



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio del sistema de limpieza de gases de un gasificador  
de lecho fluidizado burbujeante**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Luis Erick Torres Chuquilin**

**Asesor(es):  
Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Piura, julio de 2020**



## **Dedicatoria**

A Dios, a la Virgen, a San Josemaría por nunca dejar de buscarme, a mi madre Chuquilin, por su apoyo incondicional, a mi padre Luis, por su esfuerzo, a mi amigo el ingeniero Daniel Marcelo por la paciencia, y a mis profes Chela y Antonio por ser guías.





## Resumen Analítico-Informativo

**Estudio del sistema de limpieza de gases de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante.**

**Luis Erick Torres Chuquilin.**

**Asesor(es): Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana.**

**Tesis.**

**Ingeniero Mecánico - Eléctrico**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, Julio de 2020**

**Palabras claves:** Ingeniería / Gasificación / Limpieza / Syngas / Energías renovables.

**Introducción:** La limpieza de gases contaminantes emitidos durante el proceso de gasificación son un reto en cuanto a eficiencia y metodología. Esta tesis plantea un sistema de limpieza de gases producidos por el gasificador de la Universidad de Piura

**Metodología:** El estudio se realizó a partir de la revisión bibliográfica de sistemas y tecnologías de limpieza usados para remoción de contaminantes en procesos de gasificación, permitiendo determinar un sistema de limpieza para el gasificador de la Universidad de Piura que es caso de estudio de esta tesis.

**Resultados:** El sistema de limpieza planteado reduce los niveles de partículas, alquitranes y otros contaminantes, permitiendo el uso del gas producido por el gasificador de la Universidad de Piura en motores de combustión interna.

**Conclusiones:** Se considera que para realizar un estudio a profundidad de la limpieza de contaminantes producidos por el gasificador de la Universidad de Piura se necesita de una mayor instrumentación en la recolección de datos de estos. Con la información obtenida del gasificador estudiado, se plantea un sistema de limpieza formado por 3 ciclones rotacionales y un lecho de arena, con los cuales se cumplirían los requerimientos mínimos del syngas producido para ser usados en motores de combustión interna.

**Fecha de elaboración del resumen:** 06 de Julio de 2020

## Analytical-Informative Summary

**Estudio del sistema de limpieza de gases de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante.**

**Luis Erick Torres Chuquilin.**

**Asesor(es): Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana.**

**Tesis.**

**Ingeniero Mecánico - Eléctrico**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, Julio de 2020**

**Keywords:** Engineering / Gasification / Cleaning / Syngas / Renewable energy.

**Introduction:** The cleanup of pollutants gases emitted during the gasification process is a challenge in terms of efficiency and methodology. This thesis proposes a cleaning system of gases produced by the gasifier of the University of Piura.

**Methodology:** The study was done from the bibliographic review of cleaning systems and technologies used for the removal of pollutants in gasification processes, allowing the proposed of a cleaning system for the gasifier of the University of Piura, which is the case study of this thesis.

**Results:** The proposed cleaning system reduces the levels of particles, tars and other contaminants, allowing the gas produced by the gasifier of the University of Piura to use in internal combustion engines.

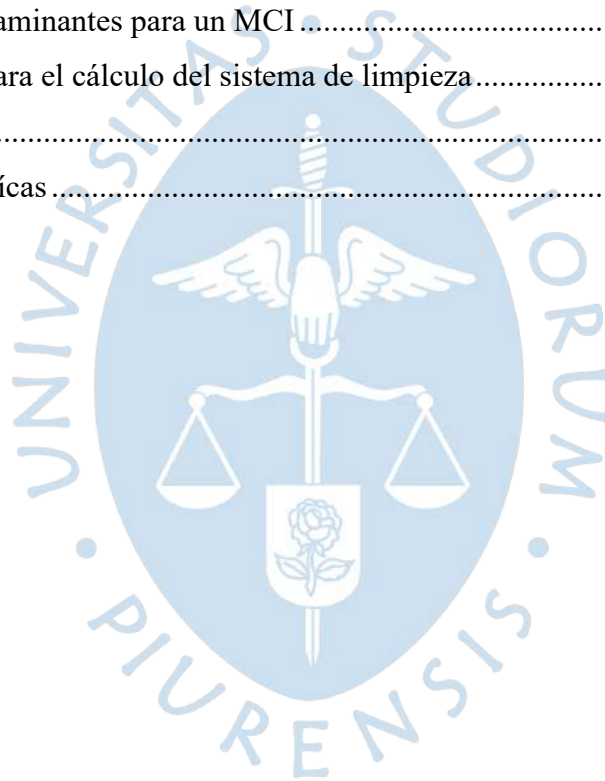
**Conclusions:** It is required a better instrumentation to collect data from the pollutants produced by the gasifier of The University of Piura that allows us to do a deep investigation on their cleaning. With the information obtained from the gasifier, it is proposed a cleaning system which includes 3 rotational cyclones and a bed of sand, with this system the syngas produced meet the minimum requirements to be used in internal combustion engines.

**Summary date:** July 06, 2020

## Tabla de contenido

Introducción .....	1
Capítulo 1. Antecedentes.....	3
1.1. Proceso de gasificación .....	3
1.1.1. Modelos de gasificador .....	4
1.1.2. Fluidización .....	7
1.1.3. Limpieza de los gases de gasificación.....	11
1.2. Biomasa .....	11
1.2.1. Bagazo de caña de azúcar.....	12
1.2.2. Hoja de caña de azúcar .....	15
Capítulo 2. Impurezas en el gas de síntesis .....	17
2.1. Contaminantes .....	17
2.1.1. Los contaminantes principales .....	18
2.1.1.1. Partículas .....	18
2.1.1.2. Alquitranes o tars .....	19
2.1.1.3. Compuestos ácidos.....	20
2.1.1.4. Componentes condensables.....	21
2.1.1.5. Elementos traza .....	21
2.1.1.6. Alcalinos.....	21
2.1.1.7. Compuestos nitrogenados .....	21
Capítulo 3. Tecnologías de limpieza .....	23
3.1. Tecnologías de limpieza .....	23
3.1.1. Ciclón .....	27
3.1.2. Filtros.....	28
3.1.3. Precipitador electrostático. ....	33
3.1.4. Dry scrubbing, o lavado seco .....	35
3.1.5. Torre de lavado o scrubber húmedo .....	35

3.1.6. Eyector venturi scrubber .....	36
3.1.7. Adsorción .....	36
3.2. Modelos de sistemas de limpieza .....	40
Capítulo 4. Componentes del syngas .....	45
4.1. Pruebas realizadas en el gasificador de la UDEP .....	45
4.2. Rango de componentes del syngas esperados según la literatura.....	51
4.2.1. Condiciones de operación .....	51
4.2.2. Composición del syngas .....	54
Capítulo 5. Evaluación de sistema de limpieza.....	61
5.1. Resumen de tecnologías de limpieza.....	61
5.2. Límite de contaminantes para un MCI .....	63
5.3. Metodología para el cálculo del sistema de limpieza.....	65
Conclusiones .....	75
Referencias bibliográficas .....	77



## Lista de tablas

Tabla 1. Fenómenos en el proceso de gasificación .....	3
Tabla 2. Agente gasificante y contenido energético alcanzado.....	4
Tabla 3. Modelos de gasificadores y sus características .....	4
Tabla 4. Ventajas y desventajas de los lechos fluidizados.....	7
Tabla 5. Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas.....	10
Tabla 6. Tecnologías de limpieza de gases .....	11
Tabla 7. Características físicas del bagazo de caña de azúcar.....	12
Tabla 8. Análisis próximo del bagazo de caña de azúcar (base seca).....	13
Tabla 9. Análisis elemental o último del bagazo de caña de azúcar .....	13
Tabla 10. Análisis termoquímicos de las hojas de caña de azúcar.....	15
Tabla 11. Contaminantes, efectos negativos y métodos de limpieza.....	18
Tabla 12. Formación de alquitranes .....	19
Tabla 13. Resumen de aditivos en lecho para diferentes condiciones de operación.....	22
Tabla 14. Tecnologías de limpieza de separación de partículas .....	24
Tabla 15. Reducción de partículas y tars en varias tecnologías de gasificación .....	25
Tabla 16. Métodos de limpieza y su eficiencia en la remoción de partículas y tars .....	26
Tabla 17. Condiciones de operación y eficiencia de equipos de remoción de partículas .....	26
Tabla 18. Eficiencia del ciclón respecto al tamaño de partícula .....	27
Tabla 19. Concentración de tars antes y después del filtro .....	38
Tabla 20. Características del carbón con el agregado de fierro.....	39
Tabla 21. Resultados obtenidos del uso de los filtros A y B.....	40
Tabla 22. Cuadro de componentes del syngas y temperaturas promedio .....	51
Tabla 23. Condiciones de operación de gasificadores individuales.....	52
Tabla 24. Resumen de condiciones de operación de gasificadores.....	53
Tabla 25. Condiciones de operación de un gasificador de lecho fluidizado .....	54
Tabla 26. Composición del syngas por biomasa .....	55
Tabla 27. Resumen de la composición del syngas .....	57

Tabla 28. Composición del syngas de un gasificador lecho fluidizante burbujeante .....	58
Tabla 29. Composición del syngas.....	59
Tabla 30. Contenido de particulado y alquitrán .....	59
Tabla 31. Composición final del syngas con particulado y alquitranes .....	60
Tabla 32. Detalles de los métodos de limpieza .....	61
Tabla 33. Porcentaje de reducción de partículas y tars en varias tecnologías.....	62
Tabla 34. Requerimientos del syngas en función de su uso.....	63
Tabla 35. Calidad del gas requerida para generación de energía .....	64
Tabla 36. Contenido aceptable y preferible de contaminantes para motores modernos .....	64
Tabla 37. Valores medios de impurezas en el gas para aplicaciones en MCI.....	65
Tabla 38. Niveles de contaminantes para MCI.....	65
Tabla 39. Características del gas de síntesis .....	66
Tabla 40. Límite de entrada de contaminantes a la entrada del MCI.....	66
Tabla 41. Contaminantes presentes en el gas de síntesis y métodos de limpieza .....	67
Tabla 42. Eficiencia de un ciclón otacional .....	67
Tabla 43. Eficiencia de los dispositivos de limpieza .....	68
Tabla 44. Eficiencia del filtro de fibras cerámicas.....	68
Tabla 45. Eficiencia del Web Scrubbers y del Dry Scrubbers .....	68
Tabla 46. Flujo volumétrico de salida del gasificador de la Universidad de Piura.....	69
Tabla 47. Concentración de partículas por cada etapa de ciclón.....	70
Tabla 48. Concentración en el filtro granulado.....	70
Tabla 49. Concentración en el filtro de fibras cerámicas .....	71
Tabla 50. Concentración de alquitrán en cada etapa de ciclón .....	72
Tabla 51. Concentración de alquitrán en el filtro granulado.....	72
Tabla 52. Concentración de $H_2S$ a la salida del filtro de arena.....	73

## Lista de figuras

Figura 1. Gasificadores de lecho fluidizado burbujeante (a), circulante (b).....	6
Figura 2. Distintos modos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido.....	8
Figura 3. Clasificación de las partículas según Geldart por peso y tamaño.....	9
Figura 4. Eficiencia de equipos de separación de particulado .....	23
Figura 5. Eficiencia de sistemas de colección de partículas.....	24
Figura 6. Separador de partículas rotacional.....	28
Figura 7. Vela del filtro cerámico.....	29
Figura 8. Configuración de recogida de polvo exterior .....	30
Figura 9. Configuración de recogida de polvo interior .....	30
Figura 10. Filtro de tela diseñado por IISc/Dasag gasifier.....	31
Figura 11. Filtro de tela para altas potencias.....	32
Figura 12. Esquema de gasificación donde se usan dos filtros de arena.....	33
Figura 13. Precipitador electrostático de alta potencia. ....	34
Figura 14. Precipitador electrostático de baja potencia.....	34
Figura 15. Torre de lavado en contracorriente.....	37
Figura 16. Torre de lavado.....	37
Figura 17. Esquema del funcionamiento de un eyector venturi scrubber .....	38
Figura 18. Esquema de limpieza de gases de gasificación de biomasa.....	39
Figura 19. Configuración de limpieza propuesta por la U. de Chile.....	41
Figura 20. Planta de gasificación. ....	41
Figura 21. Esquema de la planta de gasificación.....	42
Figura 22. Esquema desarrollado por National Renewable Energy Laboratory.....	43
Figura 23. Esquema del sistema de gasificación.....	43
Figura 24. Esquema de gasificación de 1.2 MW térmicos.....	44
Figura 25. Esquema de planta de gasificación.....	44
Figura 26. Ubicación de los sensores de temperatura.....	45
Figura 27. Perfil de temperatura.....	46

Figura 28. Gráfica de gases en función del tiempo.....	47
Figura 29. Producción de metano.....	47
Figura 30. Temperaturas del reactor. ....	48
Figura 31. Temperatura del sensor 8.....	48
Figura 32. Producción de metano.....	49
Figura 33. Temperaturas del reactor. ....	49
Figura 34. Producción de metano.....	50



## Introducción

La dependencia del uso de combustibles fósiles y su influencia en el cambio climático, empuja al ser humano a buscar alternativas energéticas. La transformación de residuos biomásicos en energía, es una alternativa para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La gasificación de biomasa genera un gas que puede ser utilizado en motores de combustión interna, calderas, etc. para la producción de energía.

La gasificación es un proceso de combustión parcial, se da con un suministro limitado de oxígeno, que produce un gas que tiene un poder calorífico residual. Existen distintos tipos de gasificadores: de lecho fijo/móvil, fluidizado y de arrastre. El lecho utiliza material inerte (arena o carbón) como medio de transmisión de calor hacia la biomasa. En un gasificador de lecho fluidizado el material inerte es soplado y se mantiene en suspensión, entrando en contacto con la biomasa se produce la combustión parcial, generando una mezcla gaseosa (gas pobre o syngas).

El gas producido contiene una alta cantidad de contaminantes que dañan los procesos aguas arriba de la salida del gasificador, como en motores de combustión interna u otras aplicaciones. Debido a esto se emplean sistemas de limpieza que permitan el uso eficiente del gas para la generación de energía.

Dentro de las tecnologías de limpieza presentadas en esta tesis se tiene: ciclones, filtros, precipitadores electrostáticos, torres de lavado seco y húmedo, eyector venturi scrubber y materiales de absorción.

El presente trabajo se desarrolla con el apoyo del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico – CONCYTEC, que está enmarcado en el proyecto con código CONVENIO DE SUBVENCION N° 130 -2015-FONDECYT y ha permitido la construcción de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante y adquirir sistemas de medición. En el capítulo 4 se hace un

análisis de los resultados obtenidos en distintas pruebas del gasificador mencionado y se reseña las condiciones de operación y rango de componentes que se esperar obtener en un gasificador de lecho fluidizado burbujeante.

Por ultimo se plantea un sistema de limpieza para el gasificador que se ha construido en la Universidad de Piura, teniendo como fin práctico el acondicionamiento del gas para su uso en un motor de combustión interna, el cual cuenta con 3 ciclones rotacionales y un filtro de arena. Se acota que los resultados obtenidos se basan en información recopilada en la literatura, siendo esta tesis una base para futuras investigaciones.



## Capítulo 1

### Antecedentes

#### 1.1. Proceso de gasificación

La gasificación es un proceso de combustión parcial que se da con un limitado suministro de oxígeno ( $O_2$ ) (30% requerido para la combustión completa), obteniéndose un gas de combustible. Siendo sus principales componentes: el monóxido de carbono (CO) y el hidrógeno ( $H_2$ ). Además contiene impurezas ( $NH_3$ ,  $H_2S$ , HCl, alquitranes, metales), las cuales afectan la eficiencia del combustible, deterioro de las tuberías, filtros, etc. (Acosta, 2015).

La gasificación contiene 4 procesos principales (tabla 1):

Tabla 1.

*Fenómenos en el proceso de gasificación.*

Proceso	Fenómeno
Secado	Se elimina la humedad de la biomasa, se trabaja a una temperatura de 100°C.
Descomposición o Pirolisis	Proceso de descomposición térmica, se divide en 2 tipos pirolisis lenta y pirolisis rápida.
Oxidación	Se introducen el aire, oxígeno, vapor de agua o agentes gasificantes, se realiza a temperaturas entre 700 – 2000°C.
Reducción	En la zona de reducción se dan diferentes reacciones químicas entre el carbono de la biomasa y un gas reactante.

Fuente. Castellanos, 2012.

Tabla 2.

*Agente gasificante y contenido energético alcanzado.*

<b>Agente oxidante</b>	<b>Poder calórico superior (MJ/m<sup>3</sup>N)</b>
Aire	4-7
Vapor	10-18
Oxígeno	12-28

*Fuente. Arteaga, 2014.*

El agente gasificante influye en el valor del poder calórico del gas de síntesis. Se obtiene un poder calórico mayor usando oxígeno o vapor de agua que utilizando aire atmosférico. El empleo de oxígeno da grandes ventajas otorgando una alta eficiencia en el proceso, pero esto requiere de un alto costo económico. La tabla 2 muestra el contenido energético alcanzado con los diferentes agentes gasificantes.

### 1.1.1. Modelos de gasificador

Los modelos de gasificador se clasifican en lecho fijo, lecho fluidizado y arrastre. La clasificación se basa en el modo de contacto entre la biomasa (parte sólida) y el agente fluidizante, lo que genera una gran diferencia entre los modelos. La tabla 3 muestra las características de los distintos tipos de gasificadores.

Tabla 3.

*Modelos de gasificadores y sus características.*

<b>Parámetro</b>	<b>Lecho fijo/móvil</b>	<b>Lecho fluidizado</b>	<b>Arrastre</b>
Aplicación	Baja	Media	Alta
Tamaño de partícula	< 51 mm	< 6 mm	< 0.15 mm
Temperatura de salida	450 – 650 °C	800 – 1000 °C	> 1260°C
Tolerancia	Carbón	Carbón y biomasa	Carbón
Temperatura de reacción	1090°C	800 – 1000 °C	1990 °C

*Fuente. Arteaga, 2014.*

Tabla 3 (Continuación).

*Modelos de gasificadores y sus características.*

Parámetro	Lecho fijo/móvil	Lecho fluidizado	Arrastre
Requerimiento de vapor	Alta	Media	Baja
Naturaleza de cenizas	Seca	Seca	Lodo
Eficiencia de gas frío	80%	89%	80%
Problemas de operación	Produce alquitrán	Conversión de carbón	Enfriamiento del gas

Fuente. Arteaga, 2014.

#### - Modelo de gasificador de lecho fluidizado

Este modelo permite quemar el carbón de la biomasa con un bajo volumen de oxígeno, obteniendo un syngas el cual debe ser limpiado de impurezas previo a su uso en aplicaciones.

El lecho utiliza materia inerte (arena o carbón) como medio de transmisión de calor, permitiendo calentar el lecho y la biomasa. La materia inerte se sopla con aire elevando y manteniendo las partículas en estado de suspensión. El agente gasificador entra a un plato distribuidor, permitiendo al material entrar en estado de pirólisis generando una mezcla de material gaseoso. Esto permite la descomposición de la biomasa en los componentes del syngas, además de la notable influencia en la cantidad de energía generada. La gasificación produce alquitrán que varía en contenido de 1 a 50 g/m<sup>3</sup> (Arteaga, 2014).

Existen dos tipos principales de gasificadores de lecho fluidizado:

- **Burbujeante:** El agente gasificador entra por la parte inferior del gasificador. Las presiones de trabajo son las atmosféricas o presiones altas en función de la biomasa de trabajo. Se tiene velocidades de fluidización de 0.5 – 1 m/s, con temperaturas de operación entre 800 y 1000 °C.
- **Con recirculación:** El agente, al igual que en el tipo burbujeante entra por la parte inferior del gasificador. Del ciclón cae una tubería que sirve para la recirculación de sólidos. Tiene una velocidad superior de fluidización en el lecho burbujeante de 3.5 – 5.5 m/s, con temperaturas de operación entre 800 y 1000 °C.

La figura 1 se muestra los dos tipos de gasificadores de lecho fluidizado.

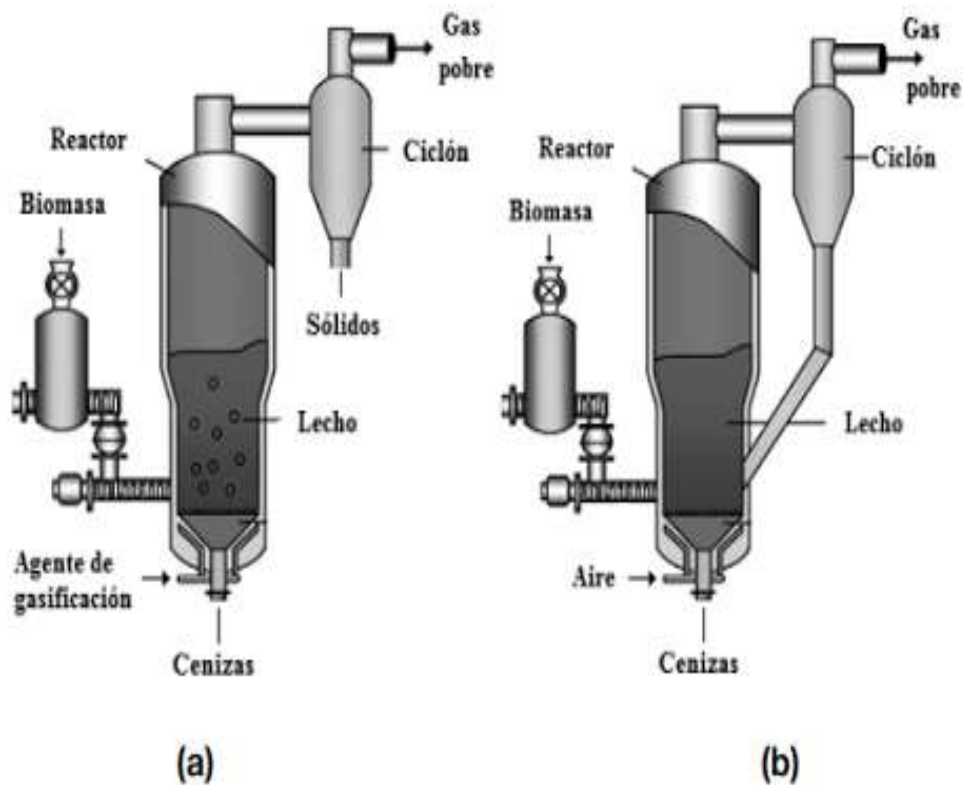


Figura 1. Gasificadores de lecho fluidizado burbujeante (a), circulante (b).

