln Re} \quad (46)$$

$$c_6 = 5,735 + 1,21 \ln \frac{Re}{N_L} \quad (47)$$

Las ecuaciones 33 y 34 son válidas para los siguientes rangos:

$$300 \leq Re_{dc} \leq 20000$$

$$6.9 \leq dc \leq 13.6$$

$$1.3 \leq Dh \leq 9.37 \text{ mm}$$

$$20.4 \leq St \leq 31.8 \text{ mm}$$

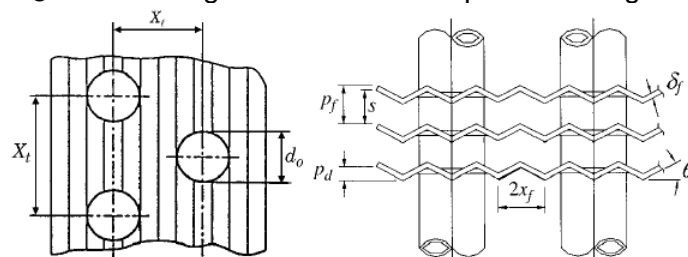
$$12.7 \leq Sl \leq 32 \text{ mm}$$

$$1 \leq p_f \leq 8.7 \text{ mm}$$

$$1 \leq N_L \leq 6$$

Factor J para arreglos de tubos con aletas corrugadas.

Figura 34. Arreglos de bancos con placas corrugadas.



Fuente: (RAMESH, 2003)

$$j = -0,324Re^{c_1} \left(\frac{p_f}{S_t}\right)^{c_2} (\tan\theta)^{c_3} \left(\frac{S_l}{S_t}\right)^{-0,93} N_L^{0,428} \quad (48)$$

Dónde:

$$c_1 = -0,2290,115 \left(\frac{p_f}{d_c}\right)^{0,6} \left(\frac{S_t}{d_h}\right)^{0,54} N_L^{-0,284} \ln(0,5 * \tan\theta) \quad (49)$$

$$c_2 = -0,251 - \frac{0,232N_L^{1,37}}{\ln Re - 2,303} \quad (50)$$

$$c_3 = -0,439 \left(\frac{p_f}{d_h}\right)^{0,6} \left(\frac{S_l}{S_t}\right)^{-1,75} N_L^{-0,93} \quad (51)$$

$$c_4 = 0,502 + [\ln Re - 2,303] \quad (52)$$

Las ecuación 71 es válida para tubos pequeños de 7.94 a 9.53 mm y opera dentro de los siguientes rangos:

$$300 \leq Re_{dc} \leq 8000$$

$$8.58dc \leq 10.38$$

$$1.53 \leq Dh \leq 4.52 \text{ mm}$$

$$St = 25.48 \text{ mm}$$

$$19.05 \leq Sl \leq 25.04 \text{ mm}$$

$$1.21 \leq p_f \leq 3.66 \text{ mm}$$

$$1 \leq N_L \leq 6$$

$$14,5 \leq \theta \leq 18,5$$

$$4,76 \leq x_f \leq 6,35 \text{ mm}$$

$$1,18 \leq p_d \leq 1,68 \text{ mm}$$

Número de Nusselt:

Ecuación 32.

$$Nu = \frac{j Re}{Pr^{-1/3}}$$

Calculo del número de Nusselt para aletas planas.

$$j = 0,086Re^{c_3} N_L^{c_4} \left(\frac{p_f}{d_e}\right)^{c_5} \left(\frac{p_f}{D_h}\right)^{c_6} \left(\frac{p_f}{S_t}\right)^{-0,93}$$

$$c_3 = 0,361 + \frac{0,042N_L}{\ln Re} + 0,158 \ln \left[N_L \left(\frac{p_f}{d_e}\right)^{0,41} \right]$$

$$c_3 = 0,244$$

$$c_4 = 1,224 - \frac{0,076 \left(\frac{S_L}{D_h} \right)^{1,42}}{\ln Re}$$

$$c_4 = 1,224 - \frac{0,076 \left(\frac{0,0228m}{0,0124m} \right)^{1,42}}{\ln(477,6)}$$

$$c_4 = 1,253$$

Ecuación 69.

$$c_5 = 0,083 + \frac{0,058 N_L}{\ln Re}$$

$$c_5 = 0,0454$$

Ecuación 70.

$$c_6 = 5,735 + 1,21 \ln \frac{Re}{N_L}$$

$$c_6 = 5,735 + 1,21 \ln \frac{477,6}{4}$$

$$c_6 = 0,0518$$

$$j = 0,086 + 477,6^{-0,244} + 4^{-1,253} + \left(\frac{0,003}{0,00952} \right)^{-0,0454} * \left(\frac{0,003}{0,0124} \right)^{0,0518} * \left(\frac{0,003}{0,0228} \right)^{-0,93}$$

$$j = 2,17 * 10^{-2}$$

$$Nu = \frac{2,17 * 10^{-2} + 477,6}{0,7016^{-1,3}}$$

$$Nu_p = 9,205$$

Coefficiente de convección del aire (ha).

$$h_a = \frac{Nu K_a}{d_c}$$

$$h_{a_p} = \frac{9,205 * 0,024 \frac{W}{m^2 C}}{0,01012 m} = 21,83 \frac{W}{m^2 C}$$

Eficiencia de las aletas. En la práctica la transferencia de calor varía en la superficie de la placa, probablemente cambia entre el interior y la salida del intercambiador. Una aproximación muy común para predecir la eficiencia fue desarrollada por Schmidt, el método es largo pero tiene muchas ventajas cuando se requiere un cálculo analítico.

$$\eta = \frac{\tanh(mr\phi)}{(mr\phi)} \quad (53)$$

Dónde m y ϕ se definen en las siguientes ecuaciones.

$$m = \left[\frac{2h}{ky} \right]^{1/2} \quad (54)$$

$$m = \left[\frac{2 * 21,83 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}{173 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} * 0,0003m} \right]^{1/2} = 29 m^{-1}$$

$$\phi = \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \left[1 + 0,35 \ln \left(\frac{R}{r} \right) \right] \quad (55)$$

Para placas continuas de arreglo triangular la sección de transferencia por tubo es equivalente a un hexágono, que puede ser analizado por las relaciones empíricas de Schmidt.

$$\frac{R}{r} = 1,27 \psi (\beta - 0,3)^{1/2} \quad (56)$$

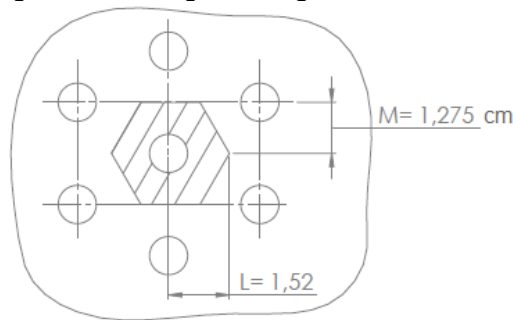
Dónde

$$\psi = \frac{M}{r} \quad (57)$$

$$\beta = \frac{L}{M} \quad (58)$$

M y L se determinan gráficamente, donde L siempre debe ser mayor o igual que M.

Figura 35. Arreglo hexagonal de los tubos.



Fuente: Autor.

$$\psi = \frac{0,01275 m}{0,00476 m} = 2,678$$

$$\beta = \frac{0,0152 m}{0,01275 m} = 1,192$$

$$\frac{R}{r} = 1,27 * 2,678 (1,192 - 0,3)^{1/2} = 3,21$$

$$\phi = (3,21 - 1) [1 + 0,35 \ln(3,21)] = 3,113$$

$$\eta = \frac{\tanh(29m^{-1} + 0.00476m + 3,113)}{(29m^{-1} + 0.00476m + 3,113)} * 0,9427$$

Posteriormente la eficiencia de la placa se define como

$$\begin{aligned}\eta_s &= 1 + \frac{A_f}{A}(1 + \eta) \\ \eta_s &= 1 + \frac{2,67}{2,96}(1 + 0,9427) \\ \eta_s &= 95,1\%\end{aligned}\tag{59}$$

Resistencia térmica del aire (R1).

$$\begin{aligned}R_1 &= \frac{1}{h_a A \eta} \\ R1_p &= \frac{1}{21,83 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 2,965m^2 * 0,951} = 0,01625 \frac{^\circ C}{W} \\ R1_c &= \frac{1}{57,3 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 2,965m^2 * 0,951} = 0,0062 \frac{^\circ C}{W}\end{aligned}$$

Resistencia térmica por conducción (R2).

La conductividad del cobre se la tomo a un valor medio de temperatura entre la del vapor y la de los gases ya que a esta temperatura inicia la transferencia de calor.

$$\begin{aligned}T_{cu} &= \frac{Tg_1 + Ta_1}{2} \\ T_{cu} &= \frac{(100 + 21)^\circ C}{2} = 60,5^\circ C\end{aligned}$$

Conductividad del cobre

$$\begin{aligned}K_{cu} &= 392,22 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \\ R_2 &= \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi K_{cu} L} = 2,85 \times 10^{-4} \frac{^\circ C}{W}\end{aligned}$$

Coefficiente de convección de los gases

$$Re_{gases} = \frac{V_{gases} Dh_{extr}}{\nu_{gases}} = \frac{0,0 \frac{m}{s} (2,3882 m)}{0,00000147 \frac{m^2}{s}} = 1299772,47$$

$$Nu_{gases} = 0,027 Re_{gases}^{0,805} Pr_{gases}^{1/3} = 2031,998171$$

$$Nu_{gases} = \frac{h_{\infty} Dh_{gases}}{K_{gases}} \quad ; \text{despejar } h_{\infty}$$

$$h_{\infty} = \frac{Nu_{gases} K_{gases}}{Dh_{gases}} = \frac{(2031,998171) \left(0,02476 \frac{W}{m \cdot K}\right)}{2,3882 m} = 21,06586377 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R_3 = \frac{1}{21,06 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 0,23677 m^2} = 3,8935 * 10^{-4} \frac{^\circ C}{W}$$

Coeficiente global de transferencia de calor teórico.

$$U = \frac{1}{A(R_1 + R_2 + R_3)}$$

$$U = 29,93 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Calor conducido por el banco.

