

# INFORME FINAL

“Capacitación en metodologías de reporte y control de emisiones gaseosas y particuladas de plantas de generación de energía a partir de biomasa y el abordaje de los elementos tecnológicos aplicados para cumplir con los estándares medioambientales” en el marco del Proyecto de Generación de Electricidad a partir de biomasa (PROBIO)”

**A:  
PNUD URUGUAY  
Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo  
PROYECTO PROBIO “Generación de Electricidad a partir de Biomasa”**

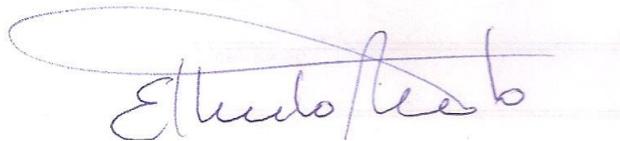
## **INFORME FINAL**

**“Capacitación en metodologías de reporte y control de emisiones gaseosas y particuladas de plantas de generación de energía a partir de biomasa y el abordaje de los elementos tecnológicos aplicados para cumplir con los estándares medioambientales” en el marco del Proyecto de Generación de Electricidad a partir de biomasa (PROBIO).**

Objetivos:

- Definir protocolos para el reporte y control de las emisiones gaseosas y particuladas de las plantas de generación de energía a partir de biomasa, donde se especifique los requerimientos que debe cumplir el generador y debe exigir DINAMA para garantizar el cumplimiento de los estándares de emisiones;

Montevideo, Enero de 2014



JOSE EDUARDO PEREIRA NETO

## INDICE

Resumen Ejecutivo.....	3
Introducción.....	5
I - Descripción de las tecnologías y equipamientos de medición y mitigación de emisiones gaseosas y particuladas utilizados en las plantas de generación de energía a partir de biomasa en Uruguay y evaluación de sus eficiencias - Tecnologías en Plantas de Generación de Energía a través de Biomasa en otros países y en Uruguay	
1.1 - Tecnologías de Quema en Uruguay.....	6
1.2 - Quema Directa.....	12
1.3 - Tecnologías de Gasificación.....	13
1.4 – Tecnologías de Gasificación.....	14
1.5 - Emisiones Particuladas y Gaseosas en Plantas de Generación de Energía a través de Biomasa, Tecnologías y Equipamientos de Medición Disponibles en Otros Países y en Uruguay.....	15
1.6 - Tecnologías y Equipamientos de Mitigación de Emisiones Particuladas y Gaseosas en Plantas de Generación de Energía a través de Biomasa en otros países y en Uruguay.....	23
II) Sugerencias para Protocolo de medición y mitigación de emisiones por parte de los generadores (en acuerdo con los estándares y exigencias ambientales nacionales e instalaciones existentes, incluyendo consideración de documentos previos existentes a nivel nacional e internacional.....	45
2.1 - Medición de Emisiones.....	45
2.2 - Tecnologías de Reportes en Continuo.....	51
2.3 - Mitigación de Emisiones.....	55
III) Sugerencias para Protocolo para orientación en requerimientos ambientales para cumplimiento a los estándares de emisiones de fuentes fijas (requerimientos técnicos relacionados con los sistemas de mitigación y su mantenimiento, frecuencia de mediciones, formato de sistematización y reporte de datos, frecuencia de reportes a DINAMA, para garantizar el cumplimiento de los estándares de emisiones.....	56

3.1- Mantenimiento de Sistemas de Mitigación.....	56
3.2 - Mediciones de Emisiones Fugitivas.....	66
3.3 - Reducción de Generación de Emisiones Fugitivas / Difusas.....	67
IV) Aspectos relevantes para la implementación de protocolos en el contexto nacional	
4.1- Implementación de Sugerencias.....	67
4.2 - Software Necesarios y Capacitación.....	68
V) Alternativas de uso y gestión de las cenizas de fondo y volante	
5.1 - Generalidades.....	68
5.2 - Cenizas Volantes.....	74
5.3 - Cenizas de Fondo.....	76
VI) Complementaciones	
6.1 - Aplicabilidad de metodologías de reporte y control utilizadas en otros países al sector energético nacional.....	77
VII – Bibliografía Consultada y Recomendada.....	80
 Anexo I	
ADAPTACIÓN DE CHIMENEAS A LAS CONDICIONES DE MUESTREO.....	85

## INFORME FINAL

### RESUMEN

Este Informe Final presenta informaciones y consideraciones sobre las emisiones generadas a través de chimeneas y fugitivas, por las actividades que se desarrollan en plantas de generación de energía a través de la quema de biomasa. Se consideran las tecnologías de abatimiento de emisiones y temas sobre su mantenimiento. Se propone el incentivo a las mediciones de emisiones a través de chimeneas y sus adaptaciones a las condiciones de muestreo. Se consideran informaciones básicas para la reducción de las emisiones fugitivas y la modelación de las emisiones con salida grafica para base de información sobre las necesidades en métodos, técnicas, procesos y operaciones para su reducción y al mismo tiempo conocimiento de los lugares de inmisión y de sus concentraciones en los receptores. Se proponen acciones de las instituciones involucradas en el tema, para procedimientos que conducen a incrementos en la preservación ambiental que incluyen emisiones atmosféricas y reducción de la disposición de cenizas a través de su uso en acuerdo con investigaciones y aprovechamientos internacionalmente practicados.

## Introducción

La combustión de biomasa para producción de energía supone la generación de contaminantes en mayor o menor cantidad, en acuerdo con la naturaleza del combustible y tipo de tecnologías utilizadas. Los contaminantes generados por la combustión de biomasa pueden ser emitidos al medioambiente. Hay que tener en cuenta que los diferentes procesos de transformación de biomasa en otros combustibles, como por ejemplo gas y alcohol, producen contaminantes entre los cuales se destacan el material particulado, el dióxido y monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los compuestos de azufre además de los residuos sólidos y líquidos.

Los principales residuos del proceso de combustión de biomasa que pueden llegar a la atmósfera, son las cenizas volantes, para lo que existen sistemas y equipos con alta tecnología y altos rendimientos para su retención y gran reducción de su emisión. Los sistemas y equipos se componen por filtros, ciclones, precipitadores electrostáticos, lavadores de gases que también se utilizan para otros combustibles, especialmente con el carbón, y en la industria química.

Las emisiones atmosféricas de la quema de biomasa vegetal pueden incluir contaminantes atmosféricos asociados a la composición de materia prima utilizada para la quema. En eso se incluyen los productos utilizados para tratamiento de los materiales llevados a la combustión, en lo que están involucrados, entre otros, el dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, partículas e hidrocarburos volátiles no metano, principalmente alcanos, alquenos y acetileno (Radke et al. 1991, Barbosa et al. 1999).

El dióxido de carbono originado en el proceso de combustión de la biomasa vuelve a la atmósfera, de donde fue tomado durante los procesos de generación de la biomasa vegetal. De esa manera, en términos generales, el uso de la biomasa vegetal como combustible no incrementa el contenido de dióxido de carbono de la atmósfera. Así, no contribuye al efecto invernadero. Hay que considerar que, si el uso de la quema de biomasa vegetal es superior a la producción de la biomasa, se podrá tener un incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Las emisiones de monóxido de carbono a través de la quema de biomasa vegetal en general son mayores que los niveles producidos por la quema de carbón, pero hay que tener en cuenta que la tecnología utilizada influye notablemente en

esas emisiones (Castellanos et al., 2008). La reducción de la formación de CO se obtiene a través del funcionamiento adecuado del equipo de combustión garantizando una quema completa.

l) Descripción de las tecnologías y equipamientos de medición y mitigación de emisiones gaseosas y particuladas utilizados en las plantas de generación de energía a partir de biomasa en Uruguay y evaluación de sus eficiencias.

### 1.1 - Tecnologías en Plantas de Generación de Energía a través de Biomasa en otros países y en Uruguay

Las principales categorías de tecnologías de conversión de biomasa en energía se refieren a los sistemas de quema directa y de gasificación. En la categoría de quema directa se incluyen “stoker boilers” (calderas de alimentación directa), calderas de lecho fluidizado y co-quema. En la categoría de gasificación se encuentran los sistemas de lecho fijo y de lecho fluidizado (EPA, 2007).