Fuente: Castellanos, 2012.

Las diferentes tecnologías utilizadas en la gasificación presentan un conjunto de ventajas y desventajas. Desde el contenido de contaminantes producido, hasta la eficiencia energética varían dependiendo el tipo de gasificador. La tabla 4 presenta las principales ventajas y desventajas de los lechos fluidizados.

Aún con los inconvenientes presentados los lechos fluidizados son una gran alternativa eficiente en la producción de energía frente a otros métodos.

Tabla 4.

*Ventajas y desventajas de los lechos fluidizados.*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Se obtiene una temperatura homogénea y constante en el lecho.	La obtención de un producto no uniforme y un bajo rendimiento, por el constante trato de sólidos en altas conversiones.
Se obtiene una buena resistencia a los cambios bruscos de temperatura, permitiendo que esta suba lenta y progresivamente.	La erosión y abrasión en los depósitos y tuberías.
Mayor transferencia de calor entre el gas y las partículas.	Altos costos de operación, instalación y control.
Mejor control de la temperatura y la alimentación de la materia.	Producción de alquitrán.

*Fuente.* Barreiro Moreno, 2007.

### 1.1.2. Fluidización

Es el proceso mediante el cual un flujo (líquido o gaseoso) a velocidad determinada (baja velocidad) pasa a través de un lecho (formado por finas partículas de arena, carbón u otro componente) empezando a mover las partículas que lo conforman. A medida que la velocidad del flujo aumenta el movimiento de las partículas también aumenta, llegando a ser levantadas y puestas en suspensión. La figura 2 muestra la diferencia entre los tipos de fluidización (ordenados en forma ascendente a la velocidad) en base a la magnitud de la velocidad de fluido.

Clasificación de las partículas de fluidización. El tamaño de las partículas y su distribución juegan un papel importante en la fluidización, permitiendo que ésta se lleve a cabo de modo eficiente o no.

Las partículas pequeñas se aglomeran al estar húmedas, necesitando que el lecho sea agitado para que se produzca la fluidización. Las partículas finas, con variedad de tamaños en su distribución obtienen una buena fluidización mejorando la calidad del syngas. Las partículas grandes con una distribución de tamaños homogénea generan más problemas al fluidizar (Barreira Moreno, 2007).

La clasificación de Geldart es la más utilizada en el estudio de partículas de fluidización agrupándose en cuatro tipos (figura 3).

En la tabla 5 se aprecia la clasificación de Geldart según el tipo de comportamiento de las partículas.

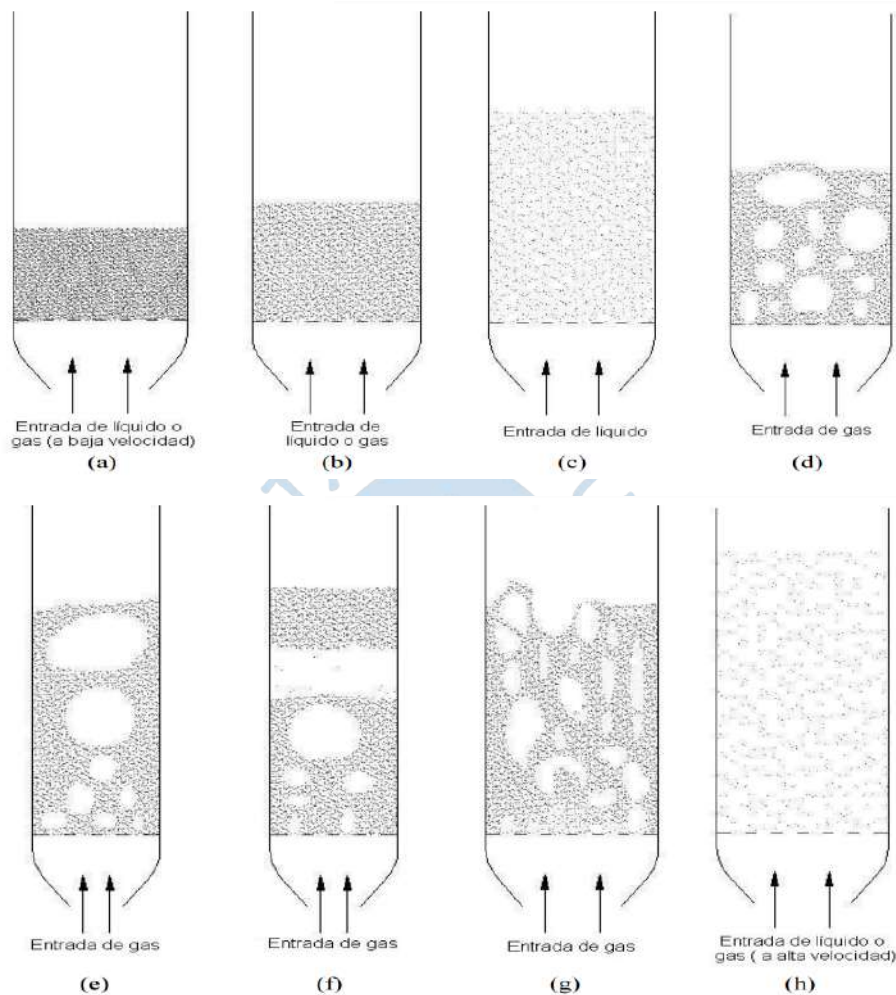


Figura 2. Distintos modos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido.

Fuente: Barreira Moreno, 2007.

(a) Lecho fijo: las partículas se mantienen estacionarias pasando el flujo a través de los intersticios del lecho.

(b) Lecho en comienzo de fluidización: las partículas empiezan a vibrar, pero no se da fluidización.

(c) Lecho con fluidización no burbujeante: se igualan las fuerzas de arrastre del fluido con el peso de las partículas, provocando una leve suspensión.

(d) Lecho con fluidización burbujeante: al ser el flujo líquido, las partículas del lecho fluyen de manera homogénea manteniéndose suspendidas.

(e) Slugging con slugs axiales: el Slugging es un fenómeno donde aparece burbujas de gran tamaño y diámetro cercano al depósito.

(f) Slugging con slugs de pared: las burbujas alcanzan a tener el diámetro del depósito.

(g) Fluidización turbulenta: a una velocidad suficientemente alta las burbujas desaparecen y se inicia un movimiento turbulento entre sólidos y espacios de gas.

(h) Fluidización en fase dispersa con transporte neumático de partículas: con una velocidad más alta lo que se consigue es que las partículas abandonan el lecho.

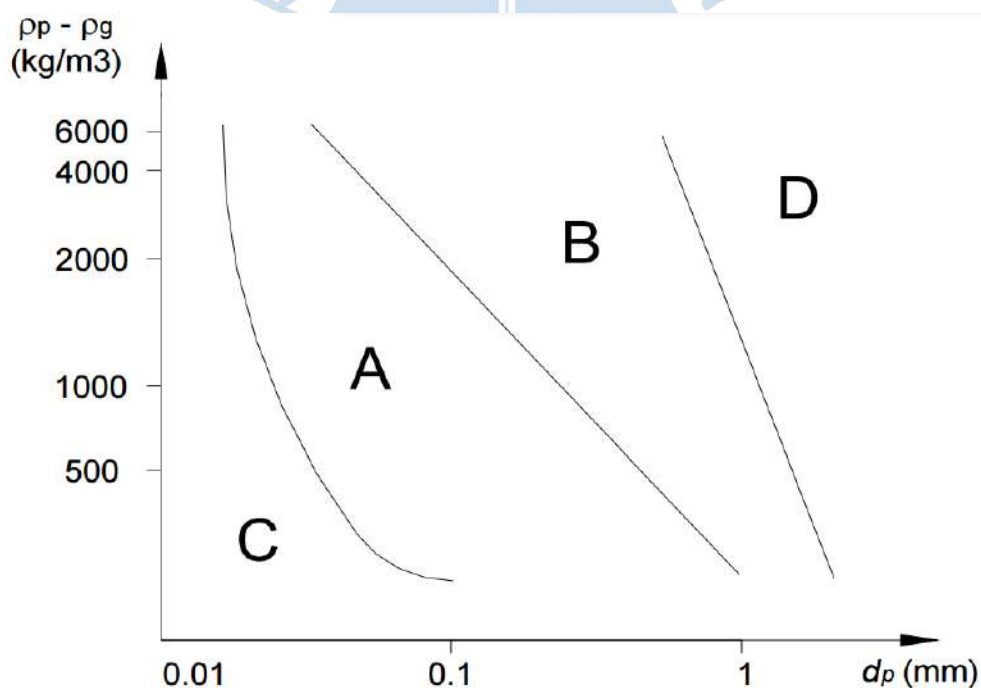


Figura 3. Clasificación de las partículas según Geldart por peso y tamaño.

Fuente: Barreira Moreno, 2007.

- Estado de fluidización no burbujeante - Grupo A
- Estado de fluidización burbujeante - Grupo B
- Partículas muy finas que no fluidizan en sentido estricto - Grupo C
- Partículas de gran tamaño de forman lechos de chorro - Grupo D

La velocidad mínima de burbujeo  $U_{mb}$  es la velocidad a la que aparecen las primeras burbujas.

- En las partículas del Grupo A siendo  $U_{mb} > U_{mf}$  se obtiene un máximo tamaño de burbuja, permitiendo una fluidización de calidad.
- En el Grupo B y D siendo  $U_{mb} = U_{mf}$  se obtiene un crecimiento alto y continuo de burbuja por lo que la fluidización es de pésima calidad.
- En el Grupo C las fuerzas generadas por la velocidad del gas fluidizante no son lo suficientemente grandes para romper fuerzas de inercia de las partículas, produciéndose la no fluidización.

Tabla 5.

*Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas.*

	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Grupo C</b>	<b>Grupo D</b>
<b>Características principales</b>	Ideales para fluidización, muestra un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo a $U_{mf}$	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Tamaño elevado
<b>Partículas típicas</b>	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina, cemento	Grava, granos de café
<b>Expansión del lecho</b>	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
<b>Velocidad de desaireación</b>	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, luego exponencial	Rápida
<b>Propiedades de burbujas</b>	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
<b>Mezcla de gas</b>	Alta.	Moderada	Muy baja	Baja
<b>Aparición de chorros</b>	No	Solo en lechos poco profundos	No	Si, incluso en lechos profundos

*Fuente.* Barreira Moreno, 2007.

### 1.1.3. Limpieza de los gases de gasificación

La limpieza de los gases se da por métodos primarios o secundarios (Castellanos, 2012):

- Primarios: son tratamientos pre-gasificación dados en la biomasa, la cual es mezclada con catalizadores.
- Secundarios: pueden ser de gas caliente a temperaturas por encima de 500°C o gas húmedo con temperaturas de 20 a 60 °C.

La tabla 6 muestra las diferentes tecnologías de limpieza respecto al porcentaje de remoción de alquitrán.

## 1.2. Biomasa

La biomasa proviene de materia vegetal, animal y desechos. La más utilizada es la vegetal, la cual obtiene su energía mediante el proceso de fotosíntesis. Se considera una fuente de energía renovable.

La gasificación de biomasa produce un gas conocido como gas de síntesis. Su poder calorífico está limitado por las características de la biomasa y del proceso de gasificación (tecnologías de gasificación y condiciones de trabajo).

Tabla 6.

*Tecnologías de limpieza de gases.*

Tecnologías	Temperatura °C	Remoción de Alquitrán %
Filtro de arena	10 – 20	50 – 97
Lavador	50 – 100	50 – 90
Precipitador húmedo	40 – 50	0 – 60
Filtro de lona	130	0 – 50
Absorbedor de lecho fijo	130	50
Conversión catalítica	900	> 95

Fuente. Castellanos, 2012.

### 1.2.1. Bagazo de caña de azúcar

El bagazo de caña de azúcar está compuesto por fibra, agua, sólidos solubles y cenizas (Pérez, 2010). El calor específico de combustión del bagazo depende de: su composición, contenido de azúcar, contenido de cenizas, humedad y de la variedad de la caña.

La tabla 7 muestran las características físicas del bagazo encontradas en la literatura.

Tabla 7.

*Características físicas del bagazo de caña de azúcar.*

Característica física	Medida
Longitud	5 – 7.5 cm
Ancho	< 2 cm
Densidad	120 – 160 kg/m <sup>3</sup>

Fuente. Pérez, 2010.

En los ingenios de caña de azúcar, el bagazo es usualmente quemado para la generación de energía eléctrica logrando una eficiencia entre 10 – 20 % pequeña al ser comparada con la obtenida durante el proceso de gasificación que oscila entre 67 – 80 % (Anukan, 2016).

Mediante la gasificación de biomasa se puede obtener un rendimiento dos veces mayor al obtenido en calderas comunes (García, 2012).

La composición del bagazo de caña de azúcar es de suma importancia en la generación de la energía durante la gasificación. El modelo desarrollado en la construcción del gasificador, del que es parte esta investigación, necesita de ciertos componentes del bagazo para poder determinar las dimensiones del gasificador y la producción del syngas.

Se analiza los porcentajes de humedad, materia volátil, carbono fijo y contenido de ceniza del bagazo.

Estos análisis se producen calentando el material con el fin de descomponerlo generando sustancias volátiles cuyas principales moléculas son: CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y otros hidrocarburos.

Para los mencionados, primero se elimina la humedad de la materia mediante un proceso de desvolatilización obteniéndose una base seca para el análisis. El contenido general de humedad en el bagazo de caña es del 50%, previo a los exámenes de contenido la biomasa se somete a un proceso de secado que reduce el contenido de humedad.

La tabla 8 muestra los resultados de los análisis encontrados en la literatura.

Tabla 8.

*Análisis próximo del bagazo de caña de azúcar (base seca).*

Muestra	Humedad (%)	Materia Volátil (%)	Carbono fijo (%)	Ceniza (%)
1	1.14	69.99	16.39	1.42
2	9.51	74.98	13.57	1.94
3	No reportado	84.83	13.28	1.89
4	No reportado	75.80	20.11	4.21

Fuente. Anukan, 2016.

La variación presente en la tabla se debe, entre los diversos factores, a:

- La variedad del tipo de caña.
- Las condiciones de crecimiento: el suelo, minerales, el agua, la luz, etc.

La tabla 9 muestra el análisis elemental del bagazo.

Tabla 9.

*Análisis elemental o último del bagazo de caña de azúcar.*

Muestra	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
1	44.1	5.7	47.7	0.20	2.30
2	43.77	6.83	47.46	No reportado	No reportado
3	56.32	7.82	27.54	0.89	No reportado
4	44.1	5.26	44.4	0.19	No reportado

Fuente. Anukan, 2016.

Presenta contenidos altos de C, O, H, estos componentes juegan un rol importante en procesos termo químicos para la generación de combustible durante la gasificación.

Las biomásas como la caña de azúcar esta constituida por compuestos inorgánicos, como Cl, K y S, que afectan la eficiencia en la generación de energía. Para medir el contenido de tales componentes se debe realizar un análisis de cenizas.

Para estimar el poder calorífico de la biomasa se usa la ecuación de Dulong y la de Boje. La ecuación Dulong se utiliza bajo la restricción de O<sub>2</sub> en un contenido menor al 10 %.

La cantidad energética de las biomásas está dominada por la cantidad de C y O<sub>2</sub>, una cantidad alta de O<sub>2</sub> implica un bajo contenido energético. Esto eleva los costos en la producción y hace ineficiente el trabajo en factores económicos, requiriendo una mayor cantidad de biomasa.

Ecuación de Dulong (*Capareda SC, 2011*):

$$HV(MJ/kg) = 33.823 \times C + 144.250((H - O)/8) + 9419 \times S \quad (1)$$

HV: Poder calorífico superior

C, H, O, S: Son fracciones elementales en masa de la biomasa

Ecuación de Boie (*Capareda SC, 2011*):

$$HV(MJ/kg) = 35.160 \times C + 116.225 \times H - 11.090 \times O + 6.280 \times N + 10.465 \times S \quad (2)$$

C, H, O, N y S: Son fracciones elementales en masa de la biomasa

Son muchos los factores que influyen en la densidad aparente de la biomasa. El tamaño de partícula, forma, orientación de partícula, densidad específica de partículas individuales, tamaño de distribución de partícula, humedad intervienen en la densidad.

La densidad se determina con la siguiente fórmula (Nordin A, 1994):

$$\rho_b = \left( \frac{w_2 - w_1}{v} \right) \quad (3)$$

$\rho_b$  es la densidad específica del material en g/cm<sup>3</sup>.

$w_2$  es el peso del contenedor y la biomasa en gramos.

$w_1$  es el peso del contenedor en gramos.

$v$  es el volumen del contenedor en cm<sup>3</sup>.

La densidad aparente de las biomásas tiene especial influencia en la generación de energía, un valor bajo genera ineficiencia en la alimentación del gasificador afectando la producción de energía.

### 1.2.2. Hoja de caña de azúcar

La Universidad de Piura, en el año 2013, envió muestras de hoja de caña de azúcar a la Universidad Católica del Perú para que se realizaran análisis termoquímicos. En la tabla 10 se muestra el análisis termoquímico.

Tabla 10.

*Análisis termoquímicos de las hojas de caña de azúcar.*

Ensayos		Base de Análisis	Base Seca	Base Recibida	Método
Humedad recepción ADL	%			2.2	ASTM D 2013
<b>Análisis inmediato:</b>					
Humedad	%	10.1	-	12.1	ASTM D 3173
Cenizas	%	6.0	6.7	5.9	ASTM D 3174
Materia volátil	%	69.1	76.9	67.6	ASTM D 3175
Carbono fijo	%	14.8	16.4	14.4	ASTM D 3172
TOTAL	%	100.00	100.00	100.00	
Poder Calorífico Bruto	Cal/g	3,814	4,244	3,730	ASTM D 5865
	Cal/g	-	-	3,401	Cálculo ASTM D3286
<b>Análisis último:</b>					
Carbono	%	41.2	45.8	40.3	ASTM D 3178
Hidrógeno	%	6.29	5.74	6.40	ASTM D 3178
Azufre	%	0.24	0.27	0.23	ASTM D 3177, met B
Nitrógeno	%	0.20	0.22	0.20	ASTM D 3179
Cenizas	%	6.0	6.7	5.9	ASTM D 3174
Oxígeno por diferencia	%	46.1	41.3	47.1	-
Cloro	%	0.26	0.29	0.25	ASTM D 2361

Fuente .García, 2017.



## **Capítulo 2**

### **Impurezas en el gas de síntesis**

#### **2.1. Contaminantes**

El gas de síntesis o gas pobre producido por las diferentes biomásas tiene como principales componentes:  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$  y diferentes contaminantes. La composición del gas depende de: la biomasa, proceso de gasificación, condiciones de operación y agente gasificante, de esta manera su contenido energético y cantidad de contaminantes varía (Ruiz E., 2014). Las partículas son compuestos que dañan el funcionamiento del sistema al no quemarse de forma adecuada, el azufre se convierte principalmente en  $H_2S$ , el nitrógeno en  $NH_3$  y  $HCN$ . Los ácidos halogenados, principalmente,  $HCl$  y  $HF$  se encuentran en menor cantidad al igual que los elementos condensables (elementos traza, metales alcalinos y otros compuestos) (García, 2012).

Los contaminantes se han dividido en partículas, componentes ácidos, condensables, alquitranes y compuestos nitrogenados. La depuración de componentes ácidos y nitrogenados no influye notablemente en la eficiencia de motores de combustión interna o turbinas, sin embargo, sí en la producción de gases altamente contaminantes para el medio ambiente.

Las impurezas dificultan el uso del syngas en aplicaciones de generación de energía. Debido a esto se hace un proceso de limpieza y refrigeración para obtener las mejores condiciones de trabajo y eficiencia.

La tabla 11 muestra los contaminantes presentes en el gas de síntesis y sus efectos negativos, así como los posibles métodos de limpieza.

### 2.1.1. Los contaminantes principales

Los contaminantes principales pueden ser divididos en 5 componentes:

1. Partículas.
2. Alquitranes o tars.
3. Componentes ácidos.
4. Componentes condensables.
5. Componentes nitrogenados.

Tabla 11.

*Contaminantes, efectos negativos y métodos de limpieza.*

Contaminante	Ejemplos	Problemas	Método de limpieza
Partículas	Cenizas, char	Erosión	Filtrado, lavado, depuración
Alquitranes	Ligeros, pesados	Taponamiento, atasco, corrosión, ensuciamiento	Depuración con caliza o dolomita, lavado
Componentes Ácidos (derivados de S, haluros)	H <sub>2</sub> S, HCl, HF, HBr	Corrosión, emisiones, envenenamiento	Depuración con caliza o dolomita, absorción, adsorción
Condensables (elementos traza, metales alcalinos)	Hg, etc, Na, K	Corrosión en caliente	Enfriamiento, condensación, filtración, adsorción
Compuestos Nitrogenados	NH <sub>3</sub> , HCN	Contaminación ambiental	Depuración con caliza o dolomita, lavado

Fuente. García, 2012.