Eficiencia del intercambiador de calor:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$$

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}}$$

$$C_{min} = m_a C_p = 0,0423 \frac{kg}{s} * 1008,21 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} = 42,647 \frac{W}{^\circ C}$$

$$NUT = \frac{24,5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 2,965 m^2}{42,647 \frac{W}{^\circ C}} = 1,707$$

$$\varepsilon = 1 - \exp(-1,707) = 0,8186$$








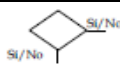



$$\varepsilon = 81,86 \%$$

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

Al finalizar la etapa de diseño y selección de equipos, éste capítulo inicia describiendo detalladamente el proceso de construcción de las partes integrantes del conjunto y consecutivamente se indica los pasos para el acoplamiento e instalación del sistema y accesorios en el gasificador Downdraft.

Tabla 16. Código ASME

Símbolo	Significado	Para que se utiliza
	Origen	Identifica el paso previo que da origen al proceso, no forma en sí parte del nuevo proceso.
	Operación	Cada vez que un documento es cambiado intencionalmente en cualquiera de sus características.
	Inspección	Cuando un documento o paso del proceso se verifica, en términos de: la calidad, cantidad o características. Es un paso de control dentro del proceso cuando es examinado.
	Transporte	Cuando un documento/equipo se mueve o traslada a otra oficina y/o funcionario.
	Demora	Cuando un documento/proceso se encuentra detenido, ya sea en la ejecución de otra operación o el tiempo de respuesta es lento.
	Almacenamiento	Indica el depósito permanente de un documento o equipo. También se puede utilizar para guardar o proteger, de un traslado no autorizado.
	Almacenamiento Temporal	Indica el depósito temporal de un documento o equipo, mientras se da inicio el siguiente paso.
	Decisión	Indica un punto dentro del flujo en que son posibles varios caminos alternativos.
	Líneas de flujo	Conecta los símbolos señalando el orden en que se deben realizar las distintas operaciones.
	Actividades Combinadas Operación y Origen	Las actividades combinadas se dan cuando se simplifican dos actividades en un solo paso. En este caso, esta actividad indica que se inicia el proceso a través de actividad que implica una operación.
	Actividades Combinadas Inspección y Operación	Este caso, indica que el fin principal es efectuar una operación, durante la cual puede efectuarse alguna inspección.

Fuente: <http://www.asme.org/>

Para cada actividad de transporte, almacenamiento, operación y pruebas del equipo instalado, se tomará en cuenta el cumplimiento de la normativa ASME vigente, de manera que, los procesos estén dentro de los parámetros técnicos, garantizando eficiencia y resultados óptimos.

4.1 Diagrama de proceso para construcción de la placa orificio

A continuación se muestra la secuencia general del proceso de construcción e instalación sistema de medición de caudal mediante placa orificio:

4.1.1 Construcción de las placas orificio. La placa se fabrica en su totalidad con lámina de acero inoxidable, mediante operaciones de corte y perforado. Sus medidas generales se indican en los parámetros de diseño de la norma ISO-5167.

Figura 36. Esquema de placa orificio



Fuente: Autor

4.1.2 Bridas de acero. Las bridas fueron fabricadas en su totalidad con tubo de acero circular de 2 plg, 2 láminas de acero galvanizado de 100 mm de diámetro externo con una perforación concéntrica de 2 plg cada una, mediante operaciones de corte, perforado y soldado.

Figura 37. Bridas de acero



Fuente: Autor

4.2 Ensamble del sistema de medición de caudal mediante placa orificio

La primera placa orificio se acopla a las bridas con cuatro pernos de 3/4 plg, el tubo de 2 plg, 2 uniones universales, un codo de 90°, neopros de cobre con sus respectivos collarines de 2 plg, 2 empaques de papel victoria, una válvula de bola, y mangueras de

salida al manómetro en U.

Figura 38. Ensamble medidor de caudal de PVC – placa orificio



Fuente: Autor

Ensamble del medidor de caudal por placa orificio de acero. La segunda placa orificio se acoplan con la bridas de acero con 6 pernos de 3/8 plg, y mangueras de salida al manómetro en U.

Figura 39. Ensamble medidor de caudal de acero – placa orificio



Fuente: Autor

4.3 Actividades de construcción del sistema de enfriamiento

- *Elaboración de planos para construcción.* Una vez realizado el diseño, se escoge el material con las características adecuadas para los elementos a construir, teniendo en cuenta la función que va a cumplir cada uno de estos para prevenir posteriores averías, se adjuntarán en la parte final de este documento.
- *Requerimiento de materiales y equipos.* Basados en el criterio de diseño que sugiere la norma ecuatoriana de la construcción se podrá estimar la cantidad necesaria de material a utilizar en el intercambiador de calor.
- *Recepción del material.* Cada material adquirido pasará por una exhausta revisión para evitar fallas futuras, el almacenamiento del material se hará según la llegada de cada uno de ellos en el lugar que se va a realizar la construcción y

ensamblaje.

4.4 Ensamble del sistema de enfriamiento

4.4.1 *Ensamble sección intercambiador de calor.* La sección de condensación se ensamblará con 48 placas de aluminio (253x174x3) mm y 28 tubos de cobre $\Phi = 1,27$ mm.

Figura 40. Ensamble sección intercambiador de calor.



Fuente: Autor

4.4.2 *Ensamble del depurador.* El depurador se acopla a la brida de $\Phi = 114$ mm a través de soldadura tipo 6011.

Figura 41. Ensamble del depurador.



Fuente: Autor

4.4.3 *Ensamble de la chimenea.* La chimenea se conecta con la brida de $\Phi = 114$ mm a través de soldadura tipo 6013.

Figura 42. Ensamble de la chimenea.



Fuente: Autor

4.4.4 *Ensamble sección intercambiador de calor. - cubierta.* La sección de condensación se acoplará a la admisión y salida de gas a través de dos tapas con 14 tornillo (5/16 plg x 1 ¼ plg)

Figura 43. Ensamble sección intercambiador de calor. - cubierta



Fuente: Autor

4.5 Descripción de procesos y métodos por elemento del sistema de enfriamiento

4.5.1 *Construcción del intercambiador de calor.* Esta parte se fabricó con láminas de acero negro laminado en caliente AISI/SAE 1020, aluminio y tubos de cobre por medio de operaciones de corte, extrusión y soldado. Las dimensiones se muestran en el plano adjunto

Figura 44. Sección del intercambiador de calor.



Fuente: Autor

4.5.2 *Chimenea.* La chimenea se fabricó de acero negro AISI/SAE 1020 en su totalidad, mediante proceso de corte y soldadura las dimensiones se obtuvieron del plano adjunto.

Figura 45. Chimenea



Fuente: Autor

4.5.3 *Depurador.* El depurador se fabricó al igual que la chimenea de acero negro AISI/SAE 1020 en su totalidad, mediante proceso de corte y soldadura, las dimensiones se obtuvieron del plano adjunto.

Figura 46. Depurador



Fuente: Autor

4.5.4 *Cubierta.* La cubierta se fabricó de acero negro AISI/SAE 1020 en su totalidad, mediante proceso de corte y soldadura las dimensiones se obtuvieron del plano adjunto.

Figura 47. Depurador



Fuente: Autor

4.6 Actividades previas a la fase de construcción del el sistema de filtrado

- *Elaboración de planos para construcción.* Después de realizar el diseño, se selecciona los materiales, accesorios e instrumentos, se elaboran los planos de construcción, que no es otra cosa que, un conjunto de figuras a escala en los cuales se detallan todas las medidas necesarias para la construcción de cada una de las piezas del equipo, así como su posición en el ensamble general. Los planos están adjuntos al final de este documento.
- *Requerimiento de materiales y equipos.* Con la ayuda de los planos es posible estimar la cantidad de material e insumos a utilizar en la construcción de las partes del filtro.
- *Recepción del material.* El material adquirido es inspeccionado para descartar fallas, y es almacenado en la bodega del lugar destinado a la construcción.

4.7 Descripción de procesos y métodos para el sistema de filtrado

4.7.1 *Aislamiento de la cámara de filtrado.* La cámara de filtrado es un tanque previamente elaborado de 42 galones, mediante operaciones de amarra con alambre galvanizado de 1 mm, se colocó lana de vidrio de espesor de 1 plg.

Figura 48. Cámara de filtrado



Fuente: Autor

4.7.2 *Cilindro exterior.* Fue fabricado en su totalidad con lámina de acero estructural SAE 1018, mediante operaciones de corte, rolado y soldado, y posterior mente ensamblado con la cámara de filtrado previamente aislada térmicamente. Sus medidas generales se indica en el plano.

Figura 49. Cámara de filtrado aislada con cilindro exterior.



Fuente: Autor

Figura 50. Cámara de filtrado aislada y ensamblada al cilindro exterior mediante bridas



Fuente: Autor

4.7.3 *Cámara de recolección de gases y cono para depósito de sedimentos.* Fue fabricado en su totalidad con lámina de acero estructural SAE 1018, mediante operaciones de corte, rolado y soldado. Sus medidas generales se indica en el plano

Figura 51. Cilindro exterior de la cámara de recolección de gases aislado térmicamente.



Fuente: Autor

Figura 52. Cámara de recolección de gases y cono para depósito de sedimentos.



Fuente: Autor

Figura 53. Cámara de recolección de gases montando al cilindro exterior aislado



Fuente: Autor

4.7.4 *Distribución y perforación de la cámara donde van hacer ubicados las tuercas en las que se acoplan los filtros.* Las cavidades en las que se instalaron las tuercas fueron instaladas mediante operaciones de cortado (plasma), alineado y nivelado, sus medidas generales se indican en el plano.

Figura 54. Pernos y tuercas de los filtros.



Fuente: Autor

Figura 55. Cámara de filtrado con cavidades par localización de filtros.



Fuente: Autor

4.7.5 *Filtros roscados.* Los filtros roscados fueron fabricados con barra perforada SAE 1018 para perno y tuerca, para la jaula de filtrado se utilizó varilla lisa de diámetro 8mm, mediante operaciones de torneado, roscado, corte, doblado y soldado. Sus medidas generales se indican en el plano.

Figura 56. Filtros roscados



Fuente: Autor

4.7.6 *Entrada y salidas de gases.* Fue fabricado con tubería de 4 plg SAE 1018 y bridas previamente elaboradas, mediante operaciones de corte y soldado. Sus medidas generales se indica en el plano.