Se puede considerar que las tecnologías que se utilizan en Uruguay para la quema de biomasa y producción de energía están adentro de aquellas utilizadas en otros países para esa misma finalidad.

En términos internacionales, todavía hay algunos cuestionamientos sobre la eficiencia de las tecnologías de quema de biomasa. Hay empresas que todavía hacen continuados ajustes necesarios a través de los resultados de un monitoreo continuado que llevan a cabo, sobre relaciones entre cantidad de energía producida, cantidad de materia prima usada, cantidad de cenizas volantes y de fondo generadas, resultados de los muestreos en las chimeneas.

La tecnología más difundida a escala comercial para llevar a cabo la combustión de la biomasa es la tradicional de parrilla, utilizándose tanto parrillas fijas, horizontales e inclinadas, como móviles y vibratorias.

En los últimos veinte años la tecnología de lecho fluidizado para grandes equipos se está utilizando tanto en grandes plantas térmicas, como termoeléctricas alimentadas con biomasa. La tecnología de lecho fluidizado presenta la ventaja de trabajar a temperaturas inferiores, unos 800°C frente a los alrededor de 1000° C que trabajan los equipos de parrilla, lo que disminuye las emisiones de óxidos de nitrógeno y la formación de aglomerados y escorias producidos en la combustión de la biomasa. Es una tecnología más eficiente en general que la de parrilla frente a los variables contenidos de humedad y

la gran heterogeneidad que suele presentar la biomasa en sus características físicas. Utiliza combustibles de pequeña granulometría (partículas de 3-4 cm de dimensión máxima) que, en general, no son muy aptos para los equipos de parrilla.

Otras tecnologías comerciales para la combustión de la biomasa, son los hornos de combustible pulverizado y los de combustión ciclónica. Los primeros tienen la ventaja de facilitar la utilización conjunta de biomasa de granulometrías diferentes en una única cámara de combustión, a pesar del inconveniente de los altos costos que representa la molienda fina de la biomasa a utilizar. Por otro lado, los hornos ciclónicos son especialmente adecuados para biomasa de pequeña granulometría.

La tabla 01 presentada a continuación, contiene informaciones sobre los hornos de combustión de biomasa y la cantidad de ceniza generada, en acuerdo con el uso de algunas materias primas:

<b>Tipos de hornos de combustión de biomasa</b>					
<b>Operación</b>	<b>Tipo</b>	<b>Rango de potencia</b>	<b>Combustible</b>	<b>% ceniza</b>	<b>% contenido de agua</b>
Automática	Hornos con el fogón abajo	20 KW- 2.5 MW	Astillas de madera, residuos de leña	< 2	5 - 50
	Hornos con parrilla móvil	150 KW- 15 MW	Todos combustibles de madera y la mayoría de biomasa	< 50	5 - 60
	Horno con parrilla	20 KW- 1.5 MW	Residuos de madera seca	< 5	5 - 35
	Hornos con el fogón abajo y parrilla rotatoria	2- 5 MW	Astillas de madera, alto contenido de agua	< 50	40 - 65
	Quemador simple	3- 5 MW	Fardos	< 5	20
	Lecho fluidizado estacionario	5- 15 MW	Biomasa con diámetro < 10mm	< 50	5 - 60
	Lecho fluidizado circulante	15 - 100 MW	Biomasa con diámetro < 10mm	< 50	6 - 60
	Combustor de polvo con flujo entrante	5- 10 MW	Biomasa con diámetro < 5mm	< 5	20
Encendido con otros combustible	Lecho fluidizado estacionario	50- 150 MW	Biomasa con diámetro < 10mm	< 50	5 - 60
	Lecho fluidizado circulante	100- 300 MW	Biomasa con diámetro < 10mm	< 50	5 - 60
	Quemador simple	5- 20 MW	Fardos	< 5	20

Tabla 01 – Fuente: Combustion and Co-Combustion of Biomass, Tomás Nussbaumer, 12<sup>th</sup> European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17-21 June, 2002 – Amsterdam

### 1.1.1 - Combustión en Lecho Fluidizado -CLF- (Fluidized bed combustión -FBC-)

La combustión tiene lugar por inyección desde el fondo de aire de combustión en un lecho turbulento. Se consiguen con esta técnica bajas emisiones mediante

inyección del aire en etapas, adición de caliza y bajas temperaturas de combustión que oscilan entre 750 °C y 950 °C. La CLF se adapta particularmente bien a los combustibles ricos en ceniza. Pocas plantas de combustión están equipadas con la técnica de CLF y de ellas, dentro del segmento PTN  $\geq$  300 MWt (capacidad térmica), la mayoría corresponden a la versión de Lecho Fluidificado Circulante -CLFC- (Circulating Fluidized Bed Combustion -CFBC-).

En las calderas de lecho fluidizado se mezcla caliza molida al combustible y se introducen a la cámara de combustión. Una corriente forzada de gases mantiene suspendida la mezcla dentro del fogón. El estado de flotación de los sólidos permite a las partículas moverse libremente como en un líquido. Se crea un ambiente turbulento donde se produce la combustión.

Las partículas producidas por el lecho, que luego saldrán de él, pueden ser removidas corriente abajo por un precipitador electrostático o por un filtro de mangas. Las cenizas de material más pesado que permanecen al interior del lecho, precipitan y son llevadas fuera por un tornillo transportador.

Los quemadores de lecho fluidizado se dividen en dos categorías: lecho fluidizado circulante y lecho fluidizado burbujeante.

El lecho circulante es más apropiado para carbones de mejor calidad con alto contenido de carbono y bajo contenido de volátiles (antracita, coke y bituminoso).

El tipo de lecho burbujeante se utiliza para biomasa y carbones con alto contenido de volátiles.

Los lechos fluidizados pueden operar a presión atmosférica o en una cámara presurizada. En la cámara presurizada, las presiones pueden ser 10 a 20 veces la presión atmosférica. Los quemadores de lecho fluidizado presurizado logran un aumento importante en eficiencia térmica respecto de los de lecho fluidizado atmosférico.

La combustión de lecho fluidizado permite el uso de carbones con alto contenido de azufre, combustibles muy sucios y combustibles de bajo poder calorífico incluso biomasa. Los carbones con mucha ceniza, quemados en lechos fluidizados, requieren menos preparación y mantención en comparación a los quemadores de carbón pulverizado.

#### a) - Lecho Fluido Circulante

Caldera para la utilización de combustibles sólidos como el carbón, en especial los de difícil combustión tales como petcoke o coque de petróleo, antracita y lignitos (con alta humedad, baja materia volátil y bajo poder calorífico), sin requerir el uso de combustibles auxiliares. Se basa en una combustión lenta a baja temperatura, mediante un material inerte caliente como la arena, que permite encender el combustible al quedar en contacto directo con dicho material. Las calderas de lecho fluido circulante recirculan el material inerte y el combustible a alta velocidad en un loop como parte del proceso de combustión. Si se añade caliza, se puede lograr un abatimiento de los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) de 90%.

Usadas principalmente para la generación de energía con carbón, así como para el tratamiento de biomasa y residuos industriales. Estas calderas permiten la máxima flexibilidad en combustibles con muy alta eficacia y mínimas emisiones a la atmósfera.

#### b) - Calderas de Lecho Fluido Burbujeante

Para la utilización de combustibles de alto contenido de humedad y bajo poder calorífico, sin requerir el uso de combustibles auxiliares. Las calderas de lecho fluidizado burbujeante son especialmente adecuadas para quemar varios tipos de desechos industriales y domiciliarios, y en particular aquellos de la industria forestal en general. Estas calderas permiten la quema de combustibles con un alto contenido de sustancias contaminantes inertes, como por ejemplo, piedras, hierro, etc.

La humedad del combustible puede variar considerablemente sin afectar negativamente la combustión, debido a la alta capacidad de calor del lecho fluidizado que aporta el material inerte que se emplea en el proceso de combustión. Dicha combustión se produce mediante la inyección del combustible en un lecho de arena, donde queda retenido hasta su quema total lo que resulta en una eficiencia de combustión superior al 99%.

En la caldera de lecho fluidizado burbujeante no se recircula el material inerte con el combustible como se hace en una caldera de lecho fluidizado circulante. Estas calderas se construyen para bajas potencias eléctricas inferiores a 60 MW eléctricos.