#### 2.1.1.1. Partículas

Las partículas son elementos erosivos, cohesivos, reactivos y adhesivos que se encuentran en fase sólida. Constituidas, principalmente, por cenizas, las cuales se depositan en los equipos causando obstrucción y disminuyendo su vida útil.

La limpieza de partículas depende de la pureza que se requiera en el uso del syngas. Si se requiere un syngas más limpio es necesario usar filtros cerámicos o precipitadores electrostáticos, que eliminan partículas de 0.1 y 100 µm y con el uso de lavado se logra eliminar partículas de más de 1 µm (López, 2015).

### 2.1.1.2. Alquitranes o tars

Se consideran tars o hidrocarburos, los cuales están compuesto por grandes cantidades de átomos de carbono. Su condensación se da a temperaturas de 200 – 600 °C. Esto presenta serios problemas aguas arriba, puesto que se deposita en equipos como condensadores, intercambiadores de calor, filtros cerámicos, turbina de gas, motores, generando problemas de taponamiento (López, 2015). La tabla 12 muestra los alquitranes formados dependiendo de la temperatura.

La limpieza de los alquitranes se puede dar dentro del gasificador aumentando el caudal del agente gasificante (vapor, aire), un nivel alto del caudal reduce los niveles de alquitranes y coque, pero a la vez se reduce el poder calorífico del syngas. También se puede hacer uso de catalizadores como material de lecho (dolomita, caliza u olivino), los cuales reducen los niveles de alquitrán (López, 2015).

La tabla 13 muestra los materiales de lecho en diferentes condiciones y el resultado obtenido respecto a los tars. Se observa que la dolomita y el olivino como material de lecho tienen mejores resultados respecto a la disminución de tars.

Tabla 12.

*Formación de alquitranes.*

<b>Categorías</b>	<b>Temperatura de formación</b>	<b>Componentes principales</b>
Primarios	400 – 600 °C	Oxigenados y éteres fenólicos
Secundarios	600 – 800 °C	Éteres heterocíclicos y alquifenoles
Terciarios	800 – 1000 °C	Aromáticos polinucleicos

*Fuente.* López, 2015.

La limpieza del gas a la salida del gasificador se puede dar mediante lavado. Permite condensar los alquitranes mediante el uso de una corriente líquida (agua, solución ácida, solución alcalina, etc.), de esta manera se reduce el nivel de alquitranes y también la concentración de partículas, ácido clorhídrico, óxido de azufre y metales alcalinos. El problema de este método es el lavado pos tratamiento del líquido residual, la cual termina con altos niveles de toxicidad (López, 2015).

La torre de lavado o Wet Scrubbing mediante el uso de un absorbente líquido retira los tars de la corriente de syngas. El absorbente líquido más usado es el agua por su bajo costo. La eficiencia del Wet Scrubbing depende del tipo de absorbente líquido usado. El agua como absorbente tiene una limitada eficiencia respecto a los componentes de tars eliminados. Se añade la desventaja de costo del tratamiento del residuo acuoso. Además, considerando la pérdida de energía al reducir la temperatura.

### 2.1.1.3. Compuestos ácidos

Los componentes ácidos en su mayoría se encuentran conformados por derivados del azufre y, en menor cantidad, por los compuestos halogenados ( $HCl$ ,  $HF$ ,  $HBr$ ).

Los compuestos halogenados como el ácido clorhídrico aún en menores proporciones presentan serios problemas, generan corrosión en el sistema aguas abajo. El cloro se encuentra en las cenizas y en el flujo de gas en forma de ácido clorhídrico  $HCl$ . Los métodos de limpieza usados son mediante adsorbentes (carbonato sódico y óxido de calcio) (Leon, 2016) y lavado con una corriente líquida (López, 2015).

Los compuestos sulfurados tienen mayor impacto que los compuestos clóricos, altas concentraciones generan efectos irreversibles (el azufre forma principalmente el ácido sulfúrico ( $H_2S$ ) y sulfuro de carbonilo ( $COS$ ) en el gas de síntesis) (López, 2015).

Usar un lecho de dolomita o caliza reduce el contenido de compuestos sulfurados. Siguiendo un proceso de calcinación a temperaturas entre  $800 - 900^\circ C$  se elimina el  $H_2S$  con gran eficacia y por absorción (absorción química usando un reactivo alcalino que reacciona con los gases ácidos y física donde no existe reacción química entre el gas y la disolución) a temperaturas menores a  $100^\circ C$  (López, 2015), la absorción física elimina a la vez algunos elementos traza de otros contaminantes.

#### **2.1.1.4. Componentes condensables**

Durante la pirólisis se forman gases condensables (hidrocarburos pesados).

#### **2.1.1.5. Elementos traza**

Según Rodríguez (2013) un 70% de los elementos traza encontrados en el gas de síntesis, provienen de la biomasa gasificada y aproximadamente un 25% del sistema de gasificación.

Su eliminación se da mediante absorción. De esta forma se quedan en fase sólida y pueden ser eliminados mediante el filtrado de partículas (García, 2012). Otra forma de eliminar los elementos traza es mediante el lavado (Gonzalez, 2015).

#### **2.1.1.6. Alcalinos**

Los compuestos como potasio y sodio generan problemas por ser volátiles a altas temperaturas, forman escoria en la sintetización y generan deposición en las cenizas provocando una desfluidización del lecho (López, 2015).

Con una temperatura de condensación entre 500–650 °C, enfriar los gases debajo de dicha temperatura permite que los metales alcalinos se depositen en las partículas, permitiendo su eliminación mediante un sistema de filtrado (López, 2015).

#### **2.1.1.7. Compuestos nitrogenados**

El nitrógeno contenido en la biomasa forma amoníaco ( $\text{NH}_3$ , genera  $\text{NO}_x$  al ser usado en motores y turbinas, el cual es un gran contaminante ambiental), óxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y otros  $\text{NO}_x$ ), cianuro ( $\text{HCN}$ ) y  $\text{N}_2$ .

La formación de  $\text{NH}_3$  se favorece al trabajar con temperaturas inferiores a 800 °C, obteniéndose un 60% del peso del N convertido en amoníaco. Temperaturas más altas reducen el contenido de  $\text{NH}_3$  favoreciendo a la formación de  $\text{N}_2$  (Nourredine Abdoulmoumine, 2015).

Tabla 13.

*Resumen de aditivos en lecho para diferentes condiciones de operación.*

Biomasa	Propiedades de la biomasa		Condiciones de operación			Aditivo	Resultado
	Humedad (%)	Tamaño (mm)	Agente gasificante	Temp (°C)	Tiempo (s)		
Madera	-	-	Vapor	750	-	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5 -10 veces la disminución de tars
Aserrín de pino	8.5	1.0	Vapor	750	-	Dolomita FCC	80% de reducción en tars 21% de reducción en tars
Pedazos de pino	10 – 12	-5.0 – 1.0	Vapor y O <sub>2</sub>	795 – 835	-	Dolomita	80% de reducción en tars
Aserrín de pino	10		CO <sub>2</sub>	700	-	Ni – Al	Mejora la distribución del gas
Pedazos de pino	-	-	Aire, vapor y O <sub>2</sub>	800 – 845	-	Dolomita	10 veces la disminución de tars
Pedazos de pino	10 – 15	-	Vapor	770 – 820	-	Dolomita FCC	90% de reducción en tars 56% de reducción en tars
Cáscara de almendra	7.9	1.1	Vapor	700 – 820	-	Olivino	94% de reducción en tars
Abedul	6 – 8	1.0 – 3.0	O <sub>2</sub> y N <sub>2</sub>	700 – 900	-	Dolomita	5.3 g tar/kg combustible seco
Bagazo de pino	-	-	Vapor	750	30	Olivino Ni	4 g tar/kg combustible seco Conversión alta de carbón

Fuente. Acosta, 2015.

Su limpieza se da mediante lavado (Wet Scrubbers) o el uso de algún material en el lecho, la dolomita como material de lecho consigue hasta un 99% en la limpieza de amoníaco, a la vez que se eliminan alquitranes (López, 2015), la desventaja del uso de dolomita es su costo y su tiempo de reemplazo o reusó.

El uso de Wet Scrubbers mediante lavado o rociado es recomendable para la limpieza de amoníaco (NH<sub>3</sub>) y cianuro. Esto se debe a su alta solubilidad, convenientemente se eliminan componentes de tars, con el uso convencional de agua (Spray Tower) como solvente se logra obtener una limpieza mayor al 99% del amoníaco contenido en la corriente de syngas.

## Capítulo 3

### Tecnologías de limpieza

En este capítulo se trabajarán las distintas tecnologías utilizadas para la limpieza del gas obtenido a partir de la gasificación de biomásas. Además, se presenta esquemas de limpieza usados por distintos centros de investigación.

#### 3.1. Tecnologías de limpieza

Entre las tecnologías de limpieza se encuentran los ciclones, filtros (mangas, filtros cerámicos, filtros metálicos, filtros de material granular), precipitadores electrostáticos (ESP), torres de lavado, scrubbers húmedos, etc. Cabe resaltar la difícil tarea de calcular la eficiencia de los distintos dispositivos, la mayoría son estimados experimentalmente (Sánchez, 2007).

La Figura 4 muestra la eficiencia de la remoción del particulado respecto a distintas tecnologías.

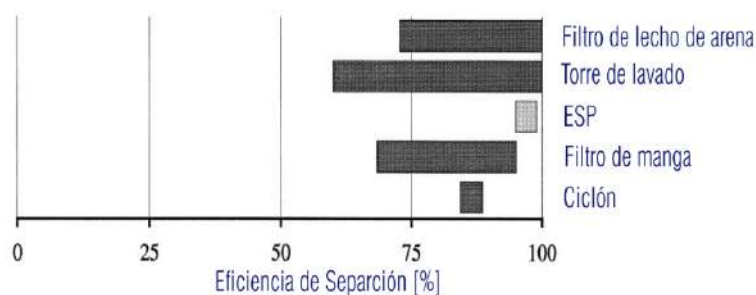


Figura 4. Eficiencia de equipos de separación de particulado.

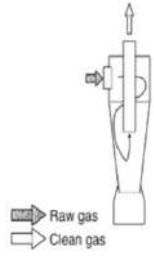
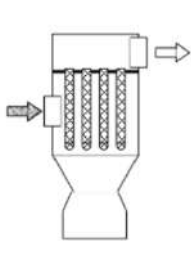
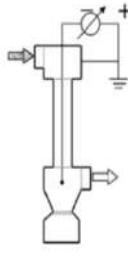
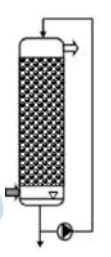
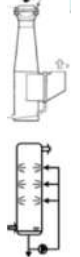
Fuente: Sánchez, 2007.

La tabla 14 realizada por el Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) hace un resumen de las tecnologías usadas para la separación de partículas de los gases. Se observa que los ciclones son capaces de retirar eficientemente partículas mayores a  $5 \mu\text{m}$ , los precipitadores

electrostáticos (Electrostatic precipitators ESP) a  $0.01 \mu\text{m}$  y los Wet Scrubber a  $1 \mu\text{m}$  (FOEN, 2010).

Tabla 14.

*Tecnologías de limpieza de separación de partículas.*

Partículas gruesas de polvo		Separación de partículas finas							
Precipitación por inercia		Filtro		Precipitador electrostático ESP		Wet Scrubber			
$50 > \mu\text{m} > 5 \mu\text{m}$		$> 0.01 \mu\text{m}$		$> 0.01 \mu\text{m}$		$> 1 \mu\text{m}$			
Inercia	Fuerza centrífuga	Filtros acumulativos	Filtros de superficie	Dry ESP	Wet ESP	Inyección de gas	Inyección de gotas		
Sedimentación	Ciclón	Ej. Una dirección de filtros de aire	Filtros de tela	Tube ESP Plate ESP	Tube ESP Plate ESP	Torre de relleno	Torre Venturi Jet		
									

Fuente: FOEN, 2010.

La figura 5 muestra la eficiencia de separación respecto al tamaño de partícula:

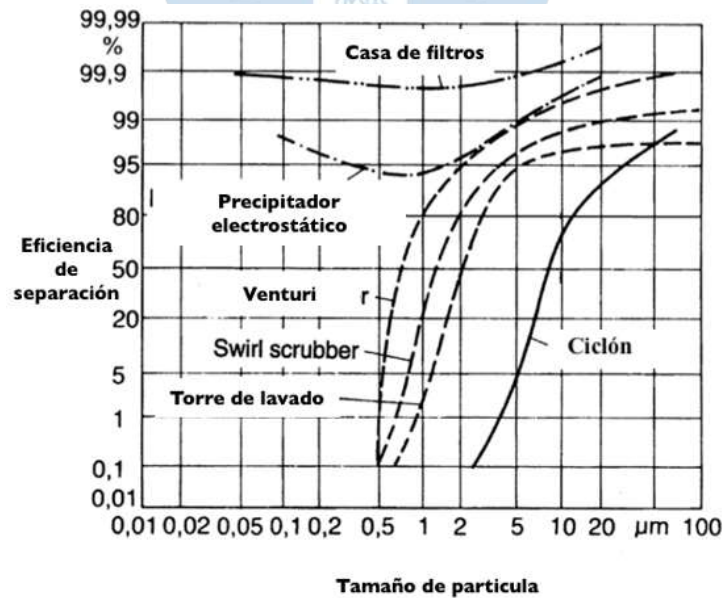


Figura 5. Eficiencia de sistemas de colección de partículas.  
Fuente: FOEN, 2010.

Se observa que los filtros electrostáticos y los “fabric filter o bag houses” tienen un mejor comportamiento respecto a la remoción de partículas pequeñas.

Las tablas 15 y 16 muestran diferentes tecnologías de limpieza de syngas, obtenidos a través de gasificadores de biomasa a baja escala (100-5000 kW), estudiados por Hasler (1998).

La tabla 15 muestra las características y el porcentaje de remoción de diferentes contaminantes para distintas tecnologías. La información se obtiene de la gasificación de diferentes biomásas, el craqueo de tars mediante catalizadores es una opción para trabajar a altas temperaturas, el atomizador rotacional y el precipitador electrostático tienen mayor eficiencia en la separación de partículas.

Tabla 15.

*Reducción de partículas y tars en varias tecnologías de gasificación.*

Método de limpieza	T °C	Reducción de partículas (%)	Reducción de Tars (%)	Reducción de NH <sub>3</sub> (%)	Reducción de HCL (%)	Reducción de H <sub>2</sub> S (%)
Craqueado catalítico	900	-	> 95	-	-	-
Fabric Filter	200	60 – 85	-25 – 0	-	-	-
Filtro de lecho de arena	10 – 20	70 – 95	60 – 95	> 95	90	80 – 95
Torre rotacional de agua	50 – 60	70 – 90	10 – 25	-	-	-
Venture Scrubber	-	-	50 – 90	-	-	-
Atomizador rotacional	< 100	95 – 99	-	-	90	> 95
Precipitador electrostático húmedo	40 – 50	> 99	0 – 60	-	-	-

Fuente. Hasler, 1999

La tabla 16 muestra las eficiencias alcanzadas por distintas tecnologías en un gasificador en contracorriente alimentado con cáscara de arroz (Hasler P. a., 1997).

Tabla 16.

*Métodos de limpieza y su eficiencia en la remoción de partículas y tars.*

<b>Método</b>	<b>Remoción de partícula (%)</b>	<b>Remoción de tars (%)</b>
Filtro de cama de arena	70 – 99	50 – 97
Torre de lavado	60 – 88	10 – 25
Venturi Scrubber		50 – 90
Precipitador electrostático húmedo	> 99	0 – 60
Fabric Filter	70 – 95	0 – 50
Separador de partículas rotacional	85 – 90	30 – 70
Lecho fijo Absorbedor de tar	-	50

Fuente. Hasler, 1997.

Las eficiencias de las distintas tecnologías de limpieza dependen de las temperaturas de operación y la presión de trabajo, la condensación de los tars se da entre 375-400 °C según el análisis realizado por US National renewable energy laboratory report (2006). La tabla 17 muestra las diferentes temperaturas de trabajo de los equipos de limpieza.

Tabla 17.

*Condiciones de operación y eficiencia de equipos de remoción de partículas.*

<b>Separador de polvo</b>	<b>Rango de temperatura (°C)</b>	<b>Eficiencia de desempolvado</b>	<b>Caída de presión (kPa)</b>
Ciclón	100 – 900	> 5 $\mu\text{m}$ 80%	< 10
Fabric bag filters	60 – 250	> 0.3 $\mu\text{m}$ 99 – 99.8%	1 – 2.5
Wet Scrubbers	20 – 100	0.1 – 1 $\mu\text{m}$ 85 – 95%	5 – 20
Filtros de fibras cerámicas	200 – 800	> 0.3 $\mu\text{m}$ 99 – 99.8%	1 – 2.5

Fuente. Laurence, 2011.

Tabla 17 (continuación).

*Condiciones de operación y eficiencia de equipos de remoción de partículas.*

<b>Separador de polvo</b>	<b>Rango de temperatura (°C)</b>	<b>Eficiencia de despolvado</b>	<b>Caída de presión (kPa)</b>
Filtros de cerámica rígida	200 – 800	> 0.1 $\mu m$ 99.5 – 99.99%	1 – 5
Filtros metálicos	200 – 800	> 1 $\mu m$ 99 – 99.5%	< 1
Filtros de lecho granulado	200 – 800	Depende altamente de la filtración del lecho	< 10

Fuente. Laurence, 2011.

### 3.1.1. Ciclón

Según García (2012), el ciclón es un separador de partículas inercial que tiene como finalidad eliminar las partículas de gran tamaño de la corriente del syngas. El ciclón permite trabajar con temperaturas hasta 900 °C (López, 2015).

Existen dos tipos de ciclones:

- Flujo axial: el gas se impulsa por unas palas para que pasen a través del ciclón, se utiliza en ambientes muy polvorientos como el desierto.
- Flujo inverso: el gas pasa a través del ciclón usando su misma presión, por lo que no se necesita de ningún dispositivo que le dé movimiento al gas.

La tabla 18 muestra la eficiencia del ciclón respecto al tamaño de partícula.

Tabla 18.

*Eficiencia del ciclón respecto al tamaño de partícula.*

<b>Tamaño de partículas (<math>\mu m</math>)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
15	95
10	92
6	90
2,5	70
1,25	60
1	50
0,625	20

Fuente. García, 2012.

La figura 6 es un separador de partículas rotacional, usa un cilindro rotativo con canales de un diámetro interior de 2.2 mm. El filtro puede trabajar con una velocidad fija o variada, se obtiene una eficiencia de 85 – 90% en remoción de partículas y 30 – 70% respecto a tars y trabaja con una temperatura de 100 – 900 °C.

En los sistemas de limpieza se suelen usar dos o más ciclones para evitar el pase de partículas de gran tamaño en los sistemas de limpieza posteriores. Como se observará en los esquemas de limpieza mostrados posteriormente.

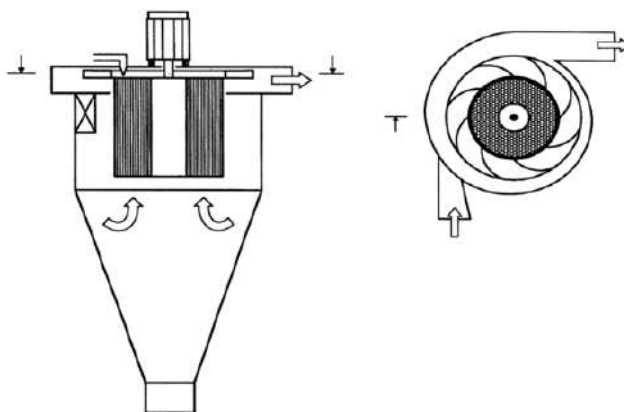


Figura 6. Separador de partículas rotacional.

Fuente: P. Hasler, 1999.

### 3.1.2. Filtros

Los filtros permiten la limpieza mediante la eliminación de partículas de tar condensadas, o mediante lechos granulados que adsorben los contaminantes.

Los filtros cerámicos tienen mejor rendimiento al resistir altas temperaturas de trabajo. Son los más usados ya que permiten trabajar con temperaturas relativamente altas 200 °C y 900 °C y a presiones de 1 a 3 MPa.

Los filtros metálicos también son una buena opción a altas temperatura, pero tiene la desventaja de presentar corrosión frente a la presencia de azufre y metales alcalinos.

Los filtros de mangas pueden retener un alto contenido de partículas de pequeño tamaño, pero sufren daños a altas temperaturas y no son resistentes a impactos metálicos por lo que trabajan con velocidades de gases menores a 5 cm/s.

### a. Filtros cerámicos

Los filtros cerámicos son muy resistentes a la corrosión y a las altas temperaturas, están formados por velas cilíndricas huecas y alargadas con un extremo cerrado. Estas velas actúan como barreras donde el gas choca y sus impurezas se quedan impregnadas en la pared de las velas y el gas atraviesa al interior (García, 2012).

Estos filtros trabajan a temperaturas y presiones elevadas entre 450 – 550°C y presiones 8 – 10 *bar* (Fonseca, 2003) puesto que se debe evitar la condensación del tar.