Figura 57. Entrada y salida de gases



Fuente: Autor

4.7.7 *Estructura.* La estructura soporte fue fabricada en su totalidad con Tubo circular de 2 plg x 2 mm de espesor, mediante operaciones de corte, y soldado. Sus medidas generales se indican en el plano.

- Equipo y herramientas utilizadas: Flexómetro, trozadora, rayador, amoladora, soldadora de arco eléctrico, compresor, pistola para pintar.
- Material utilizado: Tubo redondo de 2 plg y 2 mm de espesor, masilla, lijas, pintura anticorrosiva y diluyente.
- Consumos adicionales: Electrodo E-6011, disco de corte, discos de desbaste, lijas, pintura anti corrosiva.

CAPITULO V

5. FASE EXPERIMENTAL

5.1 Pruebas de funcionamiento del gasificador

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.

5.1.1 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 una pequeña braza en la parte más baja del gasificador, es una zona que se ubica justo antes del lugar donde se producirá la reducción.

Figura 58. Encendido del gasificador.



Fuente: Autor.

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 anterior de aire refrigera la tubería evitando que esta, debido al calor, se deforme.

Figura 59. Instalación del medidor de caudal 1 PVC.



Fuente: Autor

Figura 60. Instalación del medidor de caudal 2 acero.



Fuente: Autor

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.

Figura 61. Verificación de funcionamiento de los medidores de caudal.



Fuente: Autor

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

Figura 62. Calentamiento del gasificador



Fuente: Autor

Una vez alcanzado el tiempo indicado, se agrega una cantidad mayor de biomasa, se recuerda que el dato teórico del gasificador es un procesamiento de 40 kg/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.

Figura 63. Registro de peso de biomasa a ser procesada.



Fuente: Autor

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.

Figura 64. Cierre de puertas en el equipo.



Fuente: Autor

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

Figura 65. Combustión del gas pobre.



Fuente: Autor.

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.

Figura 66. Combustión antes de finalizar las pruebas.



Fuente: Autor

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 67. Lectura de presión diferencial en el medidor 1 PVC



Fuente: Autor.

Figura 68. Lectura de presión diferencial en el medidor 2



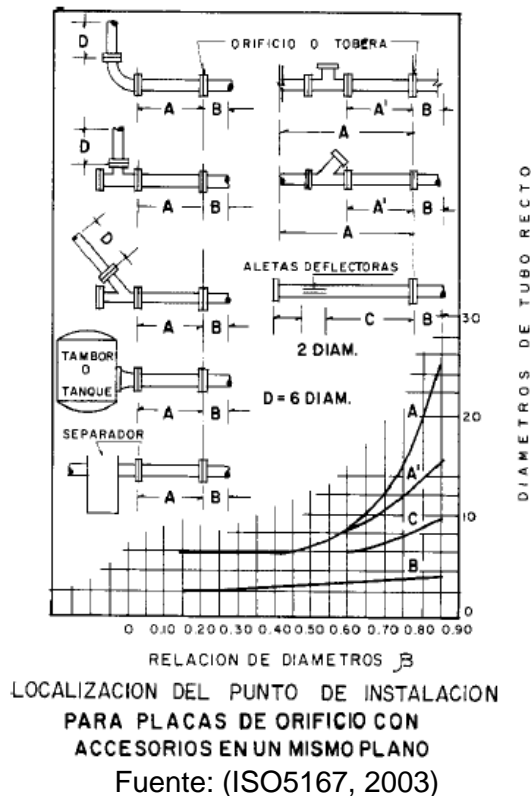
Fuente: Autor

La fase experimental atiende a los medidores de caudal, dado que la misma Norma ISO 5167, indica que al construirse un equipo de medición se deben realizar pruebas para estimar que los valores obtenidos mediante la ecuación sean correctos. El valor de error aceptable es de $\pm 5\%$, según normativa.

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

Las pruebas consisten en una comparación entre los datos obtenidos por la ecuación, caudal teórico, y una medición a través de un equipo medidor de caudal.

Figura 69. Recomendaciones de instalación para el ventilador



Para el caso de estudio, los valores reales se obtienen al usar un anemómetro para medir la velocidad del flujo de aire a la salida de una tubería y a este valor multiplicarlo por el área, atendiendo a la ecuación de continuidad, a este caudal se lo llama experimental u observado.

Un ventilador será conectado a la tubería de PVC o Acero (según sea el caso) posteriormente se instala una válvula de bola para controlar el paso de aire, la norma indica que deben ubicarse a 6 diámetros de la tubería

Al final de la tubería se mide la velocidad con un anemómetro digital, y la presión diferencial se la aprecia en el tubo en U, tal como se muestra en las imágenes. El tubo en U contiene acetona comercial.

Figura 70. Forma de instalación de la placa orificio para medición de caudal.



Fuente: Autor.

Para cada uno de los medidores se procede a tomar 100 datos en total, divididos en 5 experimentación de 20 datos cada una, es decir, con la ayuda de la válvula, se controla el paso de caudal variando la apertura de la misma, la válvula solo puede girar 90°, como cada experimentación posee 20 datos, las posiciones de la válvula son aproximadamente correspondientes a la división del ángulo recto en 20 partes.

En cada experimentación se genera un modelo de regresión, este análisis se lo realizará con la ayuda de Excel, de manera que con la ecuación obtenida sería:

$$V = f(h) \quad (60)$$

Dónde:

V = Velocidad del aire [m/s]

h = Diferencial de alturas medido en el tubo en U [m]

Figura 71. Medición de la presión diferencial en el tubo en U.



Fuente: Autor.

Conociendo el valor del diámetro de la tubería, se obtiene el área, y por la ecuación de continuidad tendríamos el dato de caudal. Finalmente se llegaría entonces a tener una expresión matemática y experimental del caudal en función del diferencial de alturas.

Se obtiene, por tanto 5 ecuaciones distintas, y también una sexta ecuación que procesa los 100 datos completamente, el modelo de regresión que presenta el mejor valor de correlación, conocido como R^2 , es el polinomial de grado 4, es decir que la ecuación de la velocidad del aire en función de la diferencia de alturas toma la forma:

$$V = ah^4 + bh^3 + ch^2 + dh + e \quad (61)$$

Dónde:

a, b, c, d, e = Constantes numéricas del modelo de regresión.

De las 5 ecuaciones distintas se determina el valor promedio de cada una de las constantes del modelo de regresión, $(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}, \bar{e})$.

En el ANEXO C y D, se encuentra todos los valores calculados para comparar los valores entre el caudal experimental Q_e con el caudal real Q_r ; tanto para el medidor 1 como para el medidor de caudal 2 correspondientemente. Como fue mencionado en el acápite de diseño de la placa orificio el valor de C_d varía en función del valor de la velocidad de flujo, teniendo un promedio de 0,6068 para el caso del medidor 1, y de 0,6172 para el medidor 2; datos que comparados con la tabla son muy semejantes.

En un caudalímetro por presión diferencial si se tiene que el fluido al cual se mide el caudal no es el mismo, se tiene un error de cálculo. Esto se debe a que se está estimando la diferencia de alturas con acetona, mientras que el fluido que se está

midiendo es aire. Lo que se debe hacer es el pasar los milímetros de columna de acetona a milímetros de columna de aire, de manera que los cálculos se tengan en función de un mismo fluido, una columna de un líquido más denso es menor a la columna que marcaría un líquido menos denso.

5.2 Comprobación del medidor de caudal 1, material PVC.

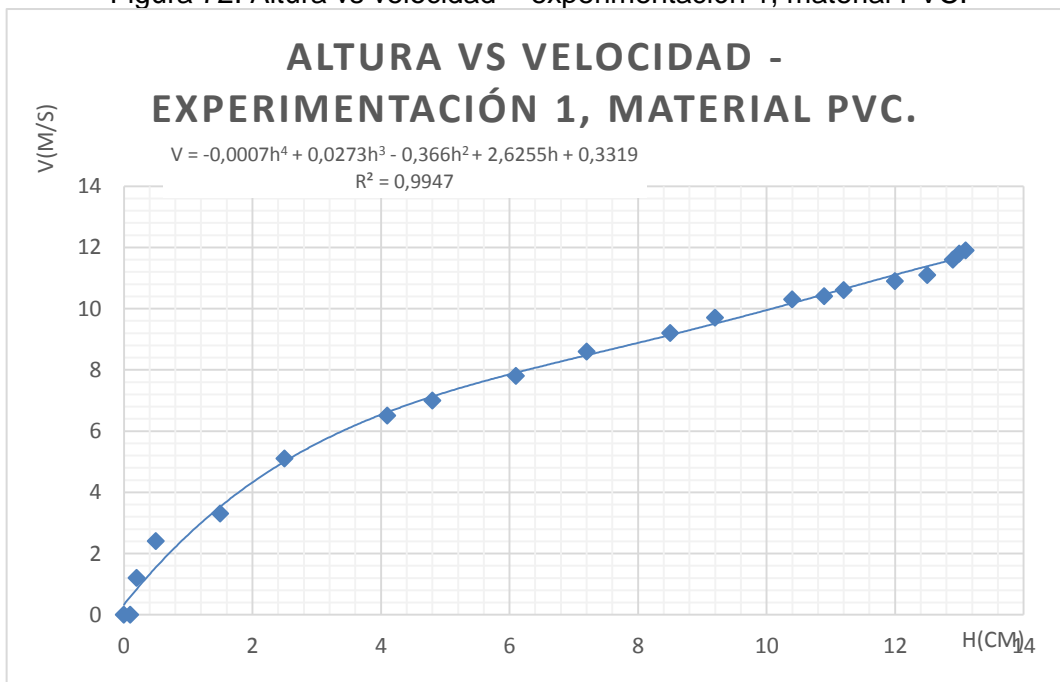
5.2.1 Experimentación 1, material PVC.

Tabla 17. Altura vs velocidad - experimentación 1, material PVC.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	8,5	9,2
0,1	0	9,2	9,7
0,2	1,2	10,4	10,3
0,5	2,4	10,9	10,4
1,5	3,3	11,2	10,6
2,5	5,1	12	10,9
4,1	6,5	12,5	11,1
4,8	7	12,9	11,6
6,1	7,8	13	11,8
7,2	8,6	13,1	11,9

Fuente: Autor.