### 1.1.2 - Lecho Fijo

Las de lecho fijo presentan la posibilidad de formación de depósitos en la caldera o de problemas de corrosión por la presencia de compuestos de cloro o metales que dificultan la buena transferencia de calor y el deterioro rápido de los equipos. En general hay presencia de inquemados en la corriente de gases.

Los combustibles sólidos se colocan en masa sobre una parrilla fija o de movimiento lento. Las temperaturas de combustión oscilan entre 1.000 °C y 1.300 °C.

Las partes fundamentales de las calderas de lecho fijo son el sistema de recepción del combustible, la parrilla, los sistemas de inyección del aire primario y secundario de combustión y el sistema de descarga de cenizas.

#### a) - Parrilla Fija inclinada

El combustible es introducido por la parte superior de la parrilla y se desliza por gravedad mientras se quema. Son las más económicas, pero ofrecen poco control sobre la combustión, es frecuente la acumulación de combustible en alguna parte de la parrilla y proporcionan bajo rendimiento.

#### b) - Parrilla Viajera

Las parrillas viajeras consisten en una cinta móvil que transporta el combustible por la parte inferior de la cámara de combustión. El combustible se deposita sobre la cinta uniformemente desde la tolva de almacenaje evitando así la formación de cúmulos. Es muy aconsejable para combustibles con un alto contenido en ceniza ya que la ceniza es transportada fuera de la caldera constantemente. Son las más costosas y las que más labores de mantenimiento requieren.

#### c) – Parrilla Vibrante

La parrilla vibrante distribuye el combustible en una capa uniforme depositado sobre ella mediante un movimiento vibratorio. Son más económicas que las parrillas viajeras y proporcionan similares rendimientos.

### 1.1.3 - Calderas con Parrilla Móvil

En este tipo de calderas la alimentación de carbón o leña a la zona de combustión se efectúa mediante una parrilla móvil. Las parrillas móviles se pueden dividir a su vez en 3 grupos generales, dependiendo de la forma en que el combustible llega a la parrilla para ser quemado. Los tres tipos son:

- Alimentación inferior
- Alimentación superior
- Sistema tipo buzón repartidor (Spreader)

### 1.1.4 - Calderas con Combustible Sólido Pulverizado

Estas tecnologías tienen en común el uso del combustible sólido finamente pulverizado, que es inyectado a presión en el fogón, en forma similar a un quemador de petróleo. Estas calderas emplean quemadores del tipo que se indica a continuación:

- Quemador Tangencial;
- Fogón Horizontal (Wall-Fired);
- Sistemas de Arco.

### 1.1.5 - Calderas de Gasificación de Pellets

Son una modernización de las calderas de parrillas fijas, cuentan con una alimentación automática del combustible y regulan automáticamente las condiciones de la combustión, lo que permite tener altas eficiencias y reducir la cantidad de cenizas sin quemar generadas.

Tienen aplicaciones residenciales e industriales; como principio de combustión utilizan la gasificación previa de la biomasa, permitiendo regular la calidad de la combustión fácilmente, por lo cual se obtienen emisiones con bajas concentraciones de material particulado.

### 1.1.6 - Horno de Combustión Ciclónica

La cámara de combustión se divide en dos partes: una región cilíndrica aislada térmicamente y otra tronco-cónica donde el calor generado en la combustión es transferido al agua que circula externamente a esta cámara. En la cámara cilíndrica la biomasa se quema en suspensión, mientras que en la cámara cónica ocurre la

combustión ciclónica de los volátiles, de partículas inquemadas y de CO completándose la combustión.

El sistema de alimentación, consiste en una tolva, un tornillo dosificador y un dispositivo rompe bóvedas situado dentro de la tolva.

Dispone de dos ventiladores para alimentar el aire de combustión, y puede contener un equipo para abatimiento de emisiones como un multiciclón, un extractor de gases, un filtro de mangas y una chimenea.

Un sistema de control posibilita la operación continua de la caldera, la cual está debidamente instrumentada con termopares, medidores de caudal de aire, sistemas de análisis de gases de combustión y de partículas. Con esto se puede obtener un conocimiento preciso del proceso de combustión.

## 1.2 - Tecnologías de Quema en Uruguay

### a) - Cámara Torsional

Permite la combustión de residuos celulósicos de tamaños entre 0,1 mm y 20 a 30 mm, originados en diversos procesos industriales. Presenta una alta eficiencia y una combustión de extrema estabilidad en un amplio rango de aeración, desde excesos de aire muy bajos (menor del 10%) a condiciones de aeración muy altas.

La Cámara Torsional permite, por su aerodinámica, tiempos de residencia de las partículas combustibles del orden de 60 veces superior al correspondiente a los productos gaseosos, lo que permite utilizar biomasas con humedad de hasta el 30%, que ingresan tangencialmente en una cámara de suspensión neumática en donde las partículas se mantienen en suspensión aerodinámica. Durante esa fase se produce un proceso inicial de pirólisis (o devolatilización), de manera que el conjunto de elementos carbonosos se concentra en la zona periférica, donde hay mayor presión parcial de oxígeno, lo que permite su rápida conversión a fase gaseosa y la no emisión de efluentes carbonosos.

Por cómo se encuentra dosificado el aire de combustión en la cámara, la temperatura de combustión es más uniforme que en los sistemas convencionales, logrando minimizar la fusión de cenizas y disminuyendo la sublimación de las mismas, lo que permite retener una parte importante de ellas en el recinto de combustión desde donde son evacuadas periódicamente.

La velocidad de respuesta de este sistema de combustión frente a variaciones en la demanda es similar a cuando se utilizan combustibles líquidos o gaseosos, por lo que no es necesario en ningún caso el quemado simultáneo de fuel oil o gas natural para mantener estable la presión, al contrario que en los sistemas de grillas que generan vapor para alimentar turbinas para producción de energía eléctrica.

Las cámaras torsionales pueden trabajar con valores de exceso de aire tan bajos como 15% (similar a los quemadores de combustibles fósiles), con CO menor a 20 mg/Nm<sup>3</sup> y VOC menores a 10 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### b) - Parrilla Pinhole

La parrilla Pinhole es una parrilla fija inclinada refrigerada por agua o aire con pequeños agujeros distribuidos por toda su superficie a través de los cuales se introduce el aire primario de combustión. Cuenta también con un sistema de limpieza gracias al cual pueden alcanzarse altas temperaturas sin dañar la parrilla. Consiste en el arrastre de la ceniza mediante la inyección de vapor de agua desde los laterales de la parrilla, evitando la formación de depósitos que dificulten la transferencia de calor. Gracias a estos eficaces sistemas limpieza y refrigeración, la parrilla Pinhole proporciona importantes ventajas con respecto a las parrillas tradicionalmente utilizadas en calderas de suspensión como las de vuelco o las viajeras:

- menores costos de mantenimiento ya que no incluye partes móviles.
- mayores temperaturas de combustión. El eficiente sistema de refrigerado permite que se alcancen mayores temperaturas, como las requeridas por combustibles con alto porcentaje en humedad como el bagazo.
- menor acumulación de cenizas;
- no existen limitaciones en cuanto al tamaño de la parrilla;
- costos de inversión similares a los de parrillas de vuelco y menores que los de parrilla viajera.

#### 1.3 - Quema directa

La quema directa produce la combustión en una cámara en forma continua (no hay un fraccionamiento de la combustión en forma física por la cámara de combustión), mientras que en la quema por gasógeno la combustión se hace en dos etapas separadas por dos cámaras de combustión unidas por un ducto (en la

primera cámara se hace una combustión parcial con falta de aire y en la segunda cámara de combustión se queman los gases a “medio quemar” de la primera cámara).

#### 1.4 – Tecnologías de Gasificación

La gasificación de biomasa para la producción de energía involucra el calentamiento de materiales sólidos en un medio sin oxígeno para producir un gas de poco o medio poder calorífico. Dependiendo del contenido de carbón e hidrógeno en la biomasa y de las propiedades del gasificador, el calentamiento del gas sintetizado puede llegar de 100 a 500 Btu/ft<sup>3</sup> (10 a 50 % del gas natural). El valor de calentamiento del gas sintetizado en general viene del CO y del hidrógeno producido en el proceso. Los constituyentes remanentes son el CO<sub>2</sub> y otros gases incombustibles.