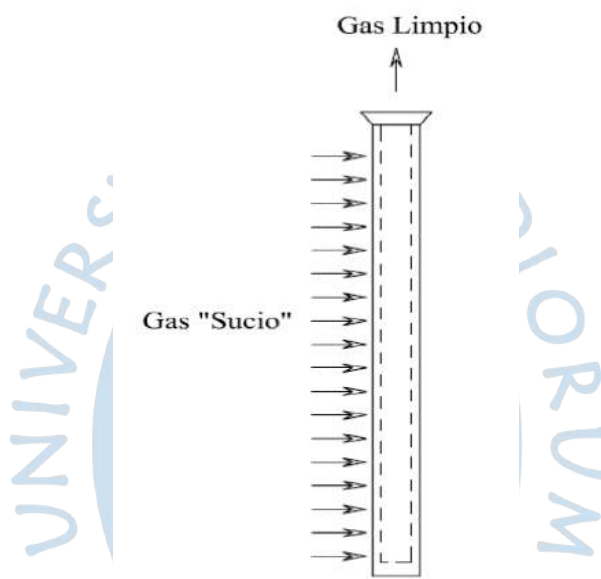


Figura 7. Vela del filtro cerámico.

Fuente: García, 2012.

### b. Filtro de bolsas cerradas y abiertas

Son filtros donde la separación sólido-gas se da mediante un medio poroso, el elemento filtrante es una manga tejida o bolsas cerradas y abiertas en los extremos de gran longitud respecto a su diámetro. Se puede distinguir dos configuraciones cuando el gas atraviesa las mangas por el exterior (figura 8) o por el interior (figura 9). En ambos casos, el gas atraviesa las mangas ascendentemente, quedándose atrapadas las impurezas en el interior o exterior de las mangas.

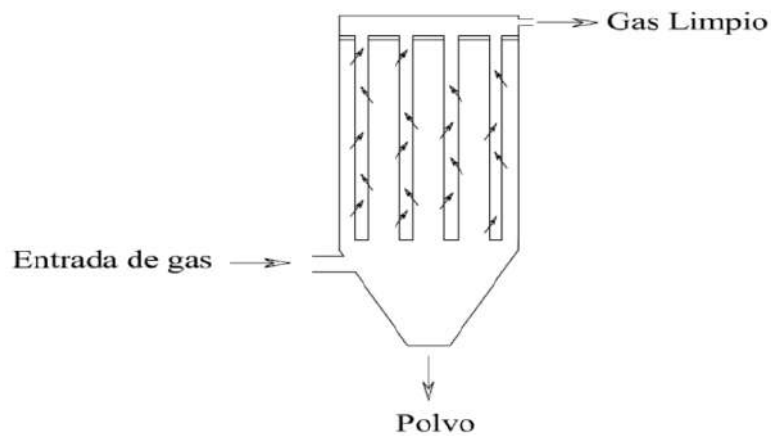


Figura 8. Configuración de recogida de polvo exterior.

Fuente: García, 2012

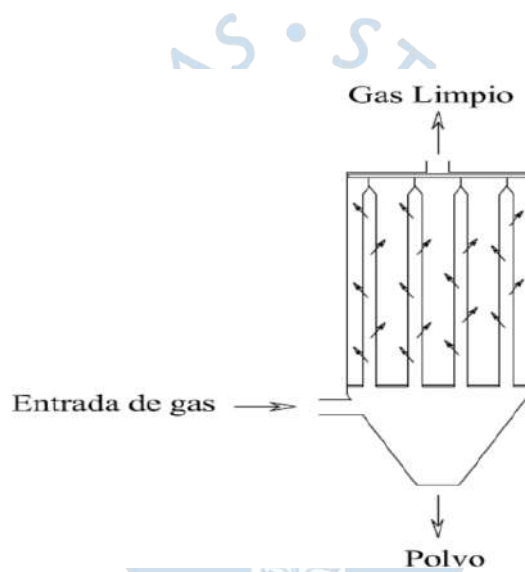


Figura 9. Configuración de recogida de polvo exterior.

Fuente: García, 2012.

Estos filtros tienen una eficiencia del 99 – 99.99%, tienen una baja eficiencia al trabajar con altas temperatura (García, 2012).

### c. Filtro de tela “Altas potencias” trabajado por Hasler (1999)

La figura 10 muestra el esquema de filtro de tela investigado por IISc/Dasag gasifier. Las tuberías del gas y la carcasa del filtro son calentadas por encima de 350 °C, el tejido de cerámica puede trabajar por debajo de 600 °C, la condensación de tars en los filtros se observa a temperaturas debajo de 300 °C. Se obtiene una remoción de partículas entre 70-95% y de 0-50% (Hasler, 1999).

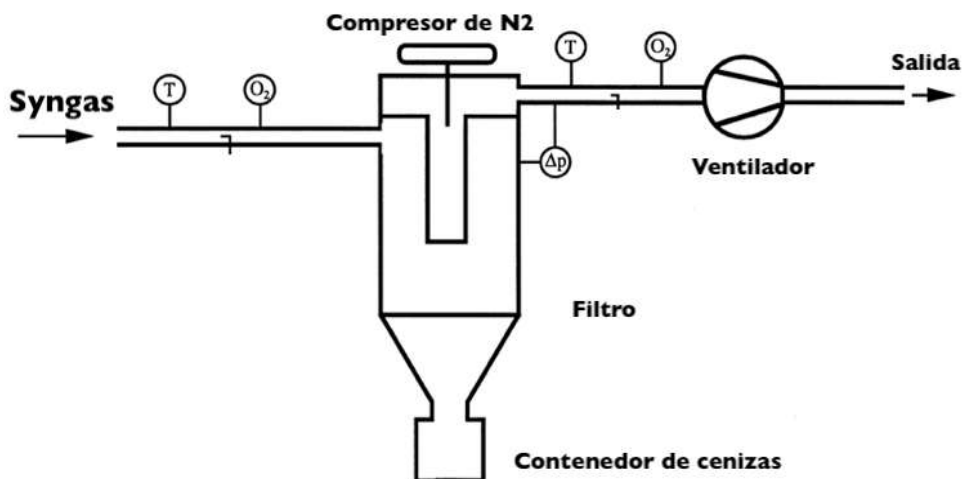


Figura 10. Filtro de tela diseñado por IISc/Dasag gasifier.

Fuente: Hasler, 1999.

Los filtros de tela son usados para potencias mayores a 200 kW. Eliminan partículas, sustancias ácidas como HCl y alquitranes por absorción mediante una capa de filtrado.

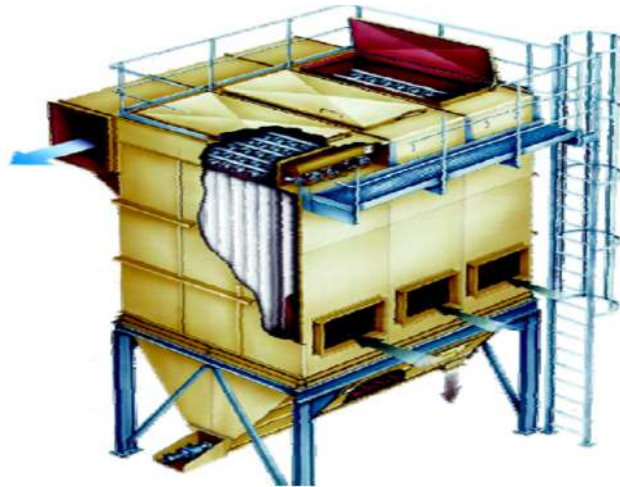
A la vez estos presentan un alto consumo de energía debido a la caída de presión y a la inyección de aire presurizado en el periodo de limpieza. Están optimizados para gases secos, puesto que los filtros de tela pueden dañarse si es que el vapor de agua u otras sustancias del syngas llegan a condensar, generando así una interrupción en la operación de la planta (Hasler, 1999).

#### d. Filtro de tela “Alta potencia” trabajado por FOEN (2010)

Según el FOEN (2010) para evitar la condensación, los filtros de tela deben trabajar con temperaturas mayores a 120°C para corrientes de gas seco y mayores a 140°C para corrientes de gas húmedo. La figura 11 muestra un filtro de tela para una potencia de 400 kW a 1 MW.

Filtros de velas metálicas. Son filtros usados para trabajar con temperaturas altas, removiendo partículas menores a 1  $\mu\text{m}$ . Pueden ser diseñados para trabajar a diferentes temperaturas dependiendo del material de construcción, por ejemplo, los filtros de acero inoxidable trabajan a temperaturas menores a 350°C, mientras uno hecho de inconel (súper aleación de níquel-cromo austenítico) alcanza temperaturas por encima de 980°C.

Es recomendable que la corriente del gas este a una temperatura por encima de la condensación de los tars (U.S. Department of Energy, 2006).



*Figura 11.* Filtro de tela para altas potencias.

Fuente: FOEN, 2010.

#### e. **Filtros de lecho granular**

Los filtros de lecho granular usan materiales de partículas de gran tamaño (cientos de micrómetros). Materiales como la arena o el cuarzo.

Se pueden distinguir en tres (García, 2012):

- Lecho fijo: el material granular permanece inmóvil, pasando a través del syngas.
- Lecho móvil: el material granular se mueve por acción de la gravedad.
- Lecho fluidizado: el lecho fluidizado por acción de la presión y temperatura, el proceso de filtrado se da cerca de la salida del gas.

La figura 12 muestra dos filtros granulares, uno de arena gruesa y el otro de arena fina. El gas deja los filtros a una temperatura entre 5 - 25°C. Estos filtros muestran una gran desventaja en su limpieza respecto a otras tecnologías, se debe tener mucha precaución en su limpieza puesto que los alquitranes son altamente tóxicos. Se obtiene una eficacia del 70 - 99% respecto a la limpieza de partículas y del 50 - 97% respecto a tars (Hasler, 1999).

### 3.1.3. Precipitador electrostático

Se basa en un campo eléctrico, el cual carga eléctricamente las partículas sólidas y líquidas yacentes en el gas para ser separadas por ánodos (Palatnic, 2011).

Este filtro trabaja con temperaturas alrededor de los 200°C, siendo de poca eficiencia al ser usado con gases a alta temperatura. (García, 2012).

Para potencias mayores a 200 kW y eficiencia del 90 - 95% en la remoción de partículas (menores a 1 micra) es común el uso de Dry electrostatic precipitators (FOEN, 2010). La figura 13 muestra un precipitador de alta potencia.

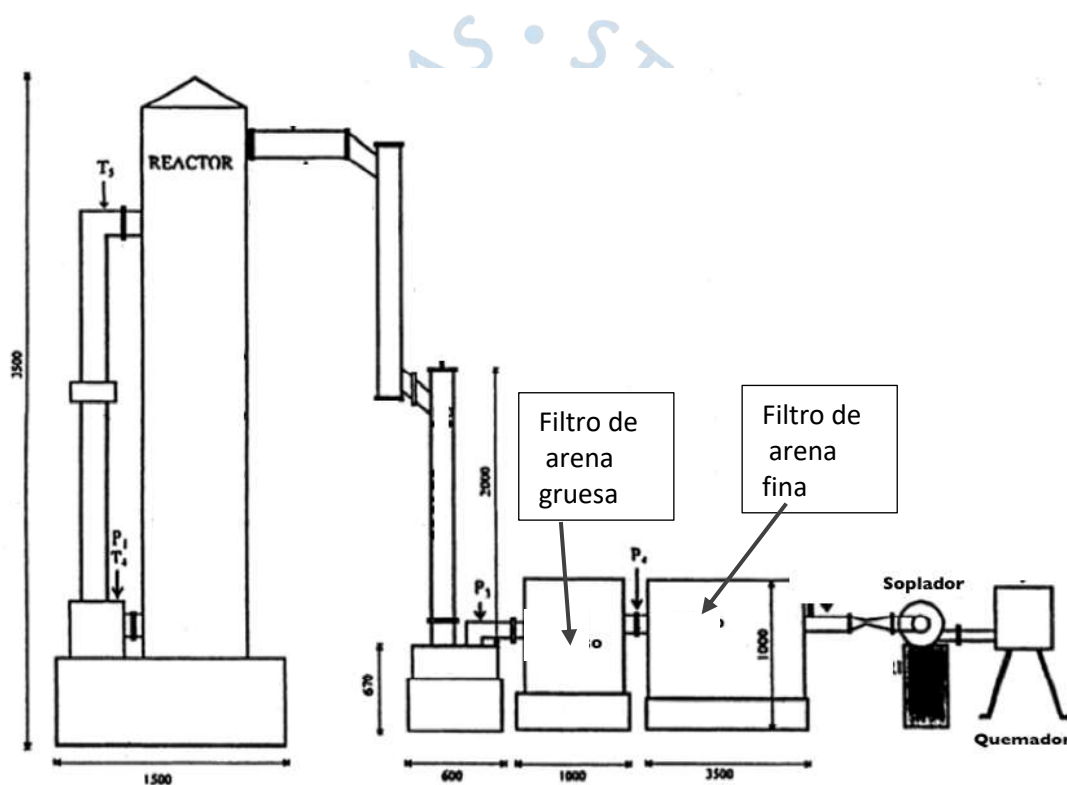


Figura 12. Esquema de gasificación donde se usan dos filtros de arena.

Fuente: Hasler, 1999.

Se han construido precipitadores basados en los principios de ESP para aplicaciones de baja potencia menor a 100 kW, usando un tubo-chimenea de metal como colector de electrodos. Su eficiencia puede llegar aproximadamente entre 80 - 90%, siendo una tecnología eficiente para baja potencia. (FOEN, 2010). La figura 14 muestra un precipitador de baja potencia.

En general, los filtros electrostáticos presentan la desventaja de ser altamente costosos, a la vez que su uso puede generar cambios en la temperaturas y presiones, composición del gas y partículas cargadas (U.S. Department of Energy, 2006).



Figura 13. Precipitador electrostático de alta potencia.

Fuente: FOEN, 2010.

La figura 14 muestra un precipitador electrostático de baja potencia.

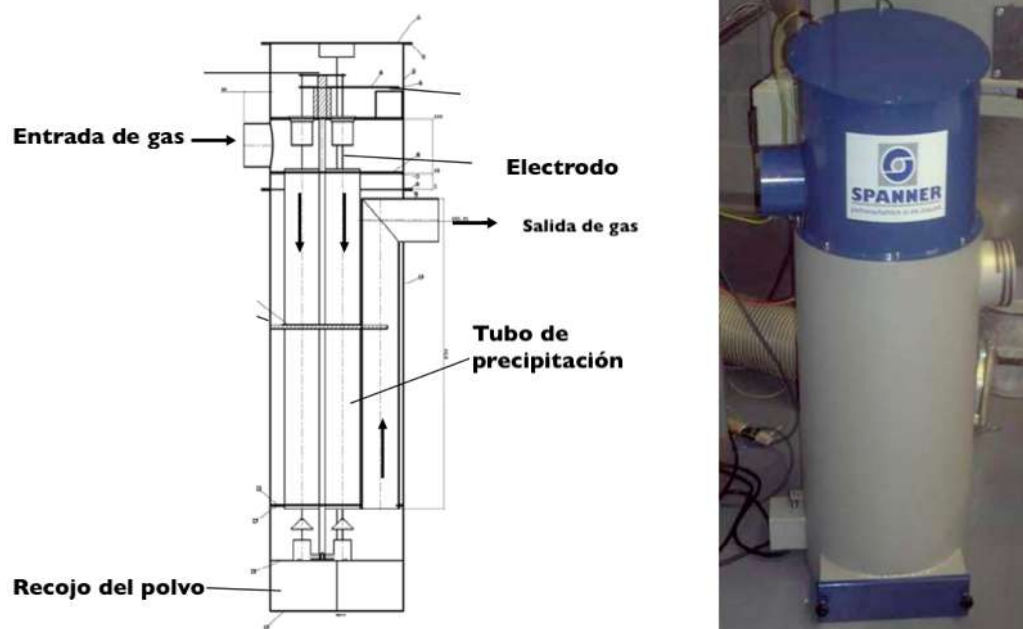


Figura 14. Precipitador electrostático de baja potencia.

Fuente: FOEN, 2010.

### 3.1.4. Dry scrubbing, o lavado seco

Este proceso consiste en la inyección de un absorbente sólido ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaOH}$ ) en la corriente del syngas de tal forma, que reaccione con los componentes ácidos formando sólidos que pueden ser eliminados aguas arriba. La inyección de estos componentes se puede realizar en varias partes del sistema de gasificación antes de ingresar al de limpieza, de esta forma se eliminan los componentes ácidos conjuntamente con las partículas. Trabaja a temperaturas entre 100 – 1300°C.

Este proceso trabajado en conjunto con filtros resulta muy eficiente. Una de las ventajas de este método es la eliminación del tratamiento de aguas residuales (García, 2012).

### 3.1.5. Torre de lavado o scrubber húmedo

La torre de lavado permite enfriar y limpiar el gas antes de ser usado en una aplicación. El contacto entre la corriente del gas y la del líquido (en forma de pequeñas gotas) da paso a la absorción o disolución de uno o más componentes en la corriente líquida (disolvente). La temperatura de trabajo no debe superar los 100°C (López, 2015).

La absorción, puede ser física o química. Es física cuando no existe una reacción entre el solvente (agua o hidrocarburos) y el soluto y es química cuando sucede una reacción en la fase líquida, aumentando la velocidad de absorción (Sanchez, 2007).

El gas asciende (debido a la diferencia de presión entre la entrada y la salida) en contracorriente con el líquido, al mismo tiempo que es rociado con agua desde la parte superior. El gas limpio sale por la parte superior y el agua residual por la parte inferior de la torre, es necesario hacer una limpieza del agua residual, debido a que contiene los contaminantes ácidos condensados del gas de síntesis.

La torre de lavado permite eliminar compuestos como: dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, ácido clorhídrico, óxido de nitrógeno, cloro, dióxido de carbono, amoníaco, dióxido de cloro, ácido fluorhídrico, aminas, mercaptanos, óxido de etileno, alcoholes, fenol, ácido sulfúrico, ácido acético. La figura 15 muestra una torre de lavado (Sanchez, 2007).

La torre de lavado de la figura 16 se utiliza en un gasificador de lecho en Switzerland. El gas deja el gasificador a temperaturas entre 400 – 600 °C. Pasa por un ventilador húmedo y es

rociado con una corriente de agua. Un separador de gotas remueve las partículas y los tars. El gas deja la torre entre una temperatura de 45 – 60 °C (Hasler, 1999).

### 3.1.6. Eyector venturi scrubber

Se basa en el principio de funcionamiento de una tobera Venturi. Con una alta velocidad de chorro y gracias a la disminución de área en el cuello del Venturi, se logra distribuir el líquido en gotas finas. El líquido se inyecta verticalmente al flujo de gas, permitiendo así el arrastre de contaminantes (Sanchez, 2007).

El eyector opera en condiciones cercanas al vacío, con altas caídas de presión que favorecen la eliminación de tars. La figura 17 muestra un eyector venturi scrubber.

### 3.1.7. Adsorción

Se usan materiales cuya superficie sirve para retener contaminantes. Son utilizados como complementos a un filtro (Acosta, 2015).

Kadam (2009) de Bnro University of Technology (República Checa) utiliza carbón activado, char de carbón (residuo carbonoso) y coque como materiales aditivos en un filtro. La limpieza se realizó en un gasificador atmosférico de lecho fluidizado, con una temperatura de gasificación de 800°C. La temperatura de los filtros se trabajó entre 70 – 120°C. Se obtuvo un rendimiento entre el 95 – 100% en la eliminación de tars.

La tabla 19 muestra los resultados obtenidos a la salida de los filtros. Se eliminó un gran número de contaminantes de la corriente del gas, logrando incluso el 100% de algunos componentes.

Toshiaki Hanaoka (2012) del Biomass Technology Research Center (Japón) usa carbón activo impregnado con Hierro, donde la muestra 1 representa el carbón sin aditivos, muestra 2 y muestra 3 representa el 9% y 17%, respectivamente, del hierro impregnado en el carbón activo (Tabla 20) (Toshiaki Hanaoka, 2012).

El esquema de la figura 18 es el usado en la limpieza de la gasificación de biomasa, se empaqueta los filtros A y B con la muestra 3.

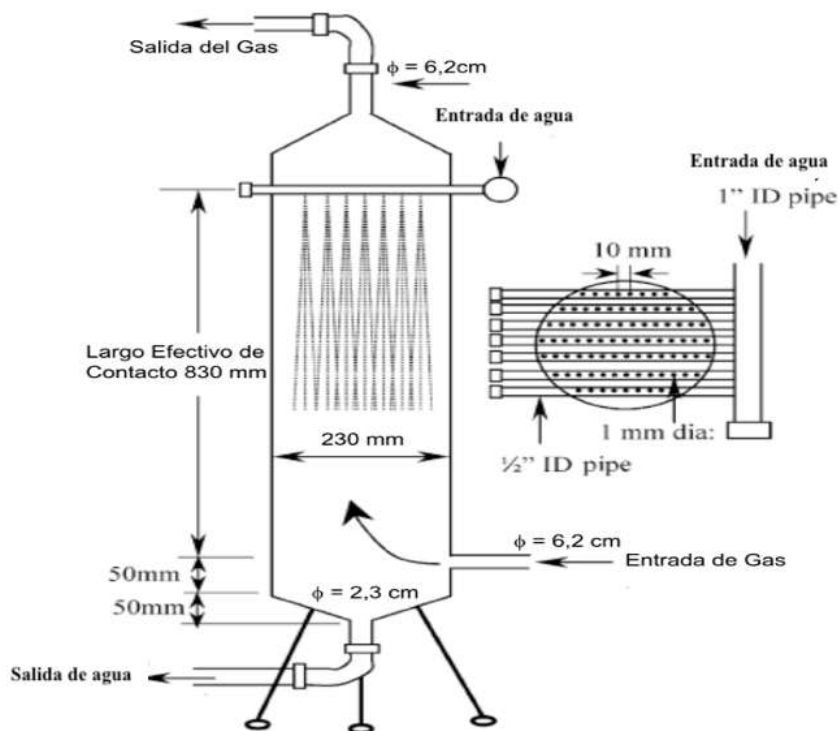


Figura 15. Torre de lavado en contracorriente.