Figura 72. Altura vs velocidad - experimentación 1, material PVC.



Fuente: Autor.

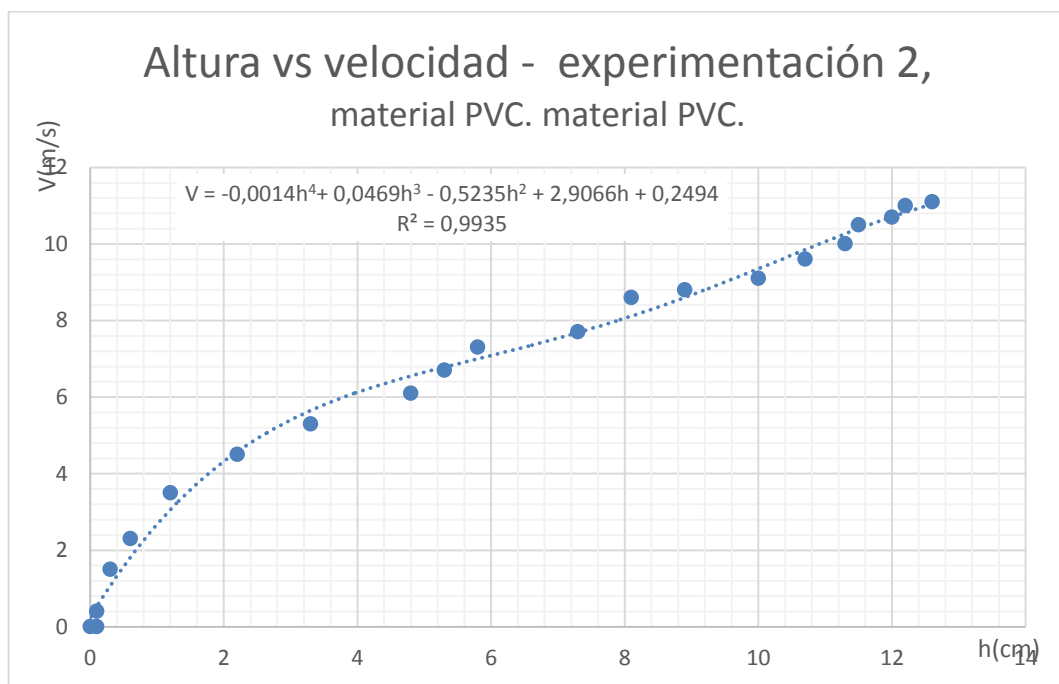
5.2.2 Experimentación 2, material PVC.

Tabla 18. Altura vs velocidad - experimentación 2, material PVC.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	5,8	7,3
0,1	0	7,3	7,7
0,1	0,4	8,1	8,6
0,3	1,5	8,9	8,8
0,6	2,3	10	9,1
1,2	3,5	10,7	9,6
2,2	4,5	11,3	10
3,3	5,3	11,5	10,5
4,8	6,1	12	10,7
5,3	6,7	12,2	11

Fuente: Autor.

Figura 73. Altura vs velocidad - experimentación 2, material PVC.



Fuente: Autor.

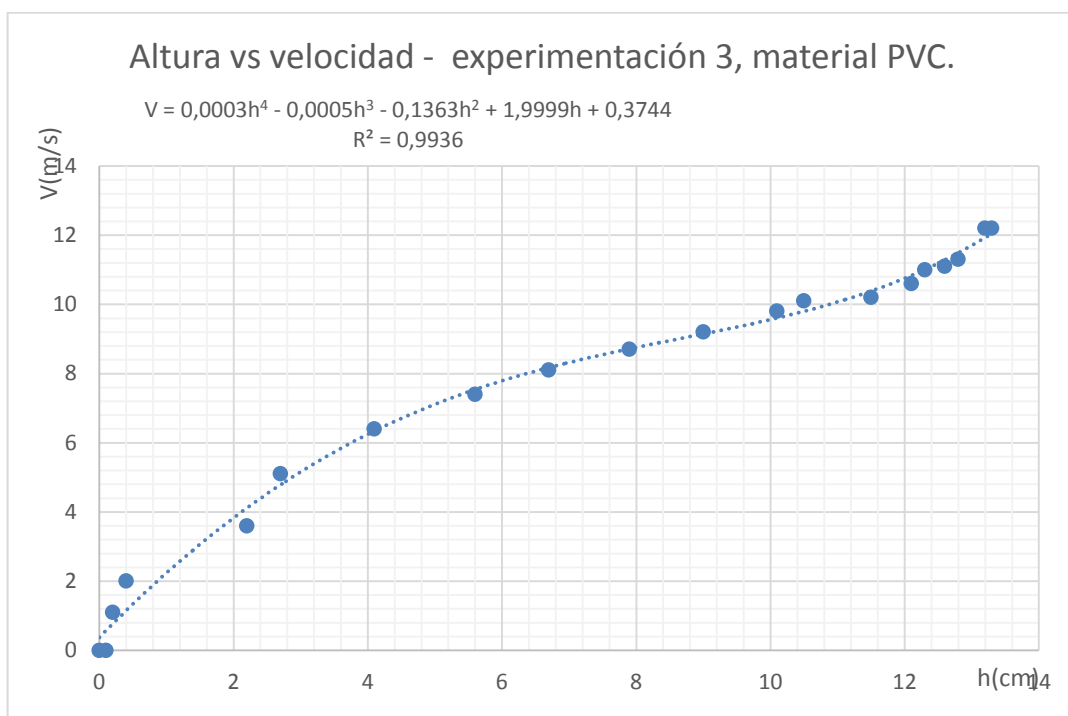
5.2.3 Experimentación 3, material PVC.

Tabla 19. Altura vs velocidad - experimentación 3, material PVC.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	9	9,2
0,1	0	10,1	9,8
0,2	1,1	10,5	10,1
0,4	2	11,5	10,2
2,2	3,6	12,1	10,6
2,7	5,1	12,3	11
4,1	6,4	12,6	11,1
5,6	7,4	12,8	11,3
6,7	8,1	13,2	12,2
7,9	8,7	13,3	12,2

Fuente: Autor.

Figura 74. Altura vs velocidad - experimentación 3, material PVC.



Fuente: Autor.

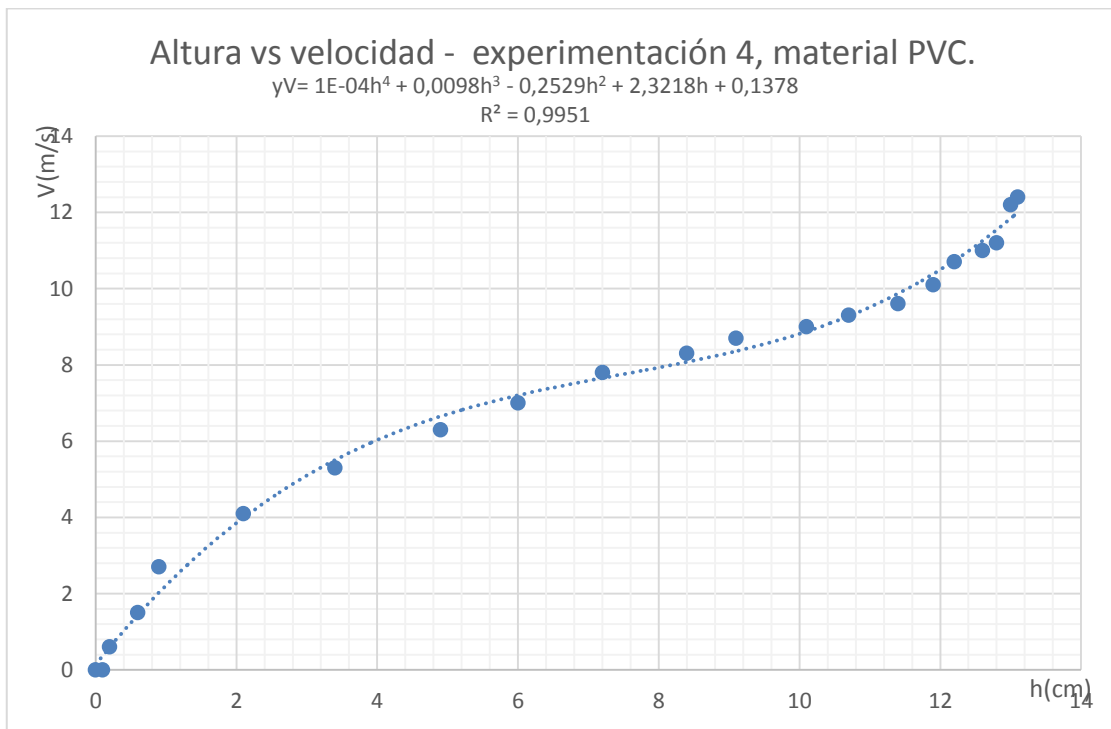
5.2.4 Experimentación 4, material PVC.

Tabla 20. Altura vs velocidad - experimentación 4, material PVC.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	9,1	8,7
0,1	0	10,1	9
0,2	0,6	10,7	9,3
0,6	1,5	11,4	9,6
0,9	2,7	11,9	10,1
2,1	4,1	12,2	10,7
3,4	5,3	12,6	11
4,9	6,3	12,8	11,2
6	7	13	12,2
7,2	7,8	13,1	12,4
8,4	8,3		

Fuente: Autor.

Figura 75. Altura vs velocidad - experimentación 4, material PVC.



Fuente: Autor.