La gasificación de la biomasa lleva a algunas ventajas sobre la quema directa, por que el gas puede ser limpiado y filtrado para la remoción de componentes químicos problemáticos antes de la quema. También se puede obtener la gasificación a través de acciones químicas y/o biológicas (Ej. Digestión anaeróbica), aunque la gasificación térmica actualmente es la opción comercialmente recomendable.

El gas de salida del proceso de combustión de biomasa para gasificación es generalmente denominado syngas (gas sintetizado), pero también se lo denominan gas de madera y gas producido. Se puede producir el syngas por calentamiento en un ambiente pobre o sin oxígeno, por oxidación parcial o a través de calentamiento indirecto en ausencia de oxígeno.

Muchos de los procesos de gasificación incluyen una secuencia de procesos. El proceso primario de conversión es la pirólisis, a través de la descomposición térmica de la biomasa (en ambiente pobre o sin oxígeno), para producir gases, líquidos y carbón. La pirólisis lanza los componentes volátiles de la biomasa a una temperatura próxima a 594°C, a través de una serie de reacciones de gran complejidad.

Los combustibles de biomasa son ideales para la pirólisis ya que tienen una gran cantidad de componentes volátiles (70 a 85 % en base seca). El siguiente paso consiste en un proceso de gasificación, además, que convierte los alquitranes sobrantes y carbón de leña en CO utilizando vapor de agua y / o combustión parcial.

Otra consideración sobre la biomasa como combustible es el problema potencial de formación de escoria, de ensuciamiento y corrosión. Algunos combustibles de biomasa tienen alta composición de materiales alcalinos (principalmente potasio) y el contenido de cloro puede llevar a problemas en la deposición de cenizas. El cloro en los gases de combustión, sobre todo a altas temperaturas, puede producir una corrosión acelerada del sistema de combustión y la combustión de componentes de limpieza de gases. Estos problemas se pueden minimizar o evitar mediante el cribado de los suministros de combustible para los materiales con alto contenido de cloro y álcalis, la limitación de la contribución de la biomasa a la entrada de calor de la caldera a 15 por ciento o menos, el uso de aditivos de combustible, o el aumento de hollín-soplado. El recurso más problemático de la biomasa tiende a ser los residuos agrícolas, incluyendo pastos y pajas, que tienen alto contenido alcalino y cloro. Por otro lado, la mayoría de los materiales de madera y papeles usados son relativamente bajos en álcalis y cloro y no deben presentar este problema.

## 1.5 – Emisiones Particuladas y Gaseosas en Plantas de Generación de Energía a través de Biomasa, Tecnologías y Equipamientos de Medición Disponibles en Otros Países y en Uruguay

### 1.5.1 - Material Particulado en Chimeneas

Entre las plantas de generación de energía a través de la quema de biomasa en Uruguay, hasta el momento de las visitas realizadas para la consultoría, solamente una de ellas utilizaba equipamiento para el monitoreo continuado de emisiones de material particulado. Asimismo, no hay disponibilidad de ese monitoreo continuado a través de la web, para el órgano de regulación ambiental.

El monitoreo continuado del material particulado, lleva al conocimiento de los picos de emisiones (perfil diario/mensual/anual de las emisiones), pero, no lleva a la obtención de una muestra que se pueda conducir a un análisis de los elementos presentes en el material particulado. De esa manera los muestreos puntuales realizados en periodicidad generalmente semestral, mismo con la presencia de equipos de monitoreo continuado, son imprescindibles a que se pueda obtener muestras que podrán conducirse a la caracterización de sus componentes. Además, contribuyen para la calibración y conocimiento del funcionamiento de los equipos de monitoreo continuado.

La caracterización de los elementos presentes en el material particulado permite también el establecimiento de su toxicidad y de las posibilidades de su uso y disposición.

El conocimiento de los picos de emisiones es importante una vez que ellos permiten saber los momentos de mayores concentraciones de emisión de un contaminante atmosférico y eso está asociado a los efectos en el ambiente y al mismo tiempo a las condiciones del proceso.

Las mediciones puntuales en chimeneas se realizan en general a través empresas proveedoras de servicios de medición. En términos generales, se producen sin la presentación de certificación y calibración de los equipos de muestreo y de aquellos para la preparación de los materiales y las determinaciones de las emisiones de material particulado.

#### a) - Muestreos Puntuales de Material Particulado en Chimeneas / Ductos de Exhaustión

Los muestreos puntuales de material particulado total en chimeneas se hacen independientemente de la existencia o no, de equipos para monitoreo continuado. En caso de existencia de esos equipos, el monitoreo puntual es tomado como una prueba del funcionamiento del equipo de monitoreo continuado, al mismo tiempo que sirve también para su calibración. Así, con la presencia de equipos de monitoreo continuado, el espacio de tiempo entre los monitoreos puntuales en general es de 8 meses o 01 año.

Cuando se detecta el mal funcionamiento o problemas en el equipo de monitoreo continuado, a través de la comparación con resultados obtenidos por el muestreo puntual, este debería realizarse nuevamente después de la re-instalación del equipo de monitoreo continuado.

La preparación de los materiales para muestreo puntual de material particulado en chimeneas se empieza por la elección del filtro, que será en acuerdo con posibles necesidades posteriores de análisis químico de los materiales presentes. De esa manera, por ejemplo, cuando se presenta la posibilidad de analizar la presencia de sílice, no se debe usar filtros de cuarzo. Se complementa con el secado de los filtros, su pesaje y posterior acondicionamiento para aislarlo de absorción de humedad de la atmósfera. Después del muestreo se hace un nuevo pesaje del filtro conteniendo

el material particulado muestreado para la determinación de la concentración de material particulado.

Se necesitan otros procedimientos para que se pueda asegurar las mejores condiciones de muestreo isocinético, como la elección del diámetro adecuado de la boquilla del equipo de muestreo. La mejor boquilla es aquella que permite el isocinetismo (velocidad del gas en la boquilla de muestreo igual a la velocidad del gas en la chimenea) a un caudal de muestreo aproximadamente igual al caudal de diseño óptimo.

Para seleccionar el diámetro ideal de la boquilla se requiere efectuar un recorrido preliminar, este consiste en medir los siguientes parámetros:

- Presión de velocidad en cada punto.
- Temperatura del gas en la chimenea en cada punto.
- Presión estática.
- Presión barométrica.
- Asumir o determinar el porcentaje de humedad.

Los procedimientos se encuentran en el método 5 US EPA y en los documentos que se pueden acceder a través de los links presentados abajo (en inglés):

- Método 5 : <<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-05.pdf>>;
- Información Técnica: < <http://www.epa.gov/ttn/emc/informd/tid-001.pdf>>;
- Explicaciones del método 5: <<http://www.epa.gov/ttn/emc/informd/tid-019.pdf>>;
- Tren de muestreo: < <http://www.epa.gov/ttn/emc/ord/00139.txt>>
- Mantenimiento, Calibración y Operación del equipo:  
< <http://www.epa.gov/ttn/emc/methods/44rt016s.pdf>>
- Detalles de Construcción del equipo de muestreo isocinetico (APTD-0581):  
< <http://www.epa.gov/ttn/emc/methods/44rt015s.pdf>>
- Método alternativo de pos calibración del método 5, disponible en:  
<<http://www.epa.gov/ttn/emc/approalt/alt-009.pdf>>

Se obtuvieron informaciones de la existencia en el país de 03 equipos para muestreo en chimeneas, de acuerdo con normativas internacionales (métodos nº 5, 17, 29 y 8 US EPA; NBR 12827 - ABNT Brasil; L9.228 de CETESB, Brasil; entre

otros), para esa finalidad: UDELAR (Facultad de Ingeniería), LATU y Ecotech. Asimismo, todavía no hay en Uruguay la calibración y certificación de dichos equipos.

Se realizó una visita y una reunión con el personal de LATU (dirección y técnicos involucrados en el tema de mediciones de emisiones atmosféricas), con la finalidad de consultar la posibilidad de que LATU realice calibraciones y certificaciones de los equipos para muestreo isocinético en chimeneas. La información que se obtuvo fue que hay condiciones para eso, pero se debe desarrollar un procedimiento específico, y, para eso hay necesidad de aprobación de instancias superiores.