Fuente: Sánchez, 2007.

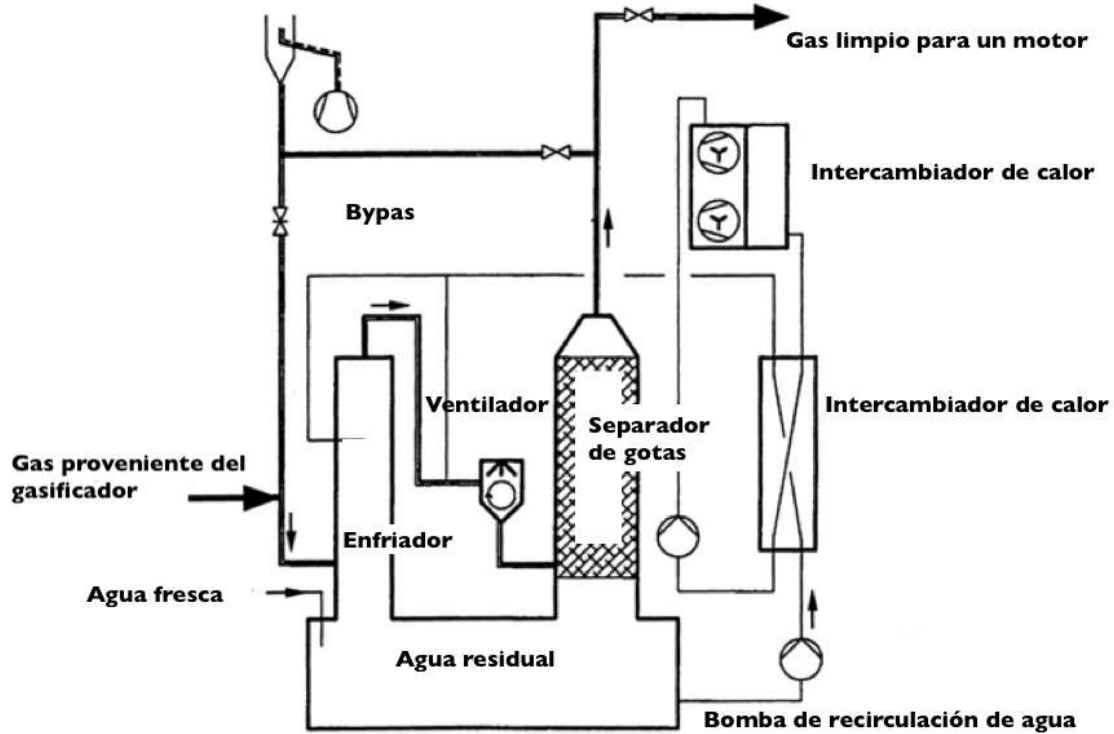


Figura 16. Torre de lavado.

Fuente: Hasler, 1999.

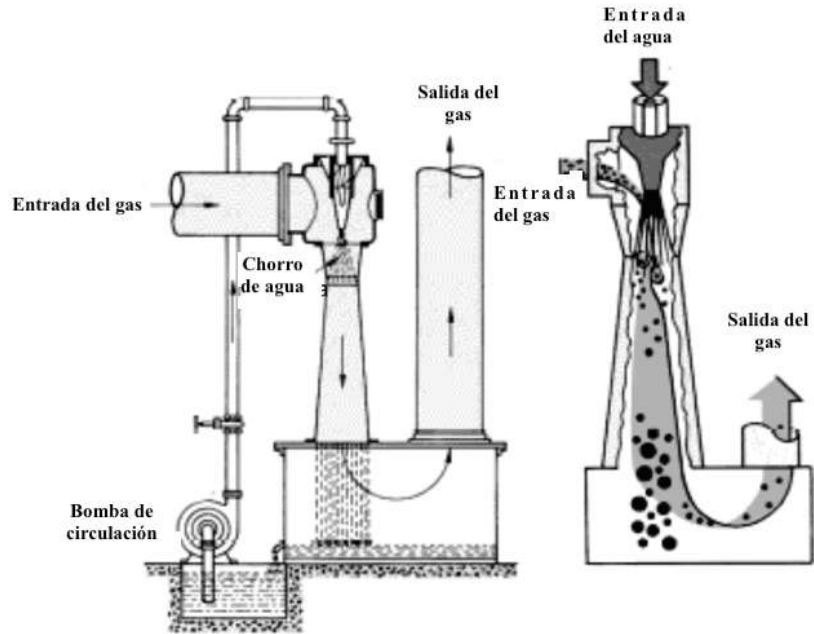


Figura 17. Esquema del funcionamiento de un eyector venturi scrubber.

Fuente: Sánchez, 2007.

Tabla 19.

Concentración de tars antes y después del filtro.

Contaminante	Antes del filtro $mg/m^3$	Después del filtro $mg/m^3$
Benceno	4555.0	95.6
Tolueno	2050.7	159.9
Etilbencina	47.5	0.1
Fenil	1.5	0.0
Estireno	171.1	0.1
Ciclopenta	72.4	0.8
Fenol	181.9	0.0

Fuente: Kadam, 2009.

Tabla 20.

*Características del carbón con el agregado de hierro.*

Muestra	Área superficial $m^2 g^{-1}$	Volumen del poro $cm^3 g^{-1}$	Promedio del diámetro del poro $mm$
Muestra 1	1206.3	277.2	2.0
Muestra 2	1126.0	258.7	2.0
Muestra 3	1128.5	259.3	2.0

Fuente: Toshiaki Hanaoka, 2012.

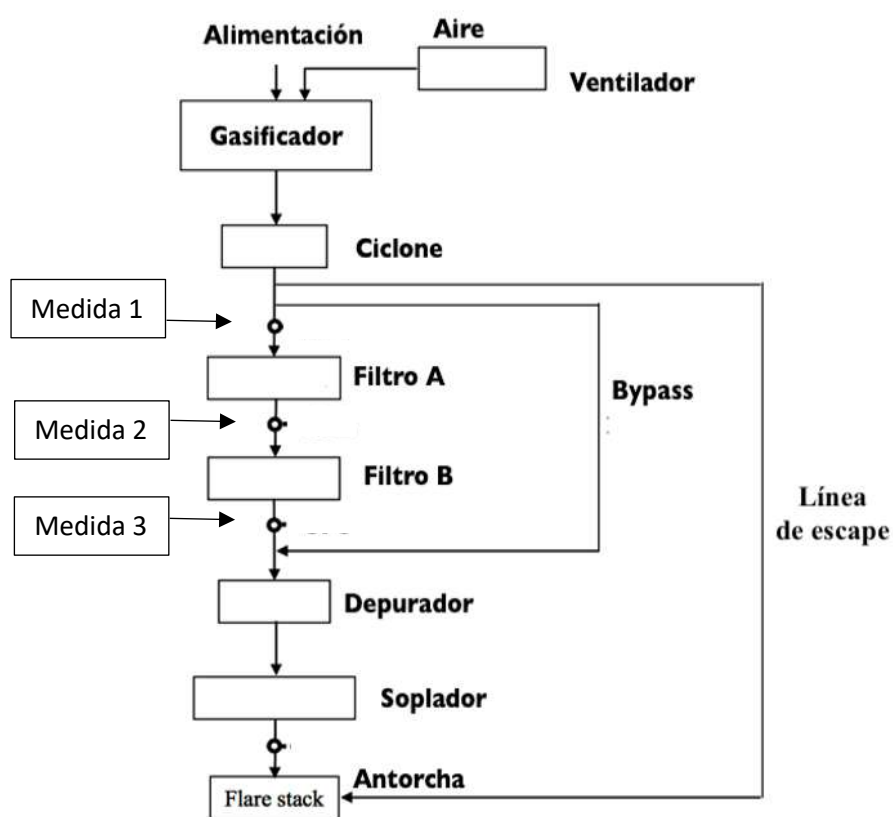


Figura 18. Esquema de limpieza de gases de gasificación de biomasa.

Fuente: Toshiaki Hanaoka, 2012.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 21. El contenido de tar en el syngas al pasar a través de los filtros A y B se reduce en 1/24 y 1/12, respectivamente.

Tabla 21.

*Resultados obtenidos del uso de los filtros A y B.*

<b>Medida</b>	<b>Tar <math>mg Nm^{-3}</math></b>	<b>Partículas <math>mg Nm^{-3}</math></b>
Medida 1	2428	2244
Medida 2	305	662
Medida 3	102	181

*Fuente:* Toshiaki Hanaoka, 2012.

### **3.2. Modelos de sistemas de limpieza**

A continuación, se presentarán modelos de limpieza de gas de síntesis obtenido por la gasificación de la biomasa. Estos modelos son resumidos de la tesis de Sánchez (2007).

#### **a. Configuración propuesta por el departamento de ingeniería forestal de la U. de Chile**

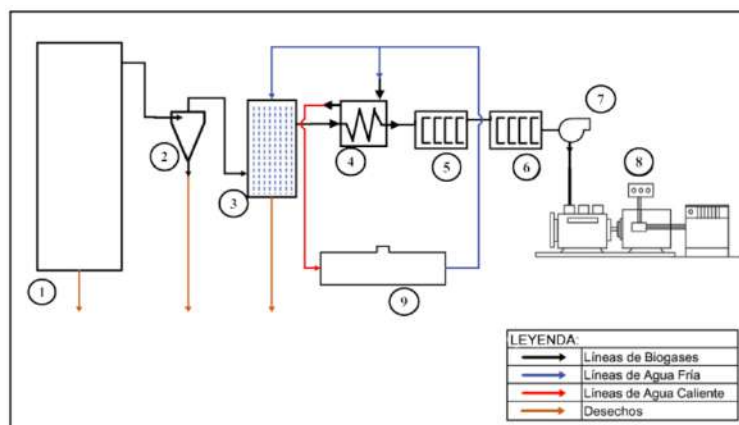
La Universidad de Chile diseño un gasificador de biomasa de tiro invertido, para una potencia de 75 kW eléctricos. El sistema de limpieza propuesto es muy utilizado a partir de la segunda guerra mundial, este presenta falencias respecto al manejo de desechos y aguas residuales obtenidos por el ciclón y la torre de lavado. Uno de los problemas presentes es el constante mantenimiento del intercambiador de calor debido a la deposición de alquitranes al condensar. La figura 19 muestra la configuración de limpieza propuesta por la U. de Chile.

#### **b. Configuración presentada por Ulrik Henriksen (2003)**

El gasificador usado es de lecho fluidizante de dos etapas con una potencia de 75 kW térmicos, donde la pirólisis y la gasificación del char ocurren en 2 reactores. Teniendo la ventaja de tener baja presencia de tars frente a otros gasificadores haciendo más simple los sistemas de limpieza. Además, los resultados obtenidos son satisfactorios puesto que no se observaron deposiciones en el motor luego de ser puesto en marcha con el gas producido. Esto da una idea de la eficiente operación de la Bag house (filtro de papel o tela).

La “Bag House filter” es un sistema de filtración desarrollado por la Universidad Técnica de Dinamarca. El sistema de limpieza está formado por un intercambiador de calor, el cual baja la temperatura por encima del punto de rocío (alrededor de 90°C). Luego se limpia en un filtro

de tela (Bag house filter), para ser enfriado a una temperatura de 50 °C y remover lo condensado. Posteriormente pasa por un filtro de “Catridge” para asegurar que todas las partículas condensadas han sido removidas. El gas es impulsado por una bomba hacia el motor.



ID	Equipo
1	Gasificador de tiro invertido
2	Ciclón
3	Torre de lavado
4	Intercambiador de calor gas – agua
5	Filtro grues
6	Filtro fino
6	Filtro fino
7	Turbo ventilador
8	Sistema de control, motor diesel modificado y generador
9	Estanque de agua

Figura 19. Configuración de limpieza propuesta por la U. de Chile.

Fuente: Sanchez, 2007.



Figura 20. Planta de gasificación.

Fuente: Ulrik Henriksen, 2003

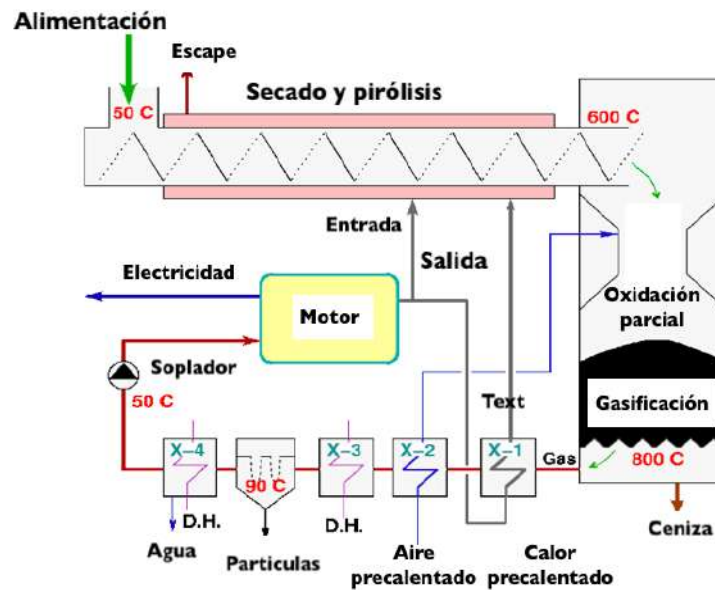


Figura 21. Esquema de la planta de gasificación.

Fuente: Ulrik Henriksen, 2003.

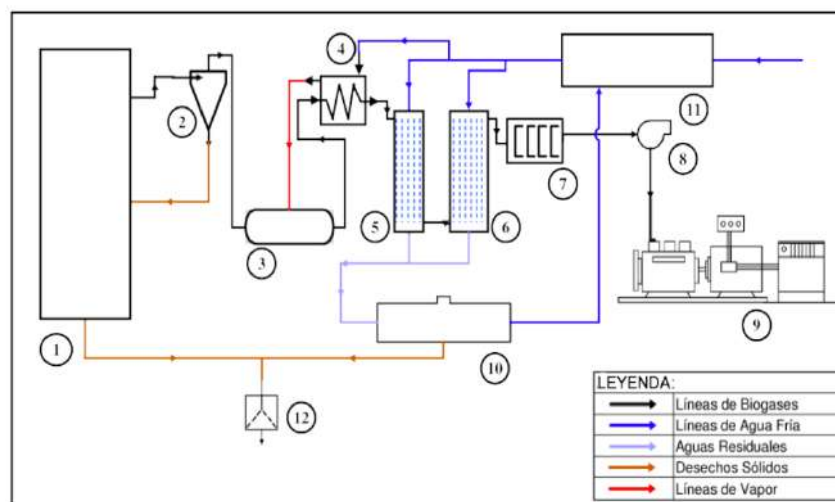
### c. Configuración presentada por Ibsen (2006)

La configuración trabajada por Ibsen, K. (2006) es probada y optimizada, pero se desarrolla para una potencia de 18.5 MW muy superior a los 75 kW del gasificador de lecho fluidizado burbujante de la UDEP. Su sistema de limpieza se centra en la limpieza de partículas de polvo, tars y componentes ácidos. La figura 22 muestra la configuración del National Renewable Energy laboratory.

### d. Configuración presentada por S. Dasappa (2003)

La potencia del gasificador de la figura 23 es de 2 MW térmicos con una capacidad de 500 kg/h. El sistema consiste en un reactor, el ciclón, un enfriador y un sistema de enfriamiento y limpieza para purificar el syngas. (S. Dasappa., 2003). El sistema de limpieza cuenta con un ciclón para remover las cenizas, scrubbers que usa agua como medio para el enfriamiento y la limpieza del gas (el agua circula por un circuito cerrado para su tratamiento donde pasa por una torre de enfriamiento y luego, por un filtro de lecho para remover las partículas) (S. Dasappa., 2003).

También se desarrolla un gasificador con una capacidad de 300 kg/h y una potencia de 1.2 MW térmicos (figura 24). El sistema de limpieza cuenta con un ciclón, una torre de enfriamiento, dos Water Scrubbers y un Scrubber que usa diésel como medio para reducir la concentración de contaminantes en el gas.



ID	Equipo
1	Gasificador de lecho fluidizado circulante
2	Ciclón
3	Reformador de alquitranes
4	Intercambiador de calor agua-gas
5	Torre de lavado co-corriente
6	Torre de lavado contra-corriente
7	Filtro
8	Turbo ventilador
9	Sistema de control, motor diesel modificado y generador
10	Planta de tratamiento de aguas residuales
11	Estanque de agua
12	Acopio de desechos sólidos

Figura 22. Esquema desarrollado por National Renewable Energy Laboratory.

Fuente: Sanchez, 2007.

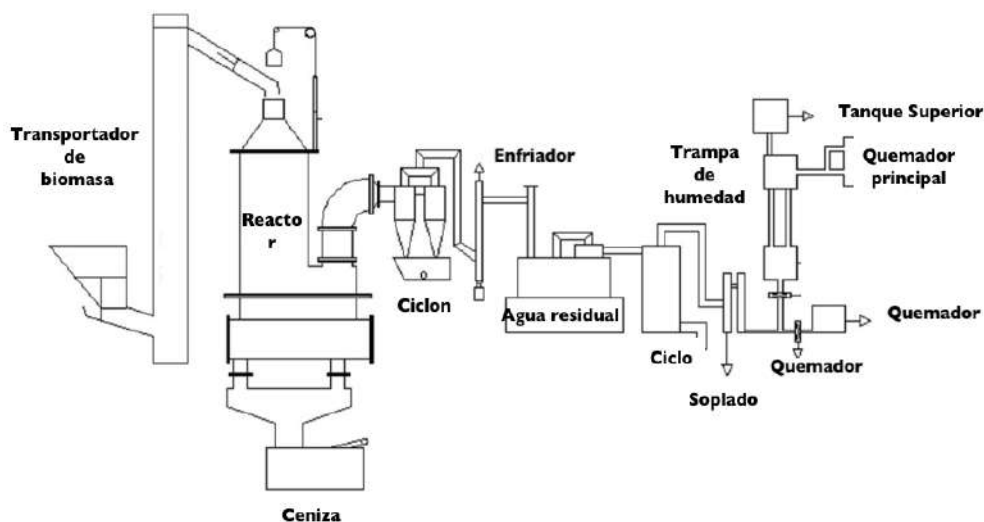


Figura 23. Esquema del sistema de gasificación.

Fuente: S. Dasappa., 2003.

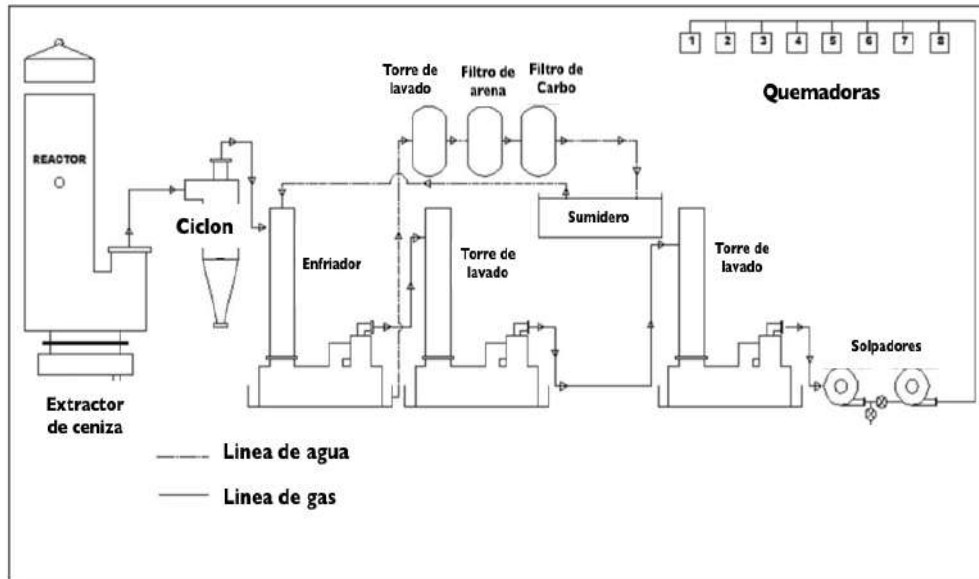


Figura 24. Esquema de gasificación de 1.2 MW térmicos.

Fuente: S. Dasappa., 2003.

#### e. Configuración presentada por XiuLi Yin (2002)

El sistema de la figura 25 está formado por un gasificador de lecho fluidizado circulante diseñado para cáscara de arroz con una capacidad de 1500 kg/h y una generación de potencia térmica de 1 MW. El sistema de tratamiento del gas está compuesto por un separador inercial, un ciclón, un Venturi y dos Water Scrubbers, y un sistema de tratamiento de aguas residuales.