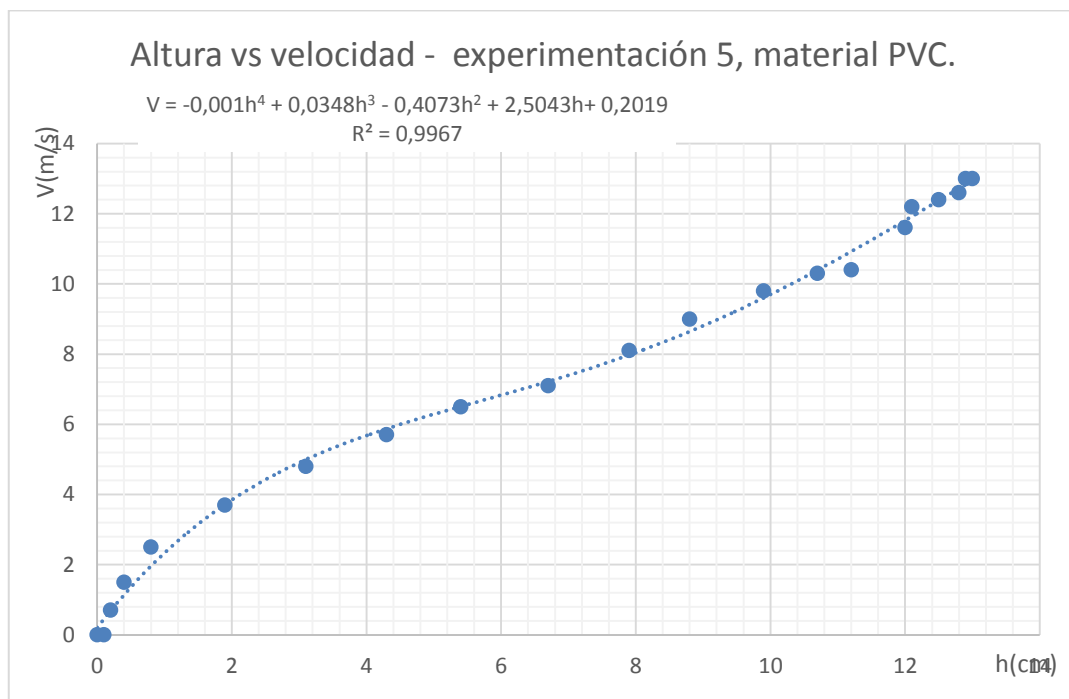
5.2.5 Experimentación 5, material PVC.

Tabla 21. Altura vs velocidad - experimentación 5, material PVC.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	8,8	9
0,1	0	9,9	9,8
0,2	0,7	10,7	10,3
0,4	1,5	11,2	10,4
0,8	2,5	12	11,6
1,9	3,7	12,1	12,2
3,1	4,8	12,5	12,4
4,3	5,7	12,8	12,6
5,4	6,5	12,9	13
6,7	7,1	13	13
7,9	8,1		

Fuente: Autor.

Figura 76. Altura vs velocidad - experimentación 5, material PVC.



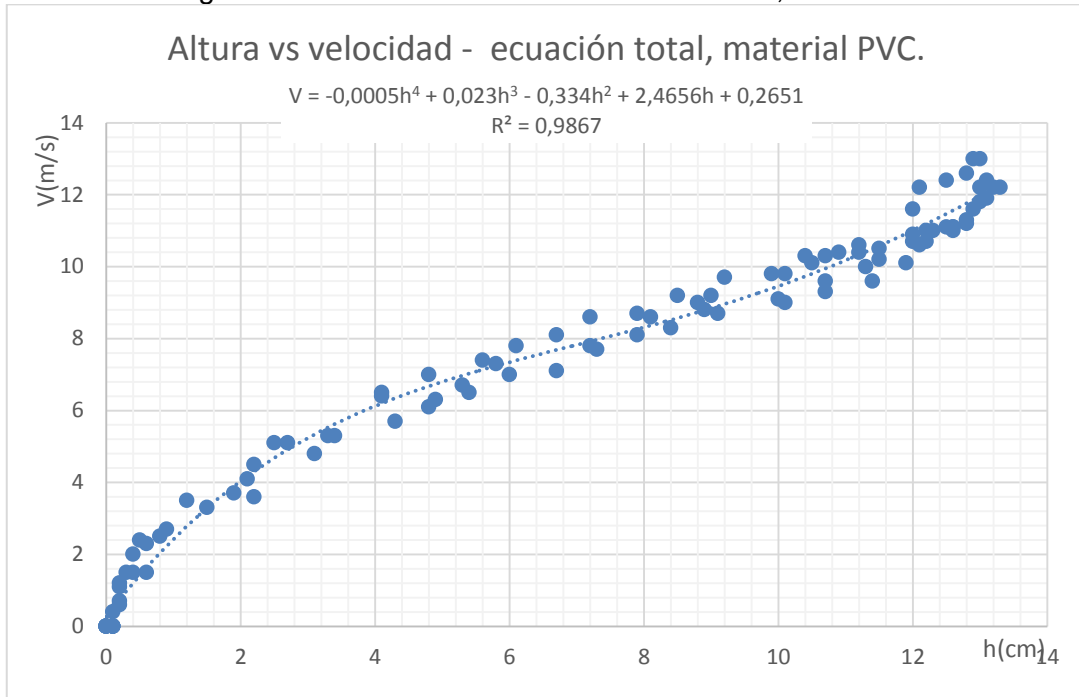
Fuente: Autor.

5.2.6 Ecuación total, material PVC.

Al realizar un modelo de regresión con todos los datos indicados anteriormente, se obtiene la ecuación total.

Como se puede observar, el valor de R^2 , de esta ecuación es menor al de las experimentaciones, sin embargo por la explicación indicada al inicio de este capítulo, se adopta esta ecuación como el modelo que mejor representa a la relación velocidad en función de la diferencia de alturas.

Figura 77. Altura vs velocidad - ecuación total, material PVC.



Fuente: Autor.

A continuación la comparación de los valores de las constantes numéricas de las ecuaciones obtenidas.

Tabla 22. Comparación de los valores de las constantes numéricas, material PVC.

Constante	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Ec. total	Val prom
a	-0,0007	-0,0014	0,0003	0,0001	-0,001	-0,0005	-0,00054
b	0,0273	0,0469	-0,0005	0,0098	0,0348	0,023	0,02366
c	-0,366	-0,5235	-0,1363	-0,2529	-0,4073	-0,334	-0,3372
d	2,6255	2,9066	1,9999	2,3218	2,5043	2,4656	2,47162
e	0,3319	0,2494	0,3744	0,1378	0,2019	0,2651	0,25908

Fuente: Autor.

Claramente se observa la similitud de valores de las constantes entre la ecuación total y los resultados promedio. Finalmente el valor del error calculado para el medidor 1 es

de -2,39%. Valor que se obtiene al promediar el valor de los errores que se indican en el ANEXO C, y con este valor se valida la utilización del medidor de caudal construido.

5.3 Comprobación del medidor de caudal 2, material acero.

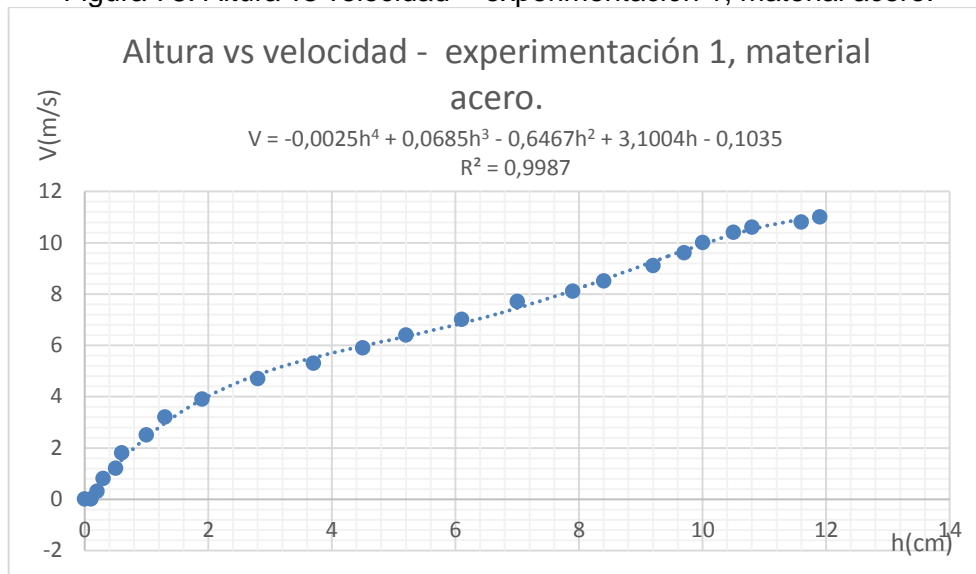
5.3.1 Experimentación 1, material acero

Tabla 23. Altura vs velocidad - experimentación 1, material acero.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	5,2	6,4
0,1	0	6,1	7
0,2	0,3	7	7,7
0,3	0,8	7,9	8,1
0,5	1,2	8,4	8,5
0,6	1,8	9,2	9,1
1	2,5	9,7	9,6
1,3	3,2	10	10
1,9	3,9	10,5	10,4
2,8	4,7	10,8	10,6
3,7	5,3	11,6	10,8
4,5	5,9	11,9	11

Fuente: Autor.

Figura 78. Altura vs velocidad - experimentación 1, material acero.



Fuente: Autor.

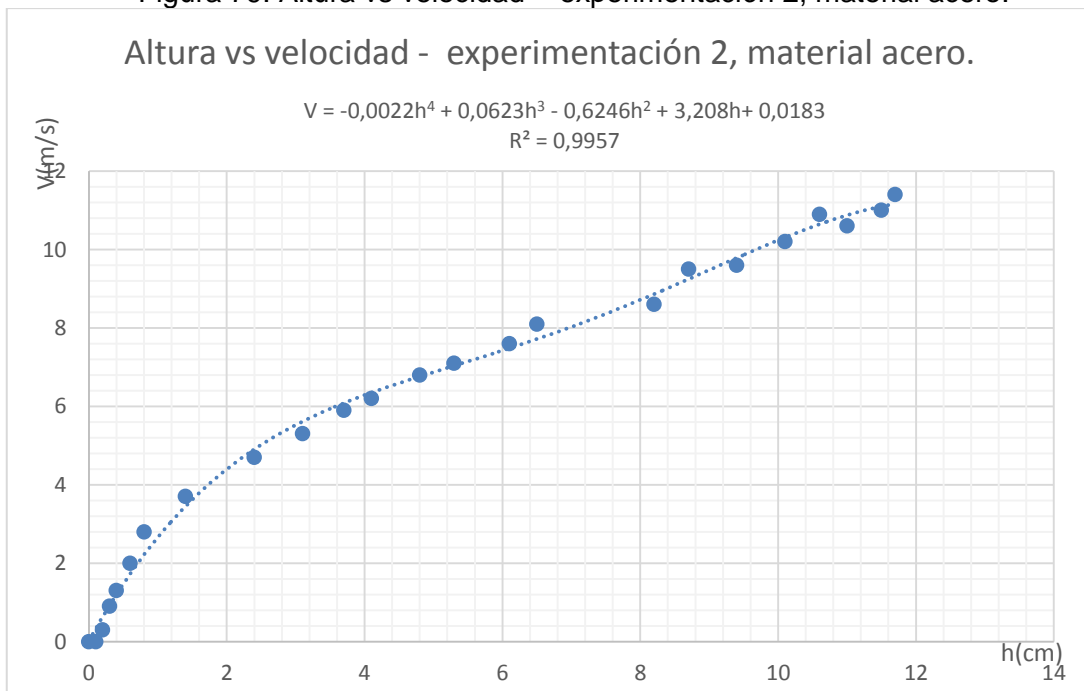
5.3.2 Experimentación 2, material acero.