Por cuanto a la composición química del material particulado, en términos cualitativos, la Facultad de Ciencias de UDELAR a través del Servicio de Microscopía Electrónica puede realizar análisis de metales en filtros de muestreo de material particulado, además de la posibilidad de barrido en muestras sólidas. La microscopia electrónica de barrido es una técnica cuyos costos son bajos y permite obtener información básica de los elementos presentes en la muestra. Esa información es de importancia fundamental hacia el conocimiento de la presencia de metales tóxicos en las muestras, para conducirse hacia la cuantificación, a través de otras técnicas (Ej. Espectrofotometría de Absorción Atómica, Inductively Coupled Plasma, etc.).

El costo de la utilización de la microscopia electrónica de barrido de US\$ 40.00, la hora y, de manera general, en una hora se pueden analizar tres muestras.

La cualificación de los resultados de muestreo de material particulado en chimeneas es de extrema importancia para la calidad del aire y la evaluación de necesidades de técnicas, operaciones y procesos que puedan conducir a la eliminación o reducción de emisiones de materiales tóxicos.

En términos generales, los límites de las concentraciones de material particulado en acuerdo con las normativas existentes para calidad del aire, se refieren solamente a cantidades y no conllevan a informaciones sobre la posibilidad de presencia de elementos tóxicos en su composición.

Cuando los muestreos en ductos y chimeneas de actividades industriales se hacen para determinación de material particulado total, los análisis que se necesitan para conocerse la presencia y cantidad de elementos tóxicos en su composición, son de manera general, de alto costo. Pero la necesidad del conocimiento de los

elementos presentes en las emisiones de ductos y chimeneas industriales no se conduce únicamente a la presencia de elementos tóxicos, sino de la posibilidad de estudios sobre la disposición final de esos materiales y de su reaprovechamiento.

El método de barrido a través de microscopía electrónica con espectrometría de energía dispersiva – MEB/EDS es un método que permite conocerse los elementos presentes en las muestras de material particulado total, ventajoso por su menor costo frente a otros métodos analíticos. De esa manera, una información básica para establecimiento tanto de la toxicidad como de las posibilidades de reuso y disposición de material particulado generado por los procesos de quema de biomasa para la producción de energía, se puede obtener a través de MEB/EDS.

#### b) Monitoreo Continuo en Chimeneas

El monitoreo continuo en chimeneas se puede hacer a través de sistemas llamados “CEMS” – Continuous Emissions Monitoring System.

En la mayoría de los casos son varios los contaminantes que se miden a la vez, lo que requiere la instalación de un sistema capaz de medir en forma continua y con resultados de análisis instantáneos. Éstos reciben el nombre genérico de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones, SMCE, con diversidad de equipos, principios de operación, variabilidad de procesos que requieren ser medidos.

Entre las características o exigencias para la selección del sistema in situ se debe considerar lo siguiente:

- Deben soportar tanto las condiciones ambientales, como la intemperie y los gases corrosivos y vibraciones;
- Deben ser capaces de medir con exactitud los gases, bajo las condiciones extremas existentes en las chimeneas;
- Su mantenimiento debe poder realizarse a la intemperie;
- Deben permitir la calibración durante la operación de la fuente, en el punto de medición, mediante la inyección de gas patrón en la cavidad de la sonda y desplazando el gas de la chimenea;
- Deben permitir además la calibración de cero durante la operación de la fuente;
- Se deben realizar calibraciones o verificaciones de la calibración diariamente;
- En el caso de no poder realizar la calibración de los SMCE in situ de trayectoria, durante la operación normal del proceso y debido al requerimiento de calibración a

cada 24 horas de los instrumentos de dos pasos deben incluir un espejo cero y una celda de gas en el transceptor. Esto representa una solución aceptable pero no ideal.

- La sonda debe ser colocada en un punto donde las concentraciones a ser muestreadas sean representativas de las emisiones de chimenea.

A diferencia de los sistemas de muestreo, los monitores fijos emplean tecnologías láser y de LED para lograr la medición continuada de material particulado en el flujo de la chimenea. Un haz de luz (láser o LED) es enviado desde un emisor hacia un receptor, ubicado en el extremo opuesto de la chimenea. Conociendo la intensidad de luz del emisor y la que es absorbida por el receptor, se obtiene una diferencia de intensidad, la que es directamente proporcional a la concentración de material particulado que atraviesa dicho haz de luz.

#### 1.5.2 - Otras Fuentes de Generación de Emisiones de Material Particulado

Las fuentes de generación de emisiones de material particulado en las empresas de generación de energía a través de la quema de biomasa, no se producen solamente por la combustión de las materias primas, a través de chimeneas. Las actividades, procesos, operaciones, manejo y disposición de materias primas y residuos sólidos también poseen potencialidad de generación de material particulado hacia la atmósfera en acuerdo con lo que sigue:

- Emisiones a través del transporte interno de materias primas para alimentación de los procesos de quema, que se producen a través de cintas transportadoras, de tornillos conductores y de máquinas utilizadas internamente para transporte de materias primas; las emisiones se producen por el movimiento y por la acción del viento sobre los materiales;
- Emisiones a través de la descarga de materias primas en las plantas industriales, que se producen a través del movimiento de los camiones sobre el suelo y sobre materias primas sobre el suelo y también a través de la acción del viento durante la descarga;
- Emisiones de actividades de mezcla de materias primas depositadas en las plantas industriales, que se producen principalmente para reducción de la humedad de los materiales;

- Emisiones de la descarga y depósito de materiales atrapados a través de los sistemas de abatimiento, una vez que, de manera general, la descarga de los materiales atrapados se produce en contenedores que están expuestos a la acción del viento, así como la propia descarga;
- Emisiones del transporte de las cenizas de fondo, que de manera general también se depositan en contenedores expuestos a la acción del viento;
- Emisiones de Vehículos y Máquinas utilizados para transporte de materias primas y otras actividades desarrolladas en las áreas industriales, que generan material particulado a través de la combustión;
- Emisiones generadas en los depósitos de materias primas, una vez que, de manera general, están a cielo abierto y así expuestos a la acción del viento.

Las emisiones de material particulado generadas por fuentes que no sean chimeneas, emisiones difusas o emisiones fugitivas, solamente se podrán muestrear a través de equipamientos como los muestreadores de gran volumen – Hi-Vol (para material particulado total) y PM 10 (para material particulado inhalable). En Uruguay hay equipos Hi-Vol pertenecientes a la División Nacional de Medio Ambiente, algunos pertenecientes a algunas empresas particulares, y algunos pertenecientes a proveedores de servicios en calidad del aire.

### 1.5.3 - Otras Emisiones

Además de la posibilidad de generación de emisiones de material particulado a través de los procesos de la quema de biomasa, las posibilidades de generación de material particulado a través de actividades, operaciones, procesos y manejo de las materias primas en las plantas, se debe considerar la potencialidad de emisiones de otros gases.

#### a) – Metano

La potencialidad de generación de metano en las plantas de producción de energía a través de la quema de biomasa se refiere a la fermentación de las materias primas, que se presentan almacenadas en grandes volúmenes y principalmente a cielo abierto. Se debe tener en cuenta que, mismo en el almacenamiento de materias primas en ambientes con protección (techos, galpones, etc.), el contenido de humedad del material puede conducir a la fermentación.

Además, las empresas generadoras de energía a través de la quema de biomasa de manera general tienen materias primas depositadas sin control de las condiciones de almacenamiento, así, esos materiales absorben humedad del ambiente, lo que conlleva a procesos que generan humo producido por auto ignición.

En general, las empresas realizan operaciones con máquinas y herramientas para hacer un revuelto en las materias primas para la disminución y uniformización de la humedad de los materiales. Asimismo, teniendo en cuenta los volúmenes almacenados a cielo abierto, el humedecimiento por la exposición a los agentes naturales (lluvia, humedad relativa y rocío), esas operaciones no son suficientes para detener la fermentación. En algunos casos se puede también constatar la existencia de la fermentación por los olores generados.

Los galpones para almacenamiento de materia prima que pocas empresas poseen, de una manera general no son suficientes para el volumen de materia prima en depósito y de cualquier manera, por la humedad de los materiales y por su propia higroscopicidad, hay en ellos fermentación y generación de humos. Así, se presenta también la potencialidad de generación de metano.

Existe también la posibilidad de generación de metano por los lixiviados generados en los acopios de biomasa.