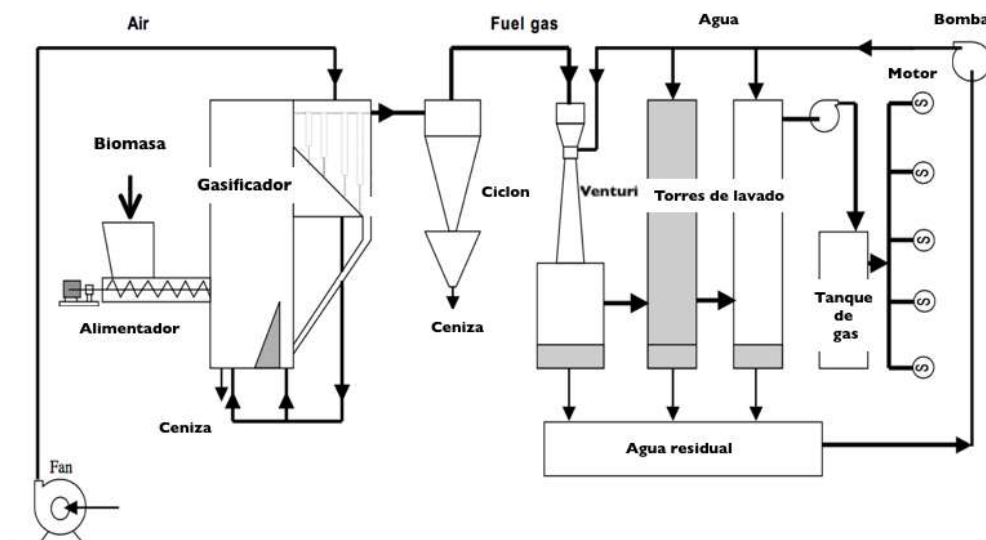


Figura 25. Esquema de planta de gasificación.

Fuente: XiuLi Yin, 2002.

## Capítulo 4

### Componentes del syngas

En este capítulo se analiza los resultados obtenidos en las pruebas del gasificador de la Universidad de Piura, y a partir de la composición del syngas dada por la literatura se determina la composición del gas producido por el gasificador estudiado en este proyecto.

#### 4.1. Pruebas realizadas en el gasificador de la UDEP

Se realizaron 3 pruebas en el gasificador de lecho fluidizado burbujeante de la UDEP. Con dos tipos de biomasa: hoja de caña de azúcar y cáscaras de café. Durante las pruebas se midió la temperatura y la composición del syngas. La figura 26 muestra la posición de los sensores de temperatura.

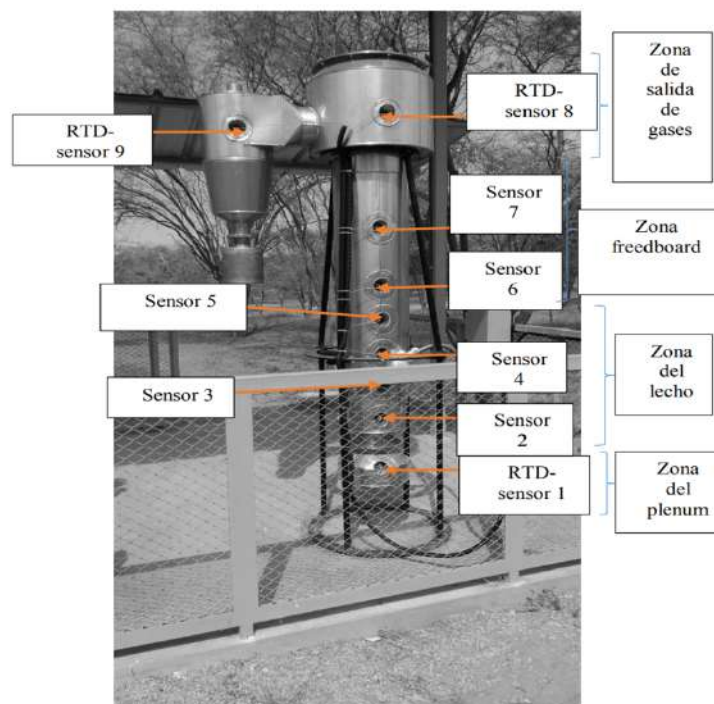


Figura 26. Ubicación de los sensores de temperatura.

Fuente: García, 2017.

### a. Prueba del 15 de agosto del 2017, hojas de caña

La figura 27 muestra el perfil de temperatura, producto de la gasificación de la hoja de caña de azúcar. La temperatura esta en grados celsius y el tiempo en minutos.

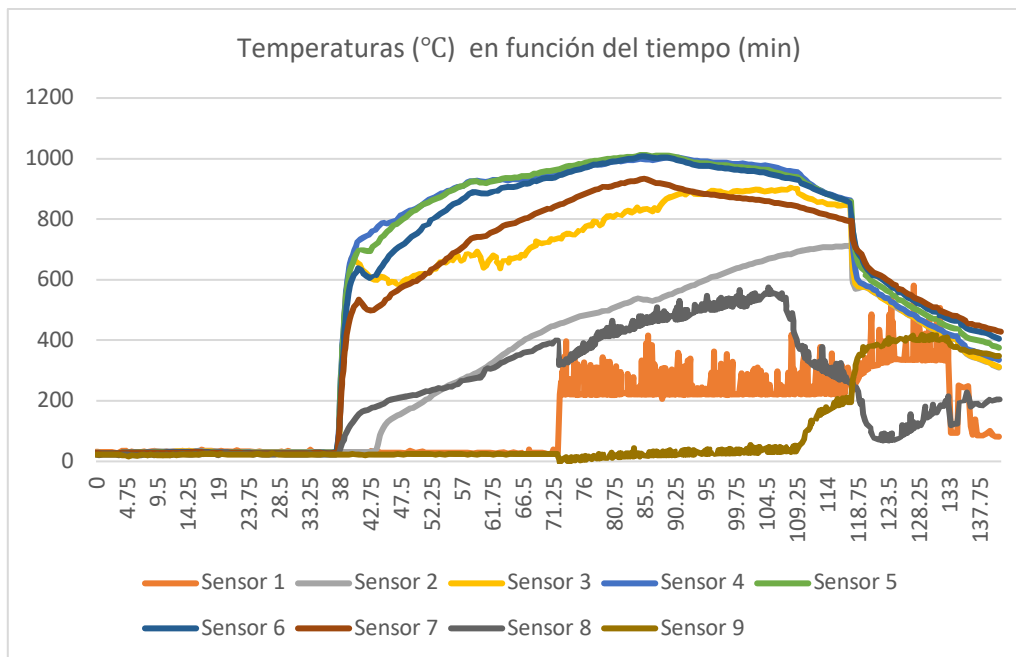


Figura 27. Perfil de temperatura.

Fuente: Propia.

El encendido del quemador inicia a los 36 minutos, razón por la cual no se observa un aumento de temperatura al inicio. Al alcanzar una temperatura de 300 °C en el sensor 2 y de 600 °C en el sensor 3, se apaga el quemador y se enciende el soplador, esto se da al minuto 60. Las mediciones hechas por el analizador de gases MADUR GA40 T-Plus inician después de encender el soplador, la composición se aprecia en la grafica 28. La biomasa entra al gasificador 11 minutos después de encendido el soplador por un periodo de 18 minutos.

Durante el ingreso de la biomasa, las temperaturas medidas por los sensores 3, 4, 5, 6 y 7 son elevadas, entre 800 y 1000 °C, el sensor 8 en promedio alcanza los 400 °C y el sensor 9 los 30 °C en promedio. La temperatura que se esperaría obtener en el sensor 9 debería estar alrededor de los 400 °C.

Las lecturas de metano (figura 29) arroja un pico de 25 000 ppm, la máxima cantidad medida por el analizador de gases en el momento en el que se enciende el soplador. Luego, se

logra 13000 ppm al inicio del ingreso de la biomasa para luego medir un valor de 0 ppm. Los valores obtenidos indican error en la medición.

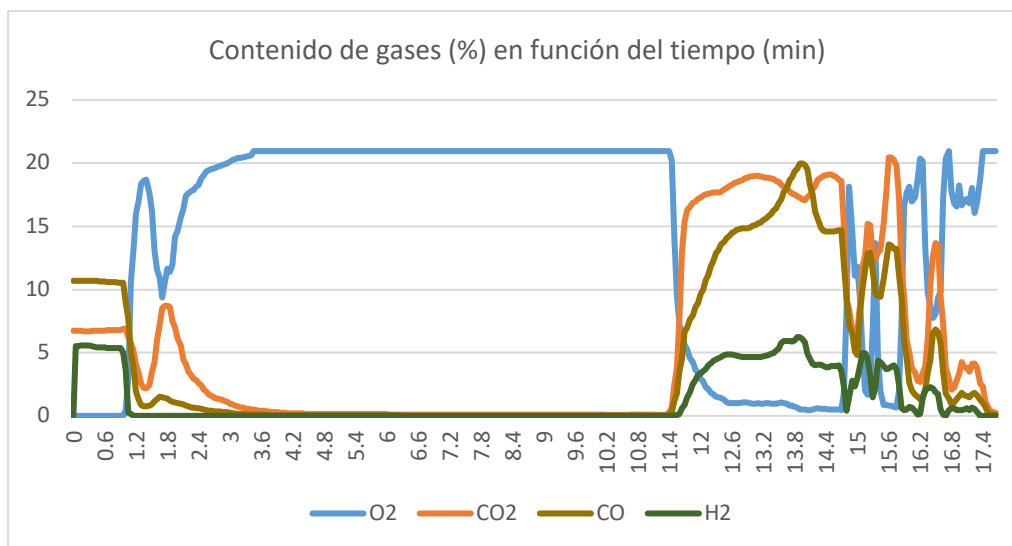


Figura 28. Grafica de gases en función del tiempo tiempo.

Fuente: Propia.

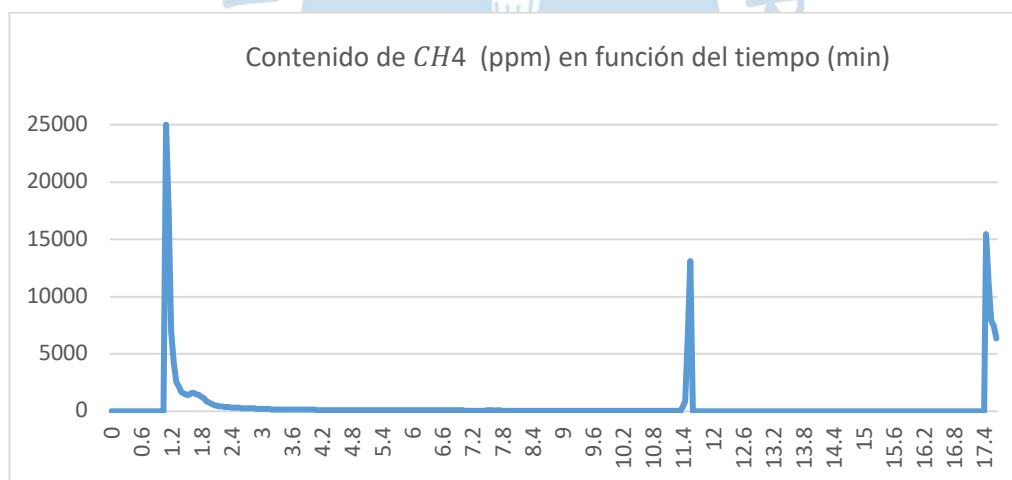


Figura 29. Producción de metano.

Fuente: Propia.

Los componentes medidos en la grafica 28 empiezan a variar a partir del ingreso de la (minuto 11) biomasa. El analizador de gases no arroja valores convincentes de la cantidad de metano alcanzada durante las pruebas (figura 29). Es recomendable continuar haciendo pruebas para descartar problemas con los sensores y el equipo de medición de gases.

### b. Prueba del 4 de octubre del 2017, hojas de caña

La prueba con las hojas de caña tiene una duración aproximada de 45 minutos. La temperatura del sensor 2 es superior a la alcanzada por otros sensores en contraste con la temperatura alcanzada en la prueba del 15 de agosto. Las temperaturas no llegan a ser idóneas para un lecho fluidizado burbujeante como se vio en la tabla 3 del capítulo 1.

El sensor 8 (figura 31) muestra temperaturas con picos de 850 °C. Se esperaría que los sensores cercanos 9 o 7 tengan unas temperaturas similares a la del sensor 8, pero estas están por debajo de 350 °C.

Se observa en la figura 32 que no hay valor en la composición del metano entre el minuto 18 y 22 esto se debe a que el límite de medición del analizador de gases es 25000 ppm indicando que los niveles de metano están por encima de mencionado valor.

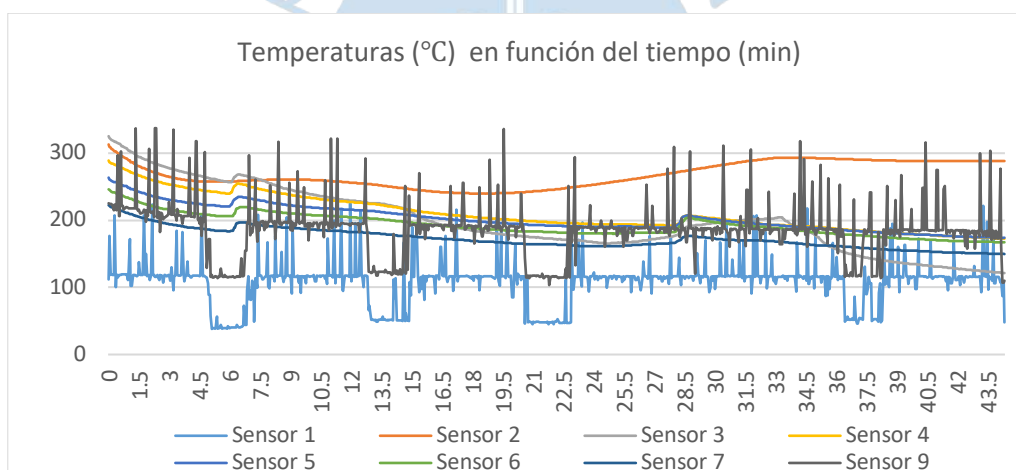


Figura 30. Temperaturas del reactor.

Fuente: Propia.

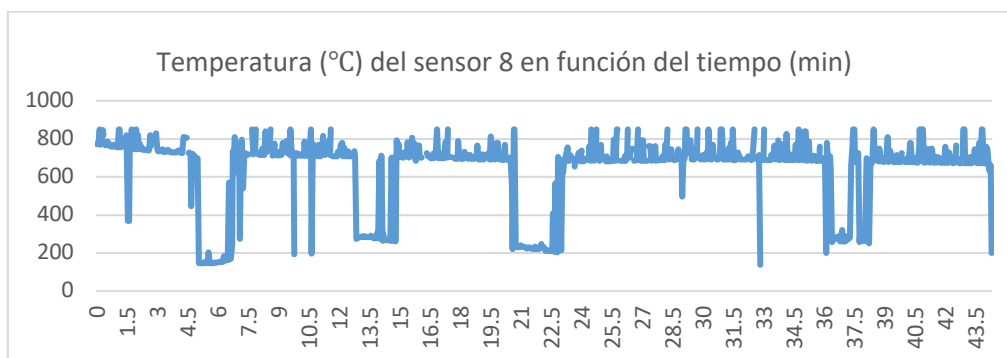


Figura 31. Temperatura del sensor 8.

Fuente: Propia.

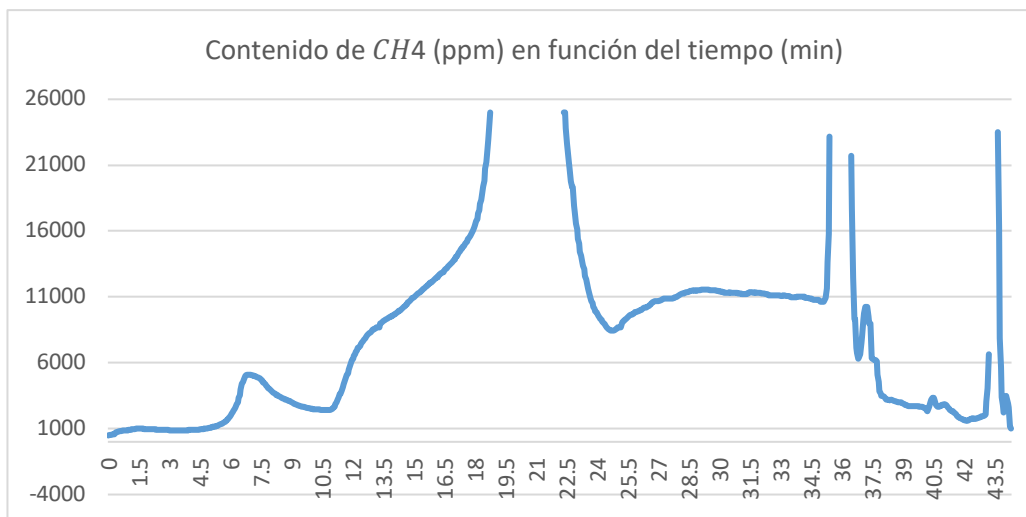


Figura 32. Producción de metano.

Fuente: Propia.

### c. Prueba del 5 de octubre del 2017, cáscaras de café

La prueba 3 se realiza por un tiempo aproximado de 45 minutos, donde la biomasa es cáscara de café. Los sensores 3, 4, 5, 6 y 7 marcan una temperatura mayor a la del sensor 2, parecida a lo marcado en la primera prueba con las hojas de caña de azúcar (Ver figura 33).

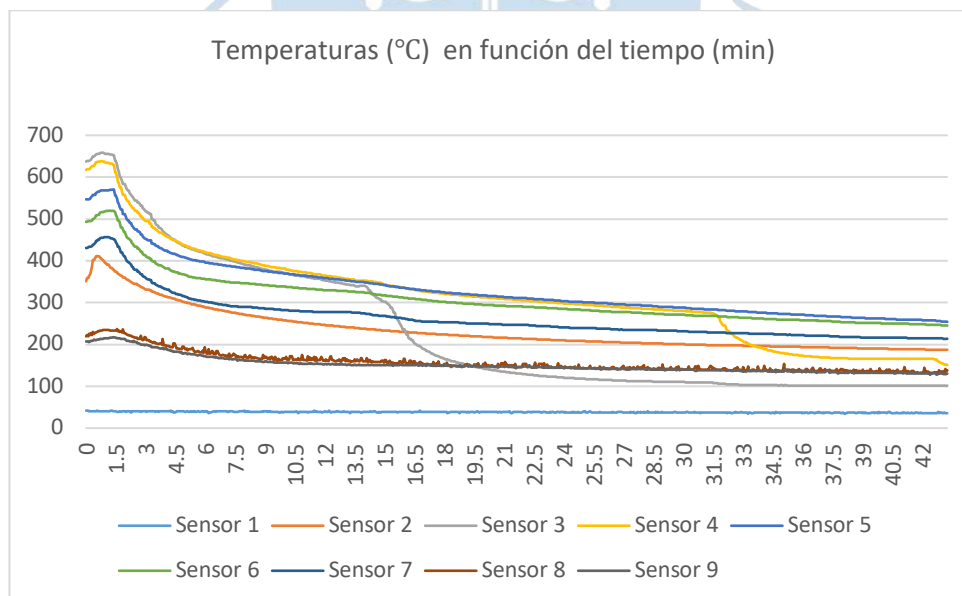


Figura 33. Temperaturas del reactor.

Fuente: Propia.

La figura 34 muestra una gráfica de metano ascendente desde el tiempo cero, en el minuto 20 alcanza un pico de 32500 ppm de metano, esto indica error del analizador pues tiene una

capacidad máxima de medición de 25000 ppm. Luego sigue subiendo hasta el minuto 28 donde vuelve a tener picos de medición por encima de la capacidad máxima del equipo.



Figura 34. Producción de metano.

Fuente: Propia.

Los resultados obtenidos en los 3 experimentos no pueden tomarse como referenciales debido al corto tiempo de realización de los experimentos. De igual manera, la diferencia de la temperatura medida por el sensor 2 respecto a los sensores que se encuentran en parte superior no concuerda, pues este debe marcar la temperatura de la llama del quemador entre 800 °C y 900 °C según pruebas realizadas en la Tesis de Ricardo García en el 2017.

La tabla 22 hace una comparación de lo obtenido en las pruebas respecto a lo encontrado en la literatura.

La composición de syngas producido por el gasificador de lecho fluidizado burbujeante instalado por el departamento de energía debería estar dentro de los porcentajes que se muestran en la tabla 22.

Las pruebas realizadas no permiten conocer el desempeño del gasificador, así como la eficiencia de la biomasa trabajada (cáscara de café, hojas de caña de azúcar) debido a las limitaciones generadas por la instrumentación (sensores de temperatura y analizador de gases).

Tabla 22.

*Cuadro de componentes del syngas y temperaturas promedio.*

Condiciones	Prueba 1	Literatura
Temperatura entrada (°C) sensor 2 y 4	400 - 900	650-900
Temperatura salida (°C)	130	300-800
Presión ( <i>bar</i> )	-	1 - 35
O <sub>2</sub> (%)	17	<0.2
CO <sub>2</sub> (%)	4 - 7	12-40
CO (%)	1.5 - 2	13-27
H <sub>2</sub> (%)	0 - 5	5-26

*Fuente:* Elaboración propia.

#### 4.2. Rango de componentes del syngas esperados según la literatura

Las limitaciones presentadas por el analizador de gases y los problemas con los resultados del perfil de temperaturas no se puede validar la composición del syngas. Por lo que se opta por asumir la composición de este.

Los componentes del syngas se han tomado de la investigación realizada por el U.S Department of Energy National Energy Technologic Laboratory a distintas tecnologías de gasificación. Esto permite tener un rango de la composición del syngas de distintas tecnologías. Nuestro caso de estudio es el de un gasificador de lecho fluidizante burbujeante.