Tabla 24. Altura vs velocidad - experimentación 2, material acero.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	4,8	6,8
0,1	0	5,3	7,1
0,2	0,3	6,1	7,6
0,3	0,9	6,5	8,1
0,4	1,3	8,2	8,6
0,6	2	8,7	9,5
0,8	2,8	9,4	9,6
1,4	3,7	10,1	10,2
2,4	4,7	10,6	10,9
3,1	5,3	11	10,6
3,7	5,9	11,5	11
4,1	6,2	11,7	11,4

Fuente: Autor

Figura 79. Altura vs velocidad - experimentación 2, material acero.



Fuente: Autor

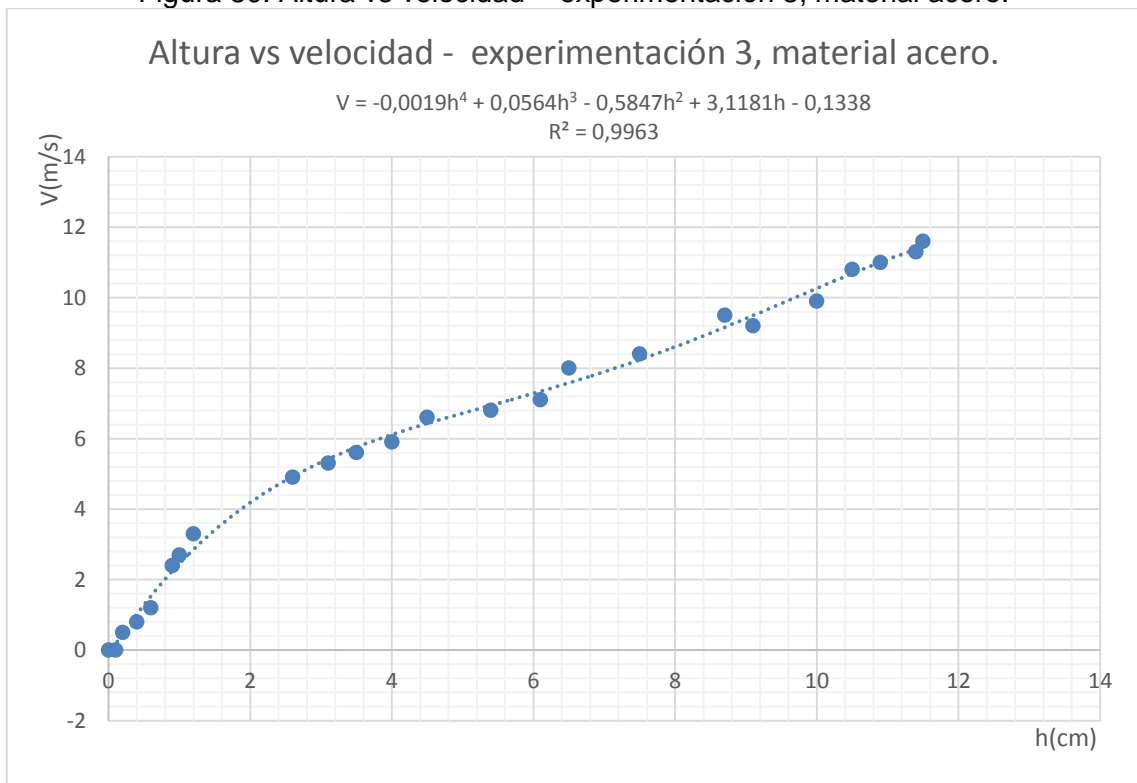
5.3.3 Experimentación 3, material acero.

Tabla 25. Altura vs velocidad - experimentación 3, material acero.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	4,5	6,6
0,1	0	5,4	6,8
0,2	0,5	6,1	7,1
0,4	0,8	6,5	8
0,6	1,2	7,5	8,4
0,9	2,4	8,7	9,5
1	2,7	9,1	9,2
1,2	3,3	10	9,9
2,6	4,9	10,5	10,8
3,1	5,3	10,9	11
3,5	5,6	11,4	11,3
4	5,9	11,5	11,6

Fuente: Autor

Figura 80. Altura vs velocidad - experimentación 3, material acero.



Fuente: Autor

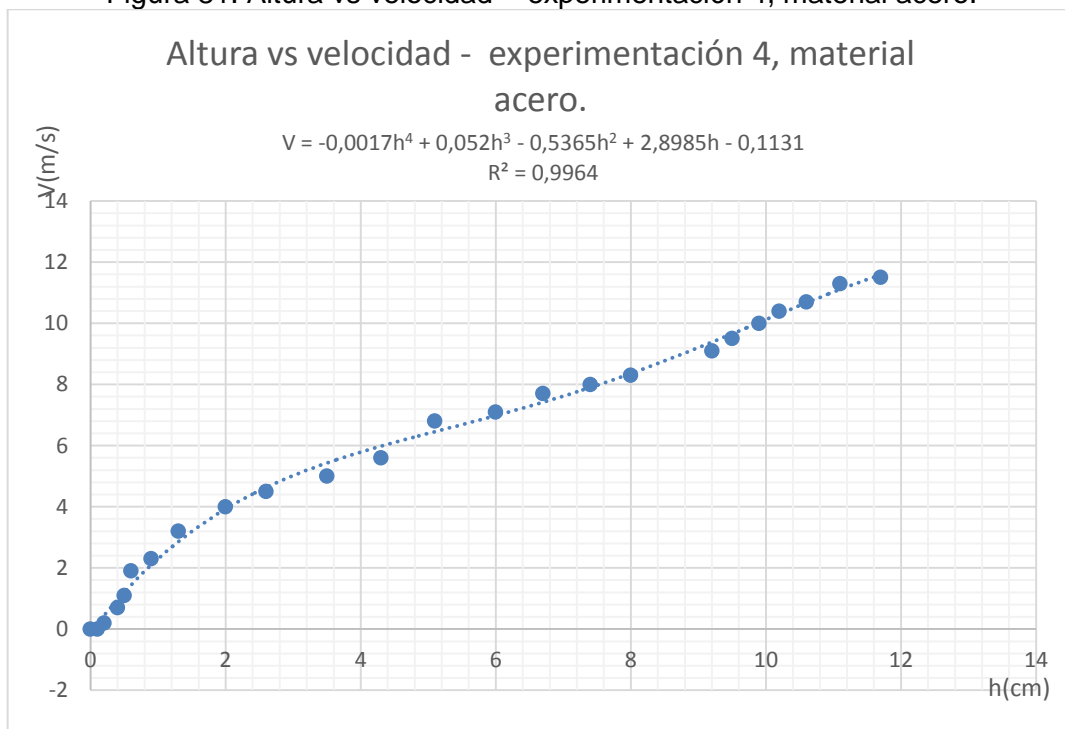
5.3.4 Experimentación 4, material acero.

Tabla 26. Altura vs velocidad - experimentación 4, material acero.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	5,1	6,8
0,1	0	6	7,1
0,2	0,2	6,7	7,7
0,4	0,7	7,4	8
0,5	1,1	8	8,3
0,6	1,9	9,2	9,1
0,9	2,3	9,5	9,5
1,3	3,2	9,9	10
2	4	10,2	10,4
2,6	4,5	10,6	10,7
3,5	5	11,1	11,3
4,3	5,6	11,7	11,5

Fuente: Autor.

Figura 81. Altura vs velocidad - experimentación 4, material acero.



Fuente: Autor.

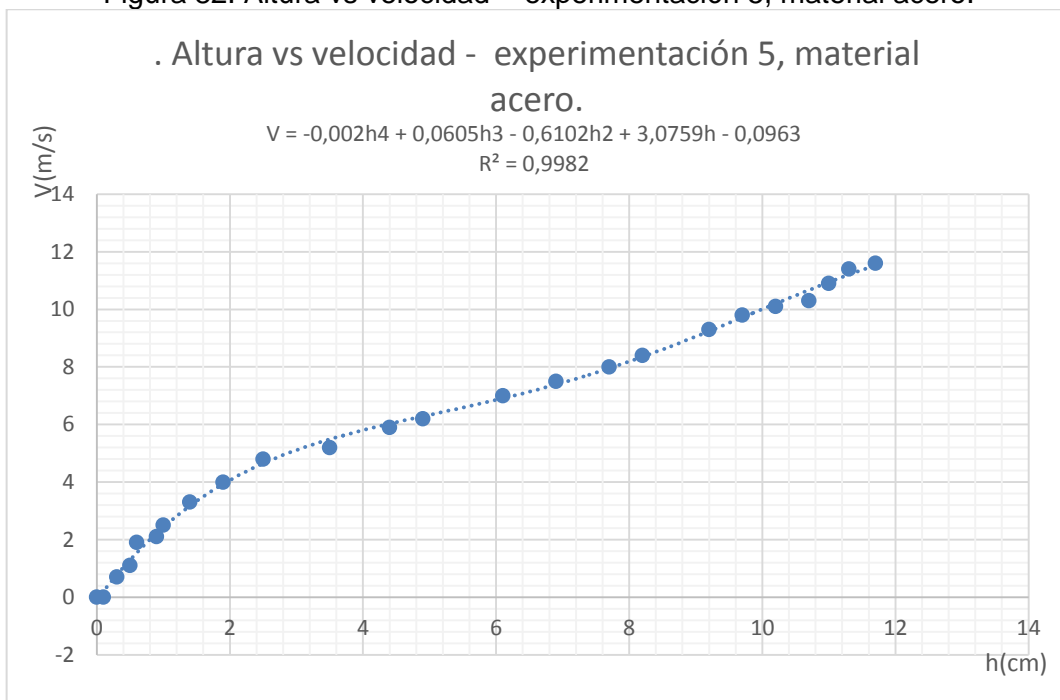
5.3.5 Experimentación 5, material acero.