El muestreo del metano en el aire ambiente todavía no está en ninguna normativa internacional. Lo usual es la toma de muestras general que se puede hacer para gases, con el uso, por ejemplo, de “bolsas de muestreo” (sample bags) o de canisters de acero inoxidable (botellas). Para las bolsas de muestreo se pueden usar jeringas con capacidad de 1,0 litros. Los canisters SUMMA, se utilizan a través de su preparación con vacío. La toma de muestra es por la apertura de una válvula existente en ese contenedor. No se tiene conocimiento de la existencia de canisters o de las jeringas citadas anteriormente en Uruguay. Las muestras se conducen en general, a un cromatógrafo gaseoso, que deberá tener las características para análisis de CH<sub>4</sub>, y debidamente calibrado con el gas estándar (CH<sub>4</sub>), para el análisis. Existen equipos portátiles para detección de metano en el aire, como por ejemplo el “LGR’s Ultraportable Methane Analyser (UMA)”.

## b) - Compuestos Orgánicos Volátiles no Metánicos (NMCOVs)

El secado y los depósitos de materias primas para procesamiento, se presentan en las plantas industriales como los principales responsables de potenciales emisiones de NMCOVs.

Los depósitos de materias primas a “cielo abierto”, que se presentan en grandes volúmenes y de dimensiones considerables, por cierto tendrán potencialidad de generar emisiones de los gases característicos de la fermentación, además de aquellas características del auto ignición.

El secado de materias primas, que a su vez se procesa en plantas de quema de biomasa para generación de energía, puede generar emisiones de gases en acuerdo con la composición química característica de la biomasa en secado. La exposición de las materias primas a temperaturas que conduzcan a la reducción de su humedad genera la evaporación del agua y la volatilización de compuestos que componen los materiales en proceso de secado.

Estudios e investigaciones presentan informaciones que, durante el secado de madera, se pueden tener emisiones de monoterpenos, como presentan Demers y Teschke. Muchas de las emisiones del secado de madera se procesan como vapores, en aerosoles o en las superficies del material particulado. Los compuestos orgánicos volátiles al salir del secador se enfrían en el ambiente y pueden formar pequeñas gotas llamadas “sub micrón aerosoles”, y si no hay condensación se pueden ver los aerosoles como una niebla azul.

En acuerdo con Granström (2006), las altas temperaturas de secado, la degradación térmica de la madera puede generar ácido fórmico, ácido acético, alcoholes, aldehídos, furfurales y dióxido de carbono.

Entre los métodos utilizados para tratamiento de efluentes de plantas industriales, también existe potencialidad de generación de emisiones atmosféricas y se agrega a esa potencialidad algunos tratamientos de residuos sólidos. De esa manera, una evaluación de los tratamientos existentes en las plantas puede conducir a la determinación de contaminantes atmosféricos potencialmente generados por ellos.

### 1.6 – Tecnologías y Equipamientos de Mitigación de Emisiones Particuladas y Gaseosas en Plantas de Generación de Energía a través de Biomasa en otros Países y en Uruguay

En cuanto a las tecnologías existentes para la mitigación de las emisiones en plantas de generación de energía a través de la quema de biomasa, se puede tener en cuenta, en un primero momento, aquellas empleadas en una de las plantas que generan energía en Brasil a través de esa materia prima y de varias plantas de las existentes en Uruguay, que se compone por un sistema básico compuesto por precalentador de aire y multiciclones.

Se utiliza un precalentador de aire, que al mismo tiempo es un separador inercial de las cenizas de mayor granulometría. Este equipo, desde su mejor performance, conduce a mejor desempeño y estabilidad operacional, además de un incremento en la vida útil de los demás equipamientos de abatimiento de material particulado que componen el sistema de abatimiento (atrapa la mayor parte de la ceniza presente en los gases de combustión, un promedio del 50%).

La mantención correcta y periódica de este equipamiento, la detección y corrección de sus pérdidas es fundamental para la reducción de la emisión de material particulado hacia la atmosfera.

Los multiciclones, que son responsables por la separación del 40% de las cenizas que pasan por el precalentador, conducen a una mayor durabilidad de los filtros de manga, cuando estos componen el sistema. La mantención de los multiciclones y su operación sin pérdidas y agujeros incrementan la vida útil de los filtros de manga y disminuyen las emisiones de material particulado.

El abatimiento final se hace, teniendo en cuenta la empresa generadora en Brasil como ejemplo, por el filtro de mangas, con un total de 864 mangas (imagen 01).



Imagen 01 – conjunto de filtros de mangas en una generadora de energía a través de quema de biomasa en Brasil



Imagen 02 – Tubería de un multiciclón en uso.



Imagen 03 – Mantenimiento de filtros de manga.

#### 1.6.1 – Equipamientos para Abatimiento / Mitigación de Emisiones Atmosféricas

Las emisiones de contaminantes atmosféricos en un primer momento deberán ser tratadas con la finalidad de reducción de su generación. Los procedimientos de estudios sobre las materias primas y su composición, de los procesos y de los productos podrán permitir cambios que conlleven a reducir contaminantes atmosféricos generados. La reducción de generación de emisiones se produce a través de operaciones, materiales y procesos adecuados. Para la combustión, de manera general, las condiciones de quema perfecta son base de reducción de generación de emisiones.

Los equipamientos para abatimiento de emisiones se restringen a reducir el lanzamiento de contaminantes para la atmósfera principalmente a través de ductos y chimeneas. Se proceden en los equipos para abatimiento de emisiones, procesos físicos y químicos para su captación y de esa manera se reduce su lanzamiento a la atmósfera. Nunca se puede olvidar que los contaminantes atmosféricos deberán ser adecuadamente tratados y/o reutilizados después de su abatimiento, de manera de no impactar otros medios, como el agua y el suelo. Las emisiones atmosféricas antropogénicas a través de actividades industriales se pueden generar a través de ductos o chimeneas y también de manera fugitiva.

Los sistemas de captación de material particulado contienen las siguientes partes:

- Dispositivo de captación (captor);
- Red de colectores (tubería);
- Aspirador de potencia necesaria (ventilador);
- Sistema de evacuación de las partículas residuales (equipamiento de control de las emisiones atmosféricas).

El logro de alta eficiencia en el abatimiento de emisiones atmosféricas esta en acuerdo con una serie de principios a adoptarse, entre los cuales, los más importantes son:

- El dispositivo de aspiración debe estar lo mas próximo posible de la fuente emisora debido al fenómeno de la disminución de la velocidad de aspiración con el área de la sección;
- Involucrar, de manera máxima posible, la zona de generación de partículas sólidas, y si es posible poner la fuente en un recinto hermético directamente unido con el circuito de aspiración, lo que lleva a una frágil depresión y asegurará una protección de la zona de emisión en contra la corriente de aire generada por la aspiración.

El diseño de la instalación de captación es un factor de gran importancia para resolver correctamente el problema de la eliminación de las partículas. Un sistema sobre-dimensionado puede conducir a costos elevados, y el dimensionamiento debajo de las necesidades llevará a una emisión de partículas en suspensión sobre los límites o por arriba de lo esperado.

## a) Colectores Secos

Los equipamientos que proceden a la captura de material particulado seco, permiten el uso del material atrapado sin generar efluentes líquidos. Algunos de ellos se destinan a la captación de las partículas más gruesas, y se puede tenerlos como mitigadores iniciales para una posterior captación complementaria por otros equipamientos. Algunas veces, llevan a una mayor eficiencia y disminución de la necesidad de mantenimiento de los equipamientos que complementan la captación del material particulado.

Se debe tener en cuenta, que algunos contaminantes atmosféricos pueden estar adsorbidos en el material particulado, y de esa manera se estaría también captando esos contaminantes.