Los cuadros mostrados más adelante recogen la información de 7 gasificadores de lecho fluidizante burbujeante (BFB), 6 lecho fijo circulante (CFB) y 2 de lecho fijo (FB). Los procesos se han realizado con diferentes biomásas (U.S. Department of Energy, 2006).

##### 4.2.1. Condiciones de operación

Se recomienda trabajar con presiones por encima de la presión atmosférica y con temperaturas entre 725 °C y 1400°C en el reactor (U.S. Department of Energy, 2006).

En la investigación realizada por U.S. Department of Energy se usa como agente reactante oxígeno, vapor y aire. El 70% de los gasificadores analizados en su investigación usan aire

como agente oxidante, el cual genera un poder calorífico del syngas 4 a 6  $MJ/m^3$  adecuado para calderas y motores. Usando Oxígeno se obtienen valores de 10 a 15  $MJ/m^3$  adecuados para turbinas de combustión y la generación de gasolina o metanol. Las tecnologías de gasificadores BCL/FERCO y MTCI han obtenido los valores más altos de poder calorífico 16.7 y 18  $MJ/m^3$ . Ambos son gasificadores de lecho fluidizante burbujeante (BFB).

En la tabla 23 se aprecia las condiciones de operación de los gasificadores analizados por U.S. Department of Energy y en la tabla 24 el resumen de las condiciones por tecnología.

La tabla 25 muestra el resumen de las condiciones de operación solo de las tecnologías de lecho fluidizante burbujeante (BFB).

Tabla 23.

*Condiciones de operación de gasificadores individuales.*

	<b>EPI</b>	<b>Stein</b>	<b>Tampella</b>	<b>ISU</b>	<b>GTI</b>	<b>SEI</b>	<b>Purox</b>	<b>Sofresid</b>
Tipo	BFB	BFB	BFB	BFB	BFB	BFB	zB	FB
Biomasa	Madera	Madera	Madera	Maíz	Madera	Madera	Basura	Basura
Rendimiento (ton/día)	100	60	45	4.5	12	181	181	195
Presión (bar)	1	15	20 - 23	1	35	1	1	1
Temperatura (°C)	650	700 - 750	850 - 950	730	816	650 - 815	-	1300 - 1400
Reactante 1	Aire	O <sub>2</sub>	Aire	Aire	O <sub>2</sub>	Aire	O <sub>2</sub>	Aire
Entrada (kg/kg b.)	2.0	0.6	0.4	-	0.27	1.45	-	-
Reactante 2	-	Vapor	Vapor	-	Vapor	-	-	-
Entrada (kg/kg)	-	0.4	0.5	-	0.64	-	-	-
Salida del syngas (m <sup>3</sup> /h)	8793	2900	-	-	335	4845	-	-
Temperatura de salida (°C)	621	-	300 - 350	-	816	800	-	-
Poder calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )	5.6	5.52	4-6	4.5	13	5.7	-	7.92
	<b>TPS</b>	<b>Aerimp - ianti</b>	<b>Foster Wheeler</b>	<b>Lurgi</b>	<b>Sydkraft</b>	<b>BCL/ FERC</b>	<b>MTCI</b>	-
Tipo	CFB	CFB	CFB	CFB	CFB	CFB	BFB	-

Fuente: U.S. Department of Energy, 2006

Tabla 23 (continuación).

*Condiciones de operación de gasificadores individuales.*

Biomasa	Madera	RDF	Madera	Aserrín	Madera	Madera	Pulp	-
Rendimiento (ton/día)	9	45 - 100	14.5	84 - 108	-	24	7	-
Presión (bar)	1	1	1	1	18	1	1	-
Temperatura (°C)	700 - 950	850 - 900	900	800	950 - 1000	600 - 1000	790-815	-
Reactante 1	Aire	Aire	Aire	Aire	Aire	Aire	-	-
Entrada (kg/kg b.)	-	1.7	1.7	1.25	-	0.08	-	-
Reactante 2	-	-	-	-	-	Vapor	Vapor	-
Entrada (kg/kg b.)	-	-	-	-	-	0.31	2.2	-
Salida del syngas (m <sup>3</sup> /h)	-	3500 - 14000	1181	9700 - 12500	-	800	-	-
Temperatura de salida (°C)	-	800 - 900	700	600	-	820	-	-
Poder calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )	4 - 7	4.5 - 5.5	7.5	5.8	5	18	16.7	-

Fuente: U.S. Department of Energy, 2006

Tabla 24.

*Resumen de condiciones de operación de gasificadores.*

	<b>BFB Rango</b>	<b>CFB Rango</b>	<b>Fixed Bed Range</b>	<b>BCL/ FERCO</b>	<b>MTCI</b>	<b>Shell</b>
Tipo	Varios	Varios	Varios	Madera	Pulp	Carbón
Rendimiento (ton/día)	4.5 - 181	9 - 108	181 - 195	24	7	2155
Presión (bar)	1 - 35	1 - 19	1	1	1	30
Temperatura (°C)	650 - 950	800 - 1000	1300 - 1400	600 - 1000	790-815	1400
Reactante 1	O <sub>2</sub> o Aire	Aire	O <sub>2</sub> o Aire	Aire	-	O <sub>2</sub>
Entrada (kg/kg b.)	0.4 - 2.2	1.25 - 1.7	-	0.08	-	0.98
Reactante 2	Vapor	-	-	Vapor	Vapor	Vapor
Entrada (kg/kg b.)	0.5 - 0.64	-	-	0.31	2.2	0
Salida del syngas (m <sup>3</sup> /h)	335 - 8793	1181 - 12500	33,960	800	-	1.48 × 10 <sup>6</sup>
Temperatura de salida (°C)	300 - 800	600 - 900	-	820	-	240
Poder calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )	4-13	4-7.5	7.92	18	16.7	9.51

Fuente: U.S. Department of Energy, 2006.

Tabla 25.

*Condiciones de operación de un gasificador de lecho fluidizado.*

	<b>BFB Rango</b>
Biomasa	Varios
Rendimiento ( <i>ton/día</i> )	4.5 - 181
Presión ( <i>bar</i> )	1-35
Temperatura (°C)	650-950
Reactante 1	O <sub>2</sub> o Aire
Entrada (kg/kg b.)	0.4-2.2
Reactante 2	Vapor
Entrada (kg/kg b.)	0.5 - 0.64
Salida del syngas (m <sup>3</sup> /h)	335 - 8793
Temperatura de salida (°C)	300 - 800
Poder calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )	4 - 13

*Fuente:* U.S. Department of Energy, 2006.

#### 4.2.2. Composición del syngas

La tabla 26 muestra la composición del syngas para diferentes tecnologías bajo distintas condiciones (biomasa, condiciones de operación). El cuadro 27 resume los componentes del syngas respecto a la tecnología usada (el tipo de tecnología, de biomasa, la presión, la temperatura, el agente oxidante, etc. influyen en los componentes y sus concentraciones en la corriente del syngas).

Tabla 26.

*Composición del syngas por biomasa.*

	<b>EPI</b>	<b>Stein</b>	<b>Tampella</b>	<b>ISU</b>	<b>GTI</b>	<b>SEI</b>	<b>Purox</b>
Tipo	BFB	BFB	BFB	BFB	BFB	BFB	FB
Biomasa	Madera	Madera	Madera	Madera	Madera	Madera	Basura
$H_2$ (%)	5.8	19.9	11.3	4.1	14.8	12.7	23.4
$CO$ (%)	17.5	26.2	13.5	23.9	11.7	15.5	39.1
$CO_2$ (%)	15.8	40.3	12.9	12.8	22.39	15.9	24.4
$H_2O$ (%)	Seco	Seco	17.7	Seco	Seco	Seco	Seco
$CH_4$ (%)	4.65	-	4.8	3.1	10.8	5.72	5.47
$C_{2+}$ (%)	2.58	-	-	-	0.13	2.27	4.93
Tars (%)	-	0.11	-	-	0.27	-	$C_{2+}$
$H_2S$ (%)	-	-	-	-	0.01	-	0.05
$O_2$ (%)	-	-	-	0.2	-	-	-
$NH_3$ (%)	-	-	-	-	0.10	-	-
$N_2$ (%)	51.9	13.4	40.2	55.9	40.3	47.9	-
$H_2/CO$	0.3	0.8	0.8	0.2	1.6	0.8	0.6
Poder calorífico ( $MJ/m^3$ )	5.6	5.5	4-6	4.5	13.0	5.6	-

Fuente. U.S. Department of Energy, 2006.

Tabla 26 (Continuación).

*Composición del syngas por biomasa.*

	<b>TPS</b>	<b>Aerimp - ianti</b>	<b>Foster Wheeler</b>	<b>Lurgi</b>	<b>Sydkraft</b>	<b>BCL/ FERC</b>	<b>MTCI</b>
Tipo	CFB	CFB	CFB	CFB	CFB	CFB	BFB
Biomasa	Madera	RDF	Madera	Aserrín	Madera	Madera	Pulp
$H_2$ (%)	7 - 15	7 - 9	15 - 17	20.2	11	14.9	43.3
$CO$ (%)	9 - 13	9 - 13	21 - 22	19.6	16	46.5	9.22
$CO_2$ (%)	12 - 14	12 - 14	10 - 11	13.5	10.5	14.6	28.1
$H_2O$ (%)	10 - 14	10 - 14	Seco	Seco	12	Seco	5.57
$CH_4$ (%)	6 - 9	6 - 9	5 - 6	-	-	17.8	4.73
$C_{2+}$ (%)	-	-	-	3.8	6.5	6.2	9.03
Tars (%)	-	0.5 - 1	-	1	-	-	-
$H_2S$ (%)	-	-	-	-	-	-	0.08
$O_2$ (%)	-	-	-	-	-	-	0
$NH_3$ (%)	-	-	-	-	-	-	-
$N_2$ (%)	47 - 52	47 - 52	46 - 47	42.9	44	0	0
$H_2/CO$	0.7	0.7	0.7	1.0	0.7	0.3	4.6
Poder calorífico ( $MJ/m^3$ )	4-7	4.5-5.5	7.5	5.8	5.0	18.0	16.7

Fuente. U.S. Department of Energy, 2006.

Tabla 27.

Resumen de la composición del syngas.

	<b>BFB Range</b>	<b>CFB Range</b>	<b>BCL/ FERCO</b>	<b>MTCI</b>	<b>Fixed Bed Purox</b>	<b>Shell</b>
Biomasa	Varios	Varios	Madera	Pulp	Basura	Carbón
$H_2$	5 - 26	7 - 20	14.9	43.3	23.4	24
$CO$	13 - 27	9 - 22	46.5	9.22	39.1	67
$CO_2$	12 - 40	11 - 16	14.6	28.1	24.4	4
$H_2O$	<18	10 - 14	seco	5.57	seco	3
$CH_4$	3 - 11	<9	17.8	4.73	5.47	0.02
$C_{2+}$	<3	<4	6.2	9.03	4.93	0
Tars	<0.11	<1	-	-	-	0
$H_2S$	~0	~0	-	0.08	0.05	1
$O_2$	<0.2	0	0	0	-	0
$NH_3$	0	0	0	0	-	0.04
$N_2$	13 - 56	46 - 52	0	0	-	1
$H_2/CO$	0.2 - 1.6	0.6 - 1.0	0.3	4.6	0.6	0.36
Poder calorífico ( $MJ/m^3$ )	4 - 13	4 - 7.5	18.0	16.7	-	9.51

Fuente. U.S. Department of Energy, 2006.

La tabla 28 muestra solo los rangos de composición del syngas de la tecnología de lecho fluidizante burbujeante (BFB).

Tabla 28.

*Composición del syngas de un gasificador lecho fluidizante burbujeante.*

<b>Componente</b>	<b>BFB Range</b>
Biomasa	Varios
H <sub>2</sub>	5 - 26
CO	13 - 27
CO <sub>2</sub>	12 - 40
H <sub>2</sub> O	<18
CH <sub>4</sub>	3 - 11
C <sub>2+</sub>	< 3
Tars	< 0.11
H <sub>2</sub> S	~0
O <sub>2</sub>	< 0.2
NH <sub>3</sub>	0
N <sub>2</sub>	13 - 56
H <sub>2</sub> /CO	0.2 - 1.6
Poder calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )	4 - 13

*Fuente.* U.S. Department of Energy, 2006.

La composición que se usará para el estudio debe estar comprendida en los parámetros mostrados en la tabla 28.

El cuadro 29 muestra la media de la composición de los diferentes gasificadores (BFB) mostrados en el cuadro 26 para obtener una composición aproximada del gas de síntesis.

Tabla 29.

*Composición del syngas*

<b>Composición</b>	<b>Porcentaje</b>
H <sub>2</sub>	11.4333
CO	18.05
CO <sub>2</sub>	20.015
H <sub>2</sub> O	17.7
CH <sub>4</sub>	5.814
C <sub>2+</sub>	1.66
Tars	0.19
H <sub>2</sub> S	0.01
O <sub>2</sub>	0.2
NH <sub>3</sub>	0.1
N <sub>2</sub>	41.6
H <sub>2</sub> /CO	0.75
Poder calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )	6.4666

Fuente. U.S. Department of Energy, 2006. Modificado.

El contenido de particulado y alquitranes son tomados del cuadro 30, donde se pueden apreciar que la cantidad de componentes asumida (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, etc.) se encuentra dentro del rango esperado.

Tabla 30.

*Contenido de particulado y alquitrán.*

		<b>Lecho móvil de corriente paralela</b>	<b>Lecho móvil de contracorriente</b>	<b>Lecho fluidizado</b>
Humedad	% Masa fresca	6 - 25	No determinado	13 - 20
Particulado	mg/Nm <sup>3</sup>	100 - 8.000	100 - 3.000	8.000 - 100.000
Alquitranes	mg/Nm <sup>3</sup>	10 - 6.000	10.000 -150.000	2.000 - 30.000
LHV	MJ/Nm <sup>3</sup>	4.0 - 5.6	3,7 - 5.1	3,6 - 5,9
H <sub>2</sub>	Vol %	15 -21	10 - 14	15 - 22
CO	Vol %	10 - 22	15 - 20	13- 15
CO <sub>2</sub>	Vol %	11- 13	8 -10	13 - 15
CH <sub>4</sub>	Vol %	1 - 5	2 - 3	2 - 4
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	Vol %	0,5 - 2	no determinado	0,1 - 1,2
N <sub>2</sub>	Vol %	Resto	Resto	resto

Fuente. Sanchez, 2007.

El contenido que, debería tener el gasificador de lecho fluidizado burbujeante se muestra en la tabla 31, adicionalmente, se muestra la información del contenido de particulado y alquitranes tomado de la tabla 30.

Tabla 31.

*Composición final del syngas con particulado y alquitranes.*

<b>Composición</b>	<b>Porcentaje</b>
H <sub>2</sub>	11.433
CO	18.05
CO <sub>2</sub>	20.015
H <sub>2</sub> O	17.7
CH <sub>4</sub>	5.814
C <sub>2+</sub>	1.66
Tars	0.19
H <sub>2</sub> S	0.01
O <sub>2</sub>	0.2
NH <sub>3</sub>	0.1
N <sub>2</sub>	41.6
H <sub>2</sub> /CO	0.75
Poder calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )	6.466666
Particulado (mg/Nm <sup>3</sup> )	100,000
Alquitranes (mg/Nm <sup>3</sup> )	30,000

*Fuente* U.S. Department of Energy, 2006. Modificado.

## Capítulo 5

### Evaluación de sistema de limpieza

En el siguiente capítulo se hace un resumen de las tecnologías de limpieza mostradas en el capítulo 3. Se muestran los niveles de contaminantes aceptados para su uso en MCI, se presenta la metodología para el cálculo de la limpieza del syngas, orientado al uso en motores de combustión interna.

#### 5.1. Resumen de tecnologías de limpieza

Las tablas 32 y 33 resumen los métodos de limpiezas presentados en el capítulo 3.

Tabla 32.

*Detalles de los métodos de limpieza.*

<b>Método de limpieza</b>	<b>Comentario</b>
Filtros cerámicos, de velas cilíndricas	Trabaja a presiones 8 - 10 bar, para evitar la condensación del tar.
Filtros de mangas	Pueden retener un alto contenido de particulado pequeño. No son resistentes a impacto metálico, por lo que trabajan a bajas velocidades menores a 5 cm/s, además de su baja resistencia a altas temperaturas.
Filtros metálicos	La presencia de contaminantes como metales alcalinos y azufre puede provocar problemas de corrosión en el filtro.
Filtros de velas metálicas	Altas temperaturas dependen del material.
Filtros de lecho granulado	Materiales como arena y cuarzo. Se complica con su limpieza. Puesto que los alquitranes son altamente tóxicos. Problemas de desgaste del medio ante la utilización durante largos periodos de tiempo, alta temperatura y altas velocidades.
Wet scrubbers	La torre de lavado permite eliminar compuestos como dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, ácido clorhídrico, etc. Implica la disminución de la temperatura.

*Fuente.* Elaboración propia.

Tabla 32 (continuación).

*Detalles de los métodos de limpieza.*

Dry scrubbing lavado seco	Inyección en la corriente del syngas de un absorbente sólido (CaCO <sub>3</sub> , CaO, CaOH), el cual reacciona con los componentes ácidos formando solidos que pueden ser eliminados aguas arriba.
Torre de lavado	Permite eliminar compuestos como: dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, ácido clorhídrico, óxido de nitrógeno, cloro, dióxido de carbono, amoniaco, dióxido de cloro, ácido fluorhídrico, aminas, mercaptanos, óxido de etileno, alcoholes, fenol, ácido sulfúrico, ácido acético.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 33.

*Porcentaje de reducción de partículas y tars en varias tecnologías.*

Método de limpieza	T °C	Reducción de partículas (%)	Reducción de Tars (%)	Reducción de NH <sub>3</sub> (%)	Reducción de HCL (%)	Reducción de H <sub>2</sub> S (%)
Craqueado catalítico	900	-	> 95	-	-	-
Fabric Filter	200	60 – 85	0 – 50	-	-	-
Filtro de lecho de arena	10 – 20	70 – 95	60 – 95	> 95	90	80 – 95
Filtro de fibras cerámicas	200 – 800	> 0.3 $\mu$ m, 99 – 99.8	-	-	-	-
Filtros de cerámica rígida	200 – 800	> 0.1 $\mu$ m, 99 – 99.9	-	-	-	-
Filtros, Cerámicos, de velas cilíndricas	400 – 550	-	-	-	-	-
Filtros de Mangas	-	99 - 99.9 %	-	-	-	-
Filtros metálicos	200 – 800	Polvo > 1 $\mu$ m, 99 – 99.5%	-	-	-	-
Filtros de Velas Metálicas	Acero inoxidable < 350 Inconel (Aleación Níquel-cromo) >980	-	-	-	-	-
Filtros de lecho granulado	200 – 800	Depende altamente de la filtración del lecho 70 – 99 %	50 – 97 %	-	-	-
Torre rotacional de agua	50 – 60	70 – 90	10 – 25	-	-	-
Wet Scrubbers	20 – 100	0.1 – 1 $\mu$ m 85 – 95 %	-	-	-	-
Dry Scrubbing Lavado Seco	100 – 1300	-	-	-	-	-
Torre de lavado	< 100	60 – 88	10 - 25	-	-	-

Fuente. Hasler, 1997. Modificado.

Tabla 33 (continuación).

*Compendio de reducción de partículas y tars en varias tecnologías de gasificación.*

Método de limpieza	T °C	Reducción de partículas (%)	Reducción de Tars (%)	Reducción de NH <sub>3</sub> (%)	Reducción de HCL (%)	Reducción de H <sub>2</sub> S (%)
Venture Scrubber	-	-	50 – 90	-	-	-
Atomizador rotacional	< 100	95 – 99	-	-	90	> 95
Precipitador electrostático húmedo	40 – 50	> 99	0 – 60	-	-	-
Ciclón Rotacional	100 - 900	5 μm 80% 2.5 μm 70% 1.25 μm 60% 1 μm 50% 0.625 μm 20%	30 -70	-	-	-

Fuente. Hasler, 1997. Modificado.

## 5.2. Límite de contaminantes para un MCI

El contenido de impurezas en el gas de síntesis responde a los requerimientos de la aplicación. La aplicación de este estudio son los motores de combustión interna.

Según Ruiz E. (2014) para el uso del syngas en un MCI es necesario contar con bajos niveles de partículas, alquitranes y metales a la vez que de un alto nivel de poder calorífico e hidrocarburos.

Tabla 34.

*Requerimientos del syngas en función de su uso.*

	Combustible sintético	Metanol	Hidrógeno	Gas combustible		
	Gasolina, diésel FT			Caldera	Turbina	Motor
H <sub>2</sub> /CO	0.6	2	↑	Indiferente	Indiferente	Indiferente
CO <sub>2</sub>	↓	↓	↓	No crítico	No crítico	No crítico
Hidrocarburos	↓	↓	↓	↑	↑	↑
Contaminante	< 1ppm S, ↓ partículas	< 1ppm S, ↓ partículas	< 1ppm S, ↓ partículas		↓ partículas y metales	↓ partículas alquitranes y metales
Poder calorífico	Indiferente	indiferente	indiferente	↑	↑	↑
Presión, bar	20-30	50 (líquido) 140 (vapor)	20	↓	↑	↓
Temperatura, °C	200-400	100-200	100-200	250	500-600	↓

Fuente. Ruiz E., 2014.

Laurence (2011) recopila la información de Hasler P. (1999) donde los niveles de partículas son de un contenido inferior a  $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  y de tars menor a  $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  (a la vez no muestra información sobre otros contaminantes). La tabla 35 muestra la calidad del gas requerida para su utilización en distintas tecnologías.