Tabla 27. Altura vs velocidad - experimentación 5, material acero.

h[cm]	V[m/s]	h[cm]	V[m/s]
0	0	4,9	6,2
0,1	0	6,1	7
0,3	0,7	6,9	7,5
0,5	1,1	7,7	8
0,6	1,9	8,2	8,4
0,9	2,1	9,2	9,3
1	2,5	9,7	9,8
1,4	3,3	10,2	10,1
1,9	4	10,7	10,3
2,5	4,8	11	10,9
3,5	5,2	11,3	11,4
4,4	5,9	11,7	11,6

Fuente: Autor.

Figura 82. Altura vs velocidad - experimentación 5, material acero.

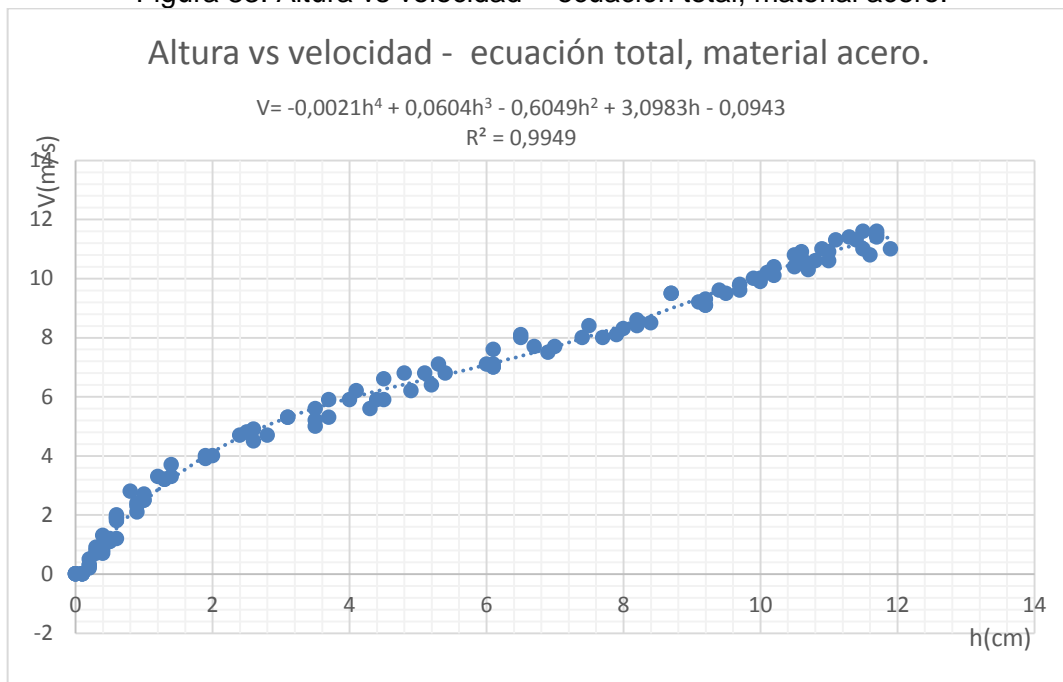


Fuente: Autor.

5.3.6 Ecuación total, material acero.

Se analiza de la misma manera que el caso anterior, teniendo una ecuación con todos los datos generados anteriormente. El valor de R^2 , es muy semejante entre todas las ecuaciones y tan solo ligeramente más bajo en la ecuación total

Figura 83. Altura vs velocidad - ecuación total, material acero.



Fuente: Autor.

El análisis de los coeficientes numéricos se indica en la siguiente tabla:

Tabla 28. Comparación de los valores de las constantes numéricas, material acero.

Constante	Exper. 1	Exper. 2	Exper. 3	Exper. 4	Exper. 5	Ec. Total	Val. promedio
a	-0,0025	-0,0022	-0,0019	-0,0017	-0,0020	-0,0021	-0,0021
b	0,0685	0,0623	0,0564	0,0520	0,0605	0,0604	0,0600
c	-0,6467	-0,6246	-0,5847	-0,5365	-0,6102	-0,6049	-0,6013
d	3,1004	3,2080	3,1181	2,8985	3,0759	3,0759	3,0795
e	-0,1035	0,0018	-0,1338	-0,1131	-0,0963	-0,0943	-0,0899

Fuente: Autor.

Claramente se observa la similitud de valores de las constantes entre la ecuación total y los resultados promedio.

Finalmente el valor del error calculado para el medidor 2 es de -1,7%. Valor que se obtiene al promediar el valor de los errores que se indican en el ANEXO D, y se concluye que está dentro del rango aceptable.

Con este valor se valida la utilización del medidor de caudal construido.

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS DE COSTOS

Es un proceso de identificación de los recursos necesarios para llevar a cabo un proyecto, determinando la cantidad de recursos necesarios y los gastos previstos.

En la resolución de este proyecto se evaluarán los gastos realizados desde el diseño hasta la culminación de la construcción y montaje del medidor de caudal por placa orificio, del intercambiador de calor y del sistema de filtrado.

Se presentan tablas en las que se especifican los costos del proyecto.

6.1 Costos directos

Los costos que intervienen directamente en el proyecto son los dados por materiales, transporte y mano de obra del proyecto.

Tabla 29. Costo de materiales para medidor de caudal por placa orificio de PVC

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	Placa orificio	1	5,00	5,00
2	Collarín de 2 in	2	6,00	12,00
3	Neplos de cobre	2	4,50	9,00
4	Bridas para tub 63 mm	2	3,80	7,60
5	Tubo de PVC de 2 in	1	3,50	3,50
6	Unión universal de 2 in	2	3,50	7,00
7	Codo recto de 90°	1	0,90	0,90
8	Válvula de bola	1	15,80	15,80
9	Papel victoria	1	2,00	2,00
10	Mangueras	2	3,00	6,00
11	Manómetro en U	1	5,00	5,00
12	Pernos ¾	4	0,80	3,20
Total(+IVA)				77,00

Fuente: Autor

Tabla 30. Costo de materiales para medidor de caudal por placa orificio de acero.

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	Placa orificio	1	5,00	5,00
2	Tubo de acero de 2 in	1		-
3	Neplos de cobre	2	4,50	9,00
4	Pernos 3/8	6	0,80	4,80
5	Láminas de acero	2	6,00	12,00
6	Papel victoria	1	2,00	2,00
7	Mangueras	2	3,00	6,00
8	Manómetro en U	1	5,00	5,00
Total (+IVA)				43,80

Fuente: Autor

Tabla 31. Costo de materiales extras para medidor de caudal por placa orificio

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	Pega para tubos de PVC	1	1,00	1,00
2	Teflón para altas temperaturas	1	2,00	2,00
3	Electrodos 6011	1	0,40	0,40
4	Pintura negra- esmalte	1	5,00	5,00
5	impresión de escala	1	1,00	1,00
6	Soporte para los manómetros	2	3,00	6,00
7	Papel adhesivo transparente	1	1,50	1,50
Total (+IVA)				16,90

Fuente: Autor

El valor total de los costos por materiales se calcula en la tabla 32.

Tabla 32. Costo de total de materiales para la placa orificio

Denominación	V. Total(+IVA)
Costos de materiales caudalímetro de PVC	77,00
Costos de materiales caudalímetro de acero	43,80
Costos de materiales extras	16,90
Total costo de Materiales	137,70

Fuente: Autor

Los costos por el traslado de los materiales para la elaboración de la placa orificio son:

Tabla 33. Costo de envío y transporte para la placa orificio

Denominación	Descripción	V. total [USD]
Transporte material	Plastigama - Taller	8,00
Transporte equipo	Taller - ESPOCH	2,00
Total costo de Envío y Transporte		10,00

Fuente: Autor

Tabla 34. Costo de mano de obra para la placa orificio

Denominación	Descripción	V. total [USD]
Mecánico	Construcción de la placa orificio y del caudalímetro de acero	25,00
Total costo de Mano de Obra		25,00

Fuente: Autor

Tabla 35. Costos directos para medidor de caudal por placa orificio

Denominación	V. Total [USD]
Costos de materiales	137,70
Costos de envío y transporte	10,00
Costo de mano de obra	25,00
Total costos directos	172,70

Fuente: Autor

Tabla 36. Costo de mariales para el sistema de enfriamiento

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	Plancha Alum. Liso 1,0 mm	1	26,96	26,96
2	Llave de paso de 1/2 plg	1	3,50	3,50
3	Cañería de cobre ½ plg	2	28,00	56,00
4	Pernos 3/8 X1 ½ plg	16	0,35	5,60
5	Pernos 5/16 X11/4 plg	28	0,326	9,128
6	Plancha metálica 3mm	1	42,69	42,69
7	Neplo ½ plg	1	2,25	2,25
Total(+IVA)				146,128

Fuente: Autor

Tabla 37. Costo de mariales estructurales para el montaje del sistema de enfriamiento

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	Tubo cuadrado 1 plg 1,5mm	2	10,22	20,44
5	Pernos expansivos 3/8 x1 ½plg	8	2,00	16,00
Total(+IVA)				36,44

Fuente: Autor

Tabla 38. Costo de mariales para el sistema de enfriamiento

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	BLOWER 4 plg -3 600 rpm	1	148,60	148,60
3	Pernos 5/16 x11/4 plg	4	0,35	1,40
4	Unión	1	0,80	1,60
Total(+IVA)				151,60