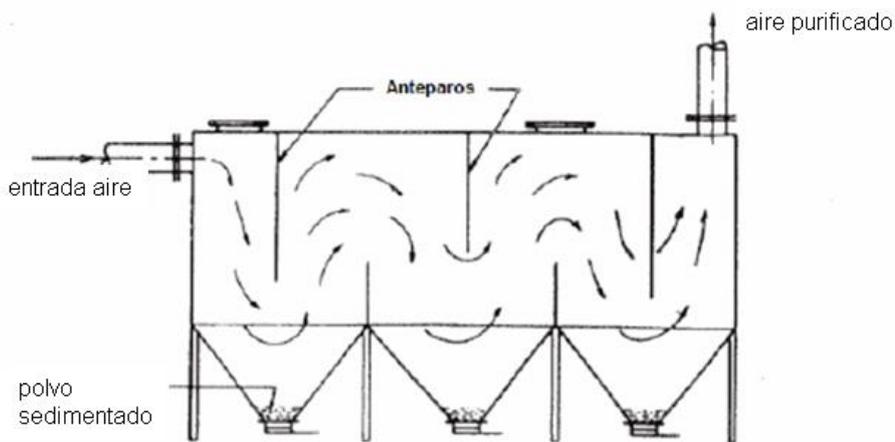
Los colectores de material particulado se clasifican en:

- Colectores mecánicos inerciales y gravitacionales;
- Colectores mecánicos centrífugos (Ej.: ciclones);
- Precipitadores dinámicos secos;
- Filtros de tela (Ej.: filtro-manga);
- Precipitador electrostático seco.

Se presentan a seguir, los principales colectores de material particulado con algunas consideraciones sobre ellos:

### - *Cámara de Sedimentación Gravitacional*

El mecanismo de captación es la fuerza de gravedad. En general son de grandes dimensiones, por lo que la velocidad de la corriente gaseosa disminuye, de manera que las partículas que se encuentran en suspensión tengan tiempo suficiente para depositarse. Presenta poca importancia en términos de contaminación del aire por su baja eficiencia para partículas menores que 40  $\mu\text{m}$ . Su uso más común es como colector previo para sacar el particulado grueso disminuyendo la sobrecarga del equipamiento de control final. Además, ocupa grandes espacios. Se presenta el esquema de una cámara de sedimentación gravitacional en la imagen 04.



**Imagen 04.** Esquema de funcionamiento de la cámara de sedimentación.

Las ventajas de la cámara de sedimentación es su simple construcción, baja pérdida de carga (aproximadamente 10 mm de columna de agua), reducido costo operacional y colecta a seco del material particulado. La velocidad del gas en la cámara en general es limitada al máximo 3 m/s para evitar la reentrada de las partículas colectadas en el caudal gaseoso. En general se encuentra en el rango de 0,5 a 1,5 m/s.

El uso de colectores previos resulta en una mejora de la performance y aumento de la vida útil de los equipamientos de colecta final (filtros de tela, precipitadores electrostáticos y lavadores), los cuales tienen un costo más elevado.

Presentan pocos problemas de mantenimiento si son proyectadas, instaladas y operadas adecuadamente. Los problemas usuales son la corrosión externa e interna, la formación de depósitos internos, principalmente por materiales higroscópicos. El control de la temperatura del gas, de manera que esté siempre arriba del punto de rocío, reducirá los problemas anteriores, excepto la corrosión externa, que dependerá del uso de camada protectora adecuada.

#### - *Ciclones*

Los ciclones utilizan primariamente la fuerza centrífuga para la captación de partículas. La entrada puede ser tangencial o radial. Se componen por un cuerpo cónico cilíndrico, en el cual entran los gases a depurar a través de una apertura en la parte superior del equipamiento. Las partículas son sometidas a la fuerza centrífuga al final de cierto número de vueltas, se chocan con la pared del equipamiento y se



partículas de diámetro inferior a  $15\mu\text{m}$  y muy poco útil a partículas con menos de 3 micrómetros (CETESB, 1990). La caída de presión en los ciclones de entrada tangencial se puede estimar por el método de Shepherd -Läpple, con la modificación de Briggs a la carga de material en partículas.

Los ciclones también se pueden dividir en dos grupos:

- Normales;
- de Alta eficiencia.

Los de alta eficiencia son de diámetro pequeño (menos de 25 cm), y tienen una mayor capacidad de separación. Un tipo de ciclón ampliamente utilizado en la práctica son los multiciclones o múltiples clones, que se constituyen por un grupo de pequeños ciclones, del orden de 25 cm de diámetro, funcionando en paralelo y con entrada radial.

Los multiciclones presentan las siguientes ventajas en relación a los ciclones convencionales:

- presentan menor pérdida de carga para eficiencias equivalentes;
- mayor eficiencia;
- menor costo;
- ocupan menos espacio (si se compara a los varios ciclones necesarios para lograr la misma eficiencia);
- más resistente a la erosión.

Los multiciclones presentan alta eficiencia y excelente calidad de separación, debido a pequeños diámetros, pérdida de carga aceptable, obtenida por componerse de un elevado número de unidades. El problema general que presentan es taparse con frecuencia. La eficiencia de un ciclón aumenta con el diámetro y la densidad de la partícula; la velocidad de los gases; longitud del cono y diámetro de salida; disminuye en función del aumento de la viscosidad del gas y el diámetro del cuerpo del ciclón.

En general se usan esos equipamientos como colectores previos de partículas medianas a grandes ( $> 10 \mu\text{m}$ ).

Entre las ventajas de los ciclones, se destacan su fácil operación, y no haber límites de temperatura y presión, pero hay que recordar que ellos eliminan chispas que pueden incendiar materiales, como telas de filtros de manga que estén incluso en el sistema de abatimiento utilizado.

Presentan la posibilidad de taparse cuando los materiales a eliminar son adhesivos o higroscópicos, además de posibilidad de abrasión por determinados tipos de materiales y determinadas velocidades.

#### *- Filtros de Tela*

Los filtros de tela son los sistemas más utilizados para el filtrado. El principio de funcionamiento de un filtro de tela es simple. Es el paso de la mezcla gaseosa que contiene partículas a través de una tela, el gas penetra la tela y las partículas son retenidas. Hay que cuidar de evitar una capa muy gruesa que podrá dificultar el paso de gas (aumento de la pérdida de presión). El comienzo del proceso de filtrado es la colisión de las partículas contra las fibras del medio del filtro y su posterior adhesión a la misma. A medida que el proceso continúa, la capa de partículas recogidas aumenta y se convierte en el medio de filtrado. En algún momento, se hace necesario eliminar las partículas recogidas con el fin de prevenir la reducción de la eficiencia del proceso.

Los mecanismos implicados en la captación de partículas en los filtros de tela son principalmente el impacto inercial, la difusión, la atracción electrostática y la fuerza gravitacional y en segundo lugar, la interceptación. El filtro de tela es un dispositivo de la categoría de alta eficiencia de recolección, y en algunos casos, más del 99,9% de eficiencia.

Los filtros de manga se clasifican en acuerdo con el mecanismo de limpieza:

- Sacudimiento mecánico: en este método, se remueve el polvo por agitación mecánica, horizontal o vertical, con poco éxito cuando el material particulado se compone por partículas adherentes;
- Aire reverso: las partículas se desprenden de la tela a través de la inversión en el sentido del flujo de aire;
- Chorro pulsante de aire comprimido: es el sistema más utilizado y se compone de un tubo Venturi acoplado a la parte superior de cada manga generando un chorro de aire que se desplaza por toda la extensión de la manga, llevando a su expansión y desprendimiento de la camada adherida a la tela. En general, el aire llega por la parte interna. Las telas tienen un soporte metálico.

Los filtros de manga son generalmente dispuestos en conjuntos para obtener el área necesaria para el filtrado.



**Imagen 06.** Filtro de manga.

Los filtros de manga se pueden usar como captadores finales de partículas de todos los tamaños, una vez que se puede elegir la malla y el material de la tela, en acuerdo con el material particulado a ser atrapado. Proporcionan alta eficiencia de captación (99,9%), tienen poca sensibilidad a fluctuaciones en el caudal, permiten fácil recuperación del material atrapado, sin problemas de generación de efluentes líquidos, son de fácil operación y mantenimiento.

Hay restricciones a la temperatura en acuerdo con el material de la manga, y no se puede utilizar en condiciones de alta humedad por formación de costras o pastas que impiden la remoción.

La pérdida de carga en los filtros de manga es el sumatorio de la pérdida de carga de los filtros limpios (después de ciclo de limpieza), añadida a la resistencia impuesta por la camada de material particulado depositada en el filtro, que cambia en acuerdo con el material captado. En general el rango de pérdida de carga es de 10 cm H<sub>2</sub>O a 20 cm H<sub>2</sub>O.