Tabla 35.

*Calidad del gas requerida para generación de energía.*

Componente	Unidad	MCI	Turbina Gas	Síntesis de metanol
Partículas	$\text{mg}/\text{Nm}^3$	< 50	< 30	< 0.02
Tamaño de partícula	$\mu\text{m}$	< 10	< 5	-
Tar	$\text{mg}/\text{Nm}^3$	< 100	-	< 0.1
Alcalino	$\text{mg}/\text{Nm}^3$	-	0.24	
$\text{NH}_3$	$\text{mg}/\text{Nm}^3$	-	-	< 0.1
$\text{H}_2\text{S}$ & $\text{COS}$	$\text{mg}/\text{Nm}^3$	-	-	< 1
$\text{Cl}$	$\text{mg}/\text{Nm}^3$	-	-	< 0.1
$\text{CO}_2$	Vol%	Sin limites	Sin limites	< 12

Fuente. Laurence, 2011.

Laurence (2011) recopila información de Knoef (2000) donde muestra los mismos requerimientos partículas <  $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  y tars <  $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ , además agrega el poder calorífico del gas.

Tabla 36.

*Contenido aceptable y preferible de contaminantes para motores modernos.*

Parámetro	Aceptable	Preferible
Contenido de polvo	< 50	< 5
Tamaño de partícula	< 10	< 1
Contenido de tar	< 100	< 50
Poder calorífico del gas ( $\text{kJ}/\text{Nm}^3$ )	> 2500	> 4200

Fuente. Knoef, 2000.

Según Pérez (2011), en base a los datos de la FAO para la utilización de gas pobre en MCI, los requerimientos son mostrados en la tabla 37, donde se encuentran valores de otros contaminantes como compuestos ácidos y condensables (*Cl, F*).

Tabla 37.

*Valores medios de impurezas en el gas para aplicaciones en MCI.*

	Referencia	Valor Obtenido
Polvos	Menos de 50 mg/m <sup>3</sup> de gas. Preferentemente 5 mg/m <sup>3</sup> de gas.	7 mg/Nm <sup>3</sup>
Alquitranes	Menos de 50 mg/m <sup>3</sup> de gas.	10 mg/Nm <sup>3</sup>
Ácidos	Menos de 50 mg/m <sup>3</sup> de gas (medido como ácido acético).	-
Azufre	Menos de 2 mg/m <sup>3</sup>	-
Alógenos (Cl+F)	Menos de 100 mg/m <sup>3</sup>	-
Silicio	Menos de 20 mg/m <sup>3</sup>	-

Fuente. Pérez, 2011.

En base a la información recopilada por Laurence (2011) y Pérez (2011) se encuentran similitudes respecto al contenido de partículas y alquitranes aceptables en la corriente de syngas. La tabla 38 muestra los niveles de partículas y alquitranes a considerar para el diseño del sistema de limpieza.

Tabla 38.

*Niveles de contaminantes para MCI.*

	Aceptable	Preferible
Partículas	< 50 mg/Nm <sup>3</sup> < 10 $\mu$ m	< 5 mg/Nm <sup>3</sup> < 1 $\mu$ m
Alquitranes	< 100 mg/Nm <sup>3</sup>	< 50 mg/Nm <sup>3</sup>

Fuente. Elaboración propia.

### 5.3. Metodología para el cálculo del sistema de limpieza

Mediante la información del capítulo 3 y 4 se presenta la metodología para el diseño básico del sistema de limpieza de gases para un MCI.

- **Características del gas de síntesis**

Tabla 39.

*Características del gas de síntesis.*

Composición	Porcentaje
$H_2$	11.433
$CO$	18.05
$CO_2$	20.015
$H_2O$	17.7
$CH_4$	5.814
$C_{2+}$	1.66
Tars	0.19
$H_2S$	0.01
$O_2$	0.2
$NH_3$	0.1
$N_2$	41.6
$H_2/CO$	0.75
Poder calorífico ( $MJ/m^3$ )	6.46
Particulado ( $mg/Nm^3$ )	100,000
Alquitranes ( $mg/Nm^3$ )	30,000

Fuente. U.S. Department of Energy, 2006. Modificado.

- **Límite de entrada de contaminantes a la entrada del MCI**

Tabla 40.

*Límite de entrada de contaminantes a la entrada del MCI.*

	Aceptable	Preferible
Partículas	$< 50 mg/Nm^3$ $< 10 \mu m$	$< 5 mg/Nm^3$ $< 1 \mu m$
Alquitranes	$< 100 mg/Nm^3$	$< 50 mg/Nm^3$
Ácidos	$< 50 mg/Nm^3$	-
Azufre	$< 2 mg/Nm^3$	-
Alógenos	$< 100 mg/Nm^3$	-
Silicio	$< 20 mg/Nm^3$	-

Fuente. Elaboración propia.

El sistema de limpieza planteado solo trabajará con partículas, alquitranes y ácidos ( $H_2S$ ).

- **Contaminantes presentes en el gas de síntesis y métodos de limpieza**

Tabla 41.

*Contaminantes presentes en el gas de síntesis y métodos de limpieza.*

<b>Contaminantes</b>	<b>Método de Limpieza</b>
Partículas sólidas	Ciclón + Filtro
Alquitranes	Ciclón + Filtro
Componentes ácidos	Dry Scrubbing + filtro

*Fuente.* Elaboración propia.

- **Eficiencia de los dispositivos de limpieza**

- Ciclón rotacional

Tabla 42.

*Eficiencia de un ciclón rotacional.*

<b>Tamaño Partícula <math>\mu m</math></b>	<b>Eficiencia %</b>
5	80
2.5	70
1.25	60
1	50
0.625	20
Alquitrán	30

*Fuente.* Elaboración propia.

- Filtro de lecho de arena o granulado

Tabla 43.

*Eficiencia de los dispositivos de limpieza.*

Método de limpieza	T °C	Reducción de partículas (%)	Reducción de tars (%)	Reducción de NH <sub>3</sub> (%)	Reducción de HCL (%)	Reducción de H <sub>2</sub> S (%)
Filtro de lecho de arena	10 – 20	70 – 95	60 – 95	> 95	90	80 – 95
Filtro de lecho granulado	200 – 800	70 – 99	50 - 97			

*Fuente.* Elaboración propia.

- Filtro de fibras cerámicas

Tabla 44.

*Eficiencia del filtro de fibras cerámicas.*

Método de limpieza	T °C	Reducción de partículas (%)
Filtro de fibras cerámicas	200 – 800	> 0.3 μm, 99 – 99.8%

*Fuente.* Elaboración propia.

- Wet Scrubbers, Dry Scrubbers

Tabla 45.

*Eficiencia del Wet Scrubbers y del Dry Scrubbers.*

Método de limpieza	T °C	Reducción de partículas (%)
Wet Scrubbers	20 – 100	Polvo 0.1 – 1 μm, 85 – 95
Dry Scrubbing Lavado Seco	100 – 1300	-

*Fuente.* Elaboración propia.

### a. Proceso de limpieza

La siguiente ecuación permite calcular el nivel de contaminante después de cada etapa.

La información presente es referenciada de la tesis de García (2012).

Si el  $X_{\text{contaminante } i}$  es mayor al  $X_{\text{Limite contaminante } i}$  se debe añadir una etapa de limpieza para el contaminante  $i$ .

$$X_{\text{contaminante } i_{n+1}} = (1 - \varepsilon_i) \cdot X_{\text{contaminante } i_n} \quad (4)$$

- $X_{\text{contaminante } i}$  = concentración del contaminante en el gas de síntesis.
- $X_{\text{Limite contaminante } i}$  = concentración aceptable de contaminante en el gas de síntesis.
- $X_{\text{contaminante } i_{n+1}}$  = concentración del contaminante  $i$  después de la etapa de limpieza  $n$ .
- $\varepsilon_i$  = eficiencia del proceso de limpieza del contaminante  $i$ .
- $X_{\text{contaminante } i_n}$  = concentración del contaminante  $i$  antes de la etapa  $n$ .

## b. Dimensionamiento

### Concentración de partículas

Del estudio de la tesis de Ricardo García (2017) se extrae el flujo volumétrico de salida de syngas, calculado respecto al uso de hojas de caña de azúcar. Estos datos son los que se esperan obtener según el diseño del gasificador.

Tabla 46.

*Flujo volumétrico de salida del gasificador de la Universidad de Piura.*

Flujo volumétrico de salida	60 m <sup>3</sup> /h	0.0167 m <sup>3</sup> /s
-----------------------------	----------------------	--------------------------

*Fuente. García, 2017.*

Como seguridad se tomará que los 100,000 mg/Nm<sup>3</sup> de particulado tiene un tamaño de partícula de 5 µm. Y que disminuye en un 50% al disminuir de tamaño de partícula.

Si el flujo volumétrico de la salida del syngas es 0.0167 m<sup>3</sup>/s, se genera 1670 mg de particulado por segundo.

### Alternativa A

Se propone el uso de un ciclón rotacional y un filtro de lecho granular. Se observa que para llegar a un contenido preferente de particulado se debe hacer uso de 3 etapas de ciclones (3 ciclones rotacionales) y un filtro de lecho granular.

Tabla 47.

*Concentración de partículas por cada etapa de ciclón.*

<b>Tamaño <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Concentración a la salida (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración Etapa 1 (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración Etapa 2 (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración Etapa 3 (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>
5	1,670	334	66.8	13.36
2.5	835	250.5	75.15	22.545
1.25	418	167	66.8	26.72
1	209	104.375	52.1875	26.09375
0.625	104	83.5	66.8	53.44

*Fuente.* Elaboración propia.

A partir de la segunda etapa se cumple el requerimiento mínimo un particulado menor a  $10 \mu\text{m}$  con una concentración menor a  $50 \text{ mg/Nm}^3$ .

Para disminuir el contenido de partículas de menor tamaño se propone un filtro de lecho de arena o granular. Se considera una eficiencia de 80 – 40% donde 80% le pertenece a la partícula de mayor tamaño, a medida que se reduce el tamaño de partícula, la eficiencia se reduce también.

Tabla 48.

*Concentración en el filtro granulado.*

<b>Tamaño (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Concentración a la entrada (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración a la salida (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>
5	13.36	2.672
2.5	22.545	6.7635
1.25	26.72	10.688
1	26.09375	13.046875
0.625	53.44	32.064

*Fuente.* Elaboración propia.

La concentración a la salida del filtro granulado es aceptable. Con un tamaño de partícula de  $5 \mu\text{m}$  y una concentración  $2.672 \text{ mg/Nm}$  y una partícula de  $1 \mu\text{m}$  con una concentración de  $13.046 \text{ mg/Nm}$ .

### Alternativa B

Se plantea el uso de un ciclón rotacional y un filtro de fibras cerámicas (debido a su alta eficiencia en la remoción de particulado).

El sistema cuenta con un ciclón rotacional y un filtro de fibras cerámicas.

Tabla 49.

*Concentración en el filtro de fibras cerámicas.*

Tamaño	Concentración Etapa 1 (mg/Nm <sup>3</sup> )	Salida del filtro (mg/Nm <sup>3</sup> )
5	334	3.34
2.5	250.5	2.505
1.25	167	1.67
1	104.375	1.04375
0.625	83.5	0.835

*Fuente.* Elaboración propia.

La concentración a la salida del filtro cerámico es aceptable. Con un tamaño de partícula de 5  $\mu\text{m}$  y una concentración 3.34 mg/Nm y una partícula de 1  $\mu\text{m}$  con una concentración de 1.04375 mg/Nm.

La alternativa “A” ha usado 3 ciclones rotacionales y un filtro de lecho granular para alcanzar el contenido de particulado aceptable.

La alternativa “B” ha usado 1 ciclón rotacional y un filtro de fibras cerámicas.

Se prefiere la alternativa “A” a pesar de usar dos ciclones más que la opción “B”. Debido a la utilidad del filtro de arena o granular para eliminar otros contaminantes como los Tars,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCL}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y por ser más económico que el filtro de fibras cerámicas (alto costo de reposición de las fibras cerámicas).

### Concentración de alquitrán

Según la literatura se produce  $30,000 \text{ mg/Nm}^3$  de alquitrán. Si el flujo volumétrico de la salida del syngas es  $0.0167 \text{ m}^3/\text{s}$ , se genera  $501 \text{ mg}$  de particulado por segundo.

El ciclón contribuye a la disminución de alquitranes. Por seguridad se trabaja con reducción de un 30% por etapa del ciclón.

Tabla 50.

*Concentración de alquitrán en cada etapa de ciclón.*

	<b>Concentración a la salida (<math>\text{mg/Nm}^3</math>)</b>	<b>Concentración Etapa 1 (<math>\text{mg/Nm}^3</math>)</b>	<b>Concentración Etapa 2 (<math>\text{mg/Nm}^3</math>)</b>	<b>Concentración Etapa 3 (<math>\text{mg/Nm}^3</math>)</b>
Alquitranes	501	350.7	245.49	171.843

*Fuente.* Elaboración propia.

El contenido de alquitrán se ve reducido a  $171.843 \text{ mg}$ , luego de pasar por los 3 ciclones rotacionales.

El filtro de lecho de arena contribuye a la disminución del alquitrán. Con una eficiencia de 70%.

Tabla 51.

*Concentración de alquitrán en el filtro granulado.*

	<b>Concentración a la entrada (<math>\text{mg/Nm}^3</math>)</b>	<b>Concentración a la salida (<math>\text{mg/Nm}^3</math>)</b>
Alquitrán	171.843	51.5529

*Fuente.* Elaboración propia.

A la salida del filtro de arena se tendría una eliminación de alquitrán aceptable, la cual llega al mínimo requerido ( $\text{menor a } 100 \text{ mg/Nm}^3$ ) para ser usado en un MCI.

### Concentración de ácidos

En el caso del ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) su concentración debe estar por debajo de 35.87 ppm.

La concentración del Ácido se calcula según:

$$X_{\text{ppm}} = \frac{X_{\%} \cdot 10^6}{100} > X_{\text{Limite contaminante i}} \quad (5)$$

- X<sub>ppm</sub> = concentración en ppm
- X<sub>%</sub> = concentración en %

Con un porcentaje de 0.01% en la composición del syngas, se tiene 100 ppm.

A la salida del filtro de arena la concentración de ácido sulfhídrico es:

Tabla 52.

*Concentración de H<sub>2</sub>S a la salida del filtro de arena.*

	<b>Concentración a la entrada (ppm)</b>	<b>Concentración a la salida (ppm)</b>
H <sub>2</sub> S	100	20

*Fuente.* Elaboración propia.

La concentración a la salida del filtro de arena es de 20 ppm inferior al mínimo requerido.

El sistema de limpieza propuesto cuenta con:

- 3 ciclones rotacionales
- Filtro de arena.

Con los ciclones rotacionales y el filtro de arena se espera reducir los niveles de contaminantes para llegar al mínimo requerido para el correcto funcionamiento del MCI (motor de combustión interna).

El ciclón rotacional juega un papel importante en la limpieza de particulado de mayor tamaño y menor medida, pero no despreciable, en la remoción de alquitrán. La simpleza de construcción de los ciclones rotacionales y su fácil mantenimiento aseguran una limpieza a bajo costo.

Se prefiere el uso de un filtro granulado (lecho de arena) a otros tipos de filtros, debido a la amplia variedad de contaminantes capaz de separar de la corriente de gas.

No se ha considerado las torres de lavado por su alto costo y complejidad del tratamiento de las aguas residuales.

Los filtros electrostáticos por su alto costo y mantenimiento tampoco han sido considerados.



## Conclusiones

**Primera.** La composición del gas al igual que la de contaminantes depende de la biomasa, del proceso de gasificación usado, condiciones de operación y agente gasificante, por lo que su contenido energético y contaminante varía.

**Segunda.** Los contaminantes principales se clasifican en 5: partículas, alquitranes, componentes ácidos, condensables y compuestos nitrogenados.

**Tercera.** El sistema planteado se centra en los requerimientos del syngas para un MCI por lo que se prioriza la eliminación de partículas y alquitranes. La depuración de componentes ácidos y nitrogenados no es necesaria en los MCI. Estos no influyen notablemente en la eficiencia de los motores de combustión interna. Pero si en la producción de gases altamente contaminantes para el medio ambiente.

**Cuarta.** De las tecnologías analizadas: El ciclón es un buen elemento para retirar partículas sólidas de gran tamaño (mayores a 50  $\mu\text{m}$ ) de la corriente del syngas. También es usado para eliminar alquitranes, aun que con una baja eficiencia. El ciclón es un elemento básico en los sistemas de limpieza de generación de Syngas mediante gasificación.

**Quinta.** El uso de filtros para quitar las partículas de menor tamaño es muy utilizado (mayores a 0.01  $\mu\text{m}$ ). De los distintos filtros expuestos se opta por el filtro de lecho de arena, de fácil mantenimiento, además de eliminar contaminantes ácidos de la corriente del syngas. Los filtros cerámicos, metálicos, electrostáticos, etc. son capaces de eliminar partículas de tamaño menor en comparación con los filtros de lecho de arena. Pero para nuestros requerimientos no es necesaria la eliminación de partículas muy pequeñas. Por lo que se opta por un filtro de lecho de arena además de ser de fácil mantenimiento y de eliminar contaminantes ácidos de la corriente del syngas.

**Sexta.** El uso de Scrubbers húmedos o torres de lavados está orientado a la limpieza de gases ácidos. Se utiliza también para retirar partículas de menor tamaño. No se considera el uso de torres de lavado por su alto costo debido al sistema de tratamiento de agua residuales y que no es de prioridad la eliminación de gases ácidos en el uso de MCI.

**Séptima.** El uso de dolomita como material de lecho es una buena opción para reducir contaminantes como alquitranes, componentes ácidos, nitrogenados y condensables (elementos traza y alcalinos), pero debido a los altos costos de reposición de esta no se considera viable.

**Octava.** Con el uso de 3 ciclones rotacionales y un lecho de arena se cumple los requerimientos mínimos del syngas para ser usados en los MCI.



## Referencias bibliográficas

- Acosta, A. (2015). Abatimiento de tars mediante lavado con disolvente en una torre de relleno.
- Anukan, A. (2016). Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*.
- Arteaga, L. E. (2014). Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación.
- Barreira Moreno, V. M. (2007). Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado.
- Capareda SC. (2011). Biomass energy conversion, sustainable growth and applications in renewable energy sources.
- Castellanos, J. U. (2012). Modelado del proceso de gasificación de biomasa para aprovechamiento energético: una revisión al estado del arte.
- Fonseca, N. (Julio de 2003). Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa en motores de combustión interna alternativos.
- García, E. A. (Abril de 2012). Diseño básico del tren de limpieza de gases de turbina de una central de gasificación con ciclo combinado IGCC.
- García, R. (2017). Desarrollo de metodología para validación experimental de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico Eléctrico, Universidad de Piura, Piura, PE.
- Gonzalez, J. (2015). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética.
- Hasler, P. (1999). Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification.
- Hasler, P. a. (1997). Evaluation of gas cleaning technologies for small scale biomass gasifiers. Swiss federal office of energy.
- Ibsen, K. (2006). Equipment design and cost estimation for small modular biomass systems, synthesis gas cleanup, and oxygen separation equipment task 2: gas cleanup design and cost estimates - wood feedstock.

- Kadam, Al Dury S. S. K. (2009). Removal of tar in biomass gasification process using different carbon materials, chemical engineering transactions.
- Knoef. (2000). A review of fixed bed gasification systems for biomass. School of energy studies for agriculture.
- Laurence, L. (13 de Marzo de 2011). Syngas treatment unit for small scale gasification - application to IC engine gas quality requirement.
- Leon, C. M. (2016). Estudio tecno-económico de una planta de gasificación de residuos sólidos urbanos para aplicaciones de caldera y motor.
- López, S. H. (2015). Diseño de una planta de gasificación de residuos sólidos urbanos para generación de electricidad con una pila de combustible.
- Nordin A. (1994). Chemical elemental characteristics of biomass fuels.
- Nourredine Abdoulmoumine, S. A. (2015). A review on biomass gasification syngas cleanup.
- Palatnic, M. E. (2011). Diseño y desarrollo de pequeñas unidades de gasificación de madera para aplicaciones de generación de energía térmica y cogeneración a baja escala.
- Pérez, F. G. (12 de Junio de 2010). Método para determinar el calor específico de combustión del bagazo a partir de los factores agroindustriales en la industria de la caña de azúcar.
- Perez, P. (Mayo de 2011). Gas Pobre: factibilidad de su uso en los motores ZIL – 130.
- Rodriguez, R. A. (2013). Gasificación de residuos agroindustriales: predicción del comportamiento de distintos contaminantes.
- Ruiz E., S. J. (2014). Purificación y acondicionamiento del gas de gasificación de biomasa.
- S. Dasappa., H. S. (2003). Biomass gasification a substitute to fossil fuel for heat application.
- Sanchez, J. (Abril de 2007). Diseño, especificación y análisis crítico de un sistema de limpieza y depuración de gases para un gasificador de biomasa del tipo flujo descendente.
- Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) (2010). Overview on technologies for biomass combustion and emission levels of particulate matter.
- Toshiaki Hanaoka, K. M. (2012). Hot and dry cleaning of biomass-gasified gas using activated carbons with simultaneous removal of tar, particles, and sulfur compounds.
- U.S. Department of energy office of energy efficiency and renewable energy (May de 2006). Equipment design and cost estimation for small modular biomass systems, synthesis gas cleanup, and oxygen separation equipment.
- Ulrik Henriksen, J. A. (2003). The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier.

XiuLi Yin, C. Z. (2002). Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk.