Fuente: Autor

Tabla 39. Costo de materiales extras para el sistema de enfriamiento

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	Adhesivo Instantáneo súper bonder	2	2,00	4,00
2	Cinta adhesiva para uniones	1	0,40	0,40
3	Electrodos 6011 1/8 plg	2	1,70	2,40
4	Electrodos 6013 1/8 plg	4	2,30	9,20
5	Disco Norton de corte	3	1,56	4,68
6	Disco Norton de pulir	1	2,64	2,64
7	Cepillo de acero	1	1,17	1,17
8	Banda HM 26 lisa	1	2,60	2,60
9	Broca 12,5 mm	1	8,92	8,92
10	Acero AISI 304 2 ½ plg	1	8,25	8,25
10	Pintura negra- esmalte	1	5,00	5,00
11	impresión de escala	1	1,00	1,00
12	Grabaciones en metal para equipo	1	13,00	13,00
13	Tubería Acero ASTM A36 $\varnothing= 4$ plg,L=1,2m	1	4,50	4,50
Total(+IVA)				67,76

Fuente: Autor

Tabla 40. Costo de total mariales para el sistema de enfriamiento

Denominación	V. Total(+IVA)
Costo de materiales para sistema de enfriamiento del intercambiador de calor	151,60
Costos de materiales extras	67,76
Total costo de Materiales	219,36

Fuente: Autor

El costo de transporte y envío del sistema de enfriamiento se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 41. Costo de envío y transporte para el sistema de enfriamiento

Denominación	Descripción	V. total [USD]
Envío de plancha de aluminio	ACEROS CENTER Ambato – Riobamba	4,00
Envío de cañerías de cobre	AVITRINAS NICO Quito – Riobamba	2,00
Transporte material estructural	Comercial Vera Taller	5,00
Transporte equipo	Taller – ESPOCH	5,00
Total costo de Envío y Transporte		16,00

Fuente: Autor

Tabla 42. Costo de mano de obra para el sistema de enfriamiento

Denominación	Descripción	V.total [USD]
Técnico de refrigeración	Soldadura de la tubería rígida de cobre.	80,00
Mecánico	Construcción del intercambiador de calor	200,00
Total costo de Mano de Obra		280,00

Fuente: Autor

Tabla 43. Costos directos para el sistema de enfriamiento

Denominación	V. Total [USD]
Costos de materiales	219,36
Costos de envío y transporte	16,00
Costo de mano de obra	280,00
Total costos directos	515,36

Fuente: Autor

Tabla 44. Costo de materiales para sistema de filtrado

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	Plancha laminada en caliente lisa calibre 2 mm	2	28,46	56,92
2	Barrillas lisas de 8 mm	18	1,99	35,82
3	Ángulos de 1 plg x 2 mm	2	4,20	8,40
4	Platina 2 plg X 1/8 plg	2	5,94	11,88
5	Tanque de 42 galones	2	12,00	24,00
6	Aislante térmico (lana de vidrio)	3	8,93	26,79
7	Tubo galvanizado ISO II 360 mm 4 plg X 400mm	1	8,78	8,78
8	Tubo circular 2 plg X 2mm X 6m	2	11,20	22,40
9	Pernos M8 X 1.25 X 25mm	60	0,1339	8,03
10	Tuerca de acero M8 X 1.25	60	0,0536	2,40
11	Arandela plana galvanizada	60	0,0446	2,68
12	Arandela de presión	60	0,0357	2,14
13	Anticorrosivo	1.5	2,67	4,01
14	Tinher laca disther	1	1,33	1,33
15	Kit masilla	2	4,46	8,92
16	Barra perforada SAE1018 5 plg X 30mm	12	9,17	110,00
Total(+IVA)				371,80

Fuente: Autor

Tabla 45. Costo de materiales extras para el sistema de filtrado

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	Broca A002 – 8,5mm	1	5,36	5,36
2	Disco de corte Makita 16 in X ¼ in	1	4,7768	4,78
3	Disco de corte Norton 4 ½ in X 2mm	4	1,15	4,60
4	Electrodos E – 6011 X 1/8 in	1	15,00	15,00
5	Discos de desbaste abrazol 4 ½ in	2	1,50	3,00
6	Mascarillas de neopreno y tapones	2	5,36	12,53
Total(+IVA)				50,67

Fuente: Autor

Tabla 46. Costo de total de materiales para el sistema de filtrado

Denominación	V. Total(+IVA)
Costo de materiales	371,80
Costos de mariales extras	50,67
Total costo de Materiales	422,47

Fuente: Autor

Tabla 47. Costo de envío y transporte para el sistema de filtrado

Denominación	Descripción	V. total [USD]
Transporte material estructural	Comercial Vera - Taller	10,00
Transporte material estructural	Taller – Mecánica de servicios Guadalupe	5,00
Transporte material estructural	Mecánica de servicios Guadalupe - Taller	5,00
Transporte material estructural	Plaza la esperanza - Taller	3,00
Transporte en adquisición de materiales	Recorrido por locales comerciales - Taller	10,00
Transporte equipo	Taller - ESPOCH	10,00
Total costo de Envío y Transporte		43,00

Fuente: Autor

Tabla 48. Costo de mano de obra para el sistema de filtrado

Denominación	Descripción	V. total [USD]
Técnico mecánico	Elaboración de roscas (perno - tuerca)	180,00
Técnico metal mecánico	Cortado, doblado, rolado	70,00
Técnico metal mecánico	Ayudante	140,00
Técnico mecánico	Maestro constructor	400,00
Total costo de Mano de Obra		790,00

Fuente: Autor

Tabla 49. Costos directos para el sistema de filtrado

Denominación	V. Total
Costos de materiales	422,47
Costos de envío y transporte	43,00
Costo de mano de obra	790,00
Total costos directos	1 255,47

Fuente: Autor

6.2 Costos indirectos

Se consideran como costos indirectos los dados por: ingeniería del proyecto (del 10 al 15% del costo directo del proyecto), herramientas utilizadas (se estima el 5% del costo total de las herramientas utilizadas), imprevistos y utilidades en la realización del sistema para la obtención de gas pobre en el gasificador Downdraft de la escuela de ingeniería mecánica.

Tabla 50. Costos indirectos

Denominación	V. Total [USD]
Costos por ingeniería	200,00
Costos por herramientas utilizadas	200,00
Costo por imprevistos	50,00
Utilidades	0
Total costos Indirectos	450,00

Fuente: Autor

Finalmente el costo total por el diseño y construcción del equipo se observa en la tabla 51.

Tabla 51. Costo total del equipo

Denominación	V. Total [USD]
Costos directos para medición de caudal mediante placa orificio	172,70
Costos directos del intercambiador de calor	515,36
Costos directos sistema de filtrado	1255,47
Costos Indirectos	450,00
Costo total del sistema de obtención de gas pobre	2 393,53

Fuente: Autor

El costo total del Equipo es de \$ 2 393,53 (dos mil trescientos noventa y tres dólares americanos con 53/100).

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Se construyó y diseñó un sistema para la obtención del gas pobre en el gasificador Downdraft de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

La gasificación en un sistema de flujo descendente y paralelo, es un proceso de aprovechamiento de la energía de bajo contenido de humedad en el cual se obtiene gas pobre de condiciones comparativamente buenas, con bajo contenido de alquitrán y cenizas.

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.

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.

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.

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

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 como motores de combustión.

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.

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. 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.

En los filtros de tela los espacios interfibras, pueden ser superiores al tamaño de las partículas ya 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 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 consiguen dos ventajas, la primera, desde el punto de vista de la calidad del gas, es el aumento de la densidad. La segunda es 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 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 el 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 pasará 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.

7.2 Recomendaciones

Adquirir e instalar instrumental para la toma de diferencias de presión, y trascender de los tubos en U al cambiarlos por transductores digitales de presión diferencial.

Utilizar medidores de temperatura para los diferentes puntos del gasificador como son las zonas de reducción, pirolisis y secado.

Existe la posibilidad de instalación de un medidor de presión diferencial únicamente para el filtro, de esta manera se podría monitorear constantemente la caída de presión que se tiene y poder realizar la limpieza del material filtrante.

La cámara de filtro que se ha construido, puede ser utilizar para realizar pruebas con otros medios filtrantes de menor costo, tal es el caso del aserrín y aserrín humedecido con aceite.

Para la limpieza de las mangas de filtro se requiere de un operador, que a través de la caída de presión que presente o de las horas de funcionamiento, limpie el material filtrante; se recomienda analizar el mecanismo más adecuado para la limpieza de los mismos que podía ser por medios mecánicos de vibración.

En la línea de llama, que es el punto donde se comprueba que el gas pobre se enciende, conviene instalar un mechero con una llama piloto de tal manera que se puede obtener de manera constante la quema del gas en la etapa de pruebas.

Se recomienda analizar la alternativa de un sistema de alimentación continua de biomasa al gasificador, de esta manera se esperaría tener una producción mucho más uniforme de gas pobre.

Controlar las posibles fugas en las juntas que posee el equipo de gasificación con un material sellante para alta temperatura, tal es el caso de la compuerta principal superior y la compuerta secundarias laterales.

BIBLIOGRAFÍA

- 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
- ENERGYCLARK.** (02 de 2015). *CLARK ENERGY*. Recuperado el 10 de 01 de 2016, de <https://translate.google.com.ec/translate?hl=es-419&sl=en&u=https://www.clarke-energy.com/synthesis-gas-syngas/&prev=search>
- FAO.** (2010). *DEPOSITO DE DOCUMENTOS DE LA FAO*. Recuperado el 02 de 2015, de <http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s00.htm#Contents>
- Fundación Wikipedia, Inc. (2015). Intercambiador de calor.
- 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>
- 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.gov.ar
- RAMESH, K. S.** (2003). *Fundamentals of heat Exchanger design*. United States: WILEY.
- SENER.** (04 de 2003). *SENER*. Recuperado el 01 de 2016, de <http://www.sener.es/>
- TIERRA, L. F.** (2011). Diseño de briquetas de aserrín y cascarilla de arroz para la producción de gas pobre. Riobamba.

TINGO, L. F. (2011). *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarrilla de arroz y pruebas de producción de gas pobre*. Riobamba.

UCLM. (2010). *UCLM*. Recuperado el 21 de 02 de 2016, de Universidad de Castilla La Mancha: <http://www.uclm.es/profesorado/jvillasenor/esp/contatm/tema1-pto5.pdf>

UNC. (2012). *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado el 20 de 02 de 2016, de http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2007315/html/un1/cont_01_01.html

WIKIPEDIA. (febrero de 2016). *WIKIPEDIA*. (Fundación WIKIPEDIA) Recuperado el 21 de 02 de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/Gasificaci%C3%B3n_de_biomasa