#### - *Precipitadores Electrostáticos (PES)*

Desde hace muchos años, los precipitadores electrostáticos se presentan como un medio efectivo para el control de las emisiones atmosféricas en material

particulado. Su basis fue en 1824, cuando Hohlfeld consiguió limpiar el aire contenido de un cilindro poniendo un punto electrificado en su interior.

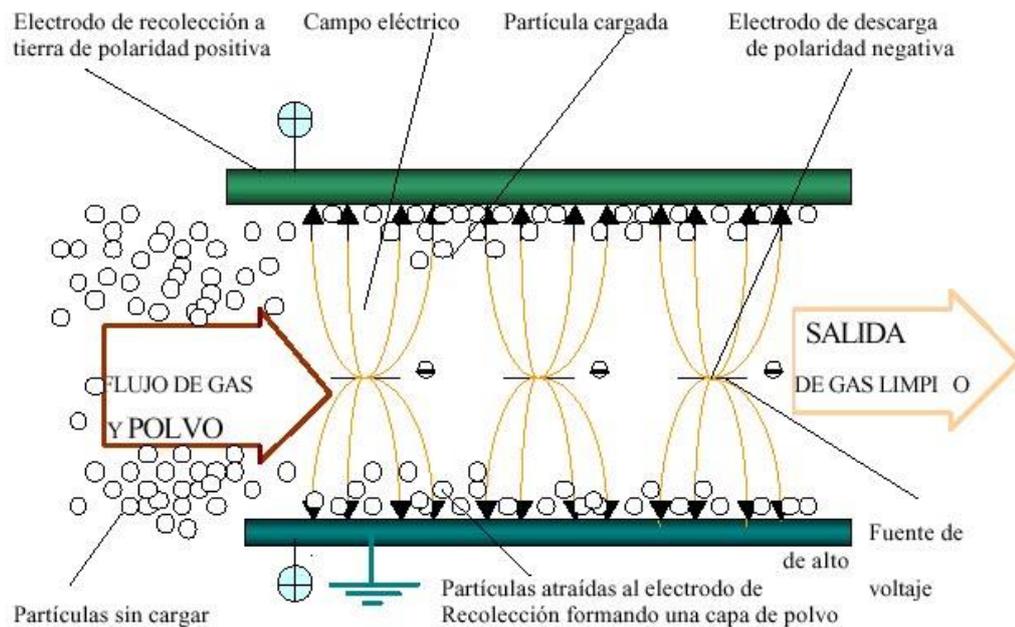
Un precipitador electrostático (PES), imagen 07, es un dispositivo de control de partículas que utiliza fuerzas eléctricas para mover las partículas fuera de la corriente de gas y sobre las placas del colector. A las partículas se les da una carga eléctrica forzándolas a que pasen a través de la corona, una región en la cual fluyen iones gaseosos. El campo eléctrico que fuerza a las partículas cargadas hacia las paredes, proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo.

Una vez que las partículas son recolectadas sobre las placas, deben ser removidas sin que se re-encaucen en la corriente de gas. Esto se logra usualmente desprendiéndolas de las placas, permitiendo que la capa de partículas recolectada se deslice hacia una tolva desde la cual son evacuadas. Algunos precipitadores remueven las partículas con lavados con agua, intermitentes o continuos.

Las consideraciones prácticas para pasar alto voltaje hacia el espacio entre las líneas de flujo y permitir algún claro sobre las tolvas para soportar y alinear los electrodos, deja lugar a que parte del gas fluya alrededor de las zonas cargadas. A esto se le llama “escabullirse” y equivale del 5 al 10 % del flujo total. Usualmente se colocan deflectores anti-escabullimiento para forzar al flujo que se escabulle a que se mezcle con la corriente principal del gas para ser recolectada en secciones posteriores. Pero, de nuevo, el flujo que se escabulle alrededor de la última sección no tiene oportunidad de ser recolectado.

Las pérdidas carga juegan un papel importante en el funcionamiento global de un PES. Otro factor importante es la resistividad del material recolectado. Debido a que las partículas forman una capa continua sobre las placas del PES, toda la corriente de los iones debe pasar a través de la capa para alcanzar las placas a tierra. Esta corriente crea un campo eléctrico en la capa y puede llegar a ser lo suficientemente grande para causar un rompimiento eléctrico local. Cuando esto ocurre, nuevos iones de la polaridad contraria son inyectados dentro del claro placa-alambre, donde reducen la carga de las partículas y pueden causar chispas. Esta condición de rompimiento lleva a un efecto llamado “corona invertida”.

En la imagen siguiente se presenta un esquema de funcionamiento de un precipitador electrostático.



**Imagen 07 – Esquema de funcionamiento de un precipitador electrostático.**

El efecto corona invertida prevalece cuando la resistividad de la capa es alta, usualmente sobre  $2 \times 10^{11}$  ohm-cm. Para resistividades menores, la operación del PES no se afecta por coronas invertidas, pero las resistividades mucho mayores a  $2 \times 10^{11}$  ohm-cm reducen considerablemente la capacidad de recolección de la unidad, porque la corona invertida severa causa dificultades para cargar las partículas. A resistividades por debajo de  $10^8$  ohm-cm, las partículas se mantienen en las placas de modo tan suelto, que el re-encauzamiento por golpeteo y sin golpeteo se vuelve más severo. Debe tenerse cuidado al medir o estimar la resistividad porque es afectada fuertemente por variables tales como la temperatura, la humedad, la composición del gas, la composición de partícula y las características de la superficie.

Los precipitadores electrostáticos se clasifican de la siguiente manera:

- Voltaje
  - bajo: menor o igual a 30Kv;
  - alto: mayor que 30 Kv.
- Polaridad del electrodo de descarga:
  - corona positiva;
  - corona negativa.
- Número de etapas:

- simple: carga y deposición simultáneos:
- doble: con carga en una primera etapa y deposición en etapa posterior
  
- Geometría del electrodo de colecta:
  - tubulares
  - placas.

Los precipitadores se pueden también clasificar en secos y húmedos, dependiendo del uso o no en ellos, de líquidos para lavado. Los de bajo voltaje, con corona positiva y doble etapa, en general no se emplean en industrias y son de pequeño porte, como aquellos utilizados en conjunto con sistemas de aire acondicionado.

La carga de las partículas es a través de dos procesos: para partículas mayores que 0,5  $\mu\text{m}$  en diámetro, la carga es por el campo eléctrico; para partículas de diámetro menor que 0,2  $\mu\text{m}$  predomina el cargamento por difusión iónica; para partículas con diámetro entre 0,2  $\mu\text{m}$  y 0,5  $\mu\text{m}$  se tiene los dos mecanismos.

La eficiencia de los PES puede ser de más del 99,9%, y teóricamente no hay límite inferior de tamaño de partículas que puedan ser atrapadas. Presentan baja pérdida de carga (al máximo 1,25 cm  $\text{H}_2\text{O}$ ), se componen por pocas partes móviles, pueden captar materiales secos y operan hasta unos 650° C.

El costo inicial es alto, necesita de espacio para su instalación, tienen riesgos de explosión (cuando las emisiones a tratar se componen por gases o partículas combustibles), no sirve para materiales con resistividad muy alta o muy baja y no se adecuan para grandes variaciones de condiciones de generación de gases.

Se puede proceder a la captación de materiales para reuso, cuando todo el proceso es seco.

#### b) Colectores húmedos (también denominados scrubbers)

Son dispositivos de control que dependen del contacto directo e indirecto de un líquido (gotas, espuma o burbujas) con la materia en partículas (MP). El líquido con la MP captada se recoge fácilmente. Los limpiadores o depuradores en húmedo son clasificados generalmente por el método que se usa para inducir el contacto entre el líquido y la MP, ej. aspersión, el lecho empacado y las placas. Los limpiadores también son descritos con frecuencia como bajos, medianos o altos en energía, en

donde la energía se expresa frecuentemente como la caída de presión a través del limpiador.

Poseen ventajas importantes en comparación con otros dispositivos para la recolección de MP. Pueden recolectar polvos inflamables y explosivos de manera segura, absorber contaminantes peligrosos y recolectar neblinas. También pueden enfriar corrientes de gas caliente. Algunas desventajas asociadas con los limpiadores en húmedo es que tienen el potencial de ser dañados por la corrosión y el congelamiento. El uso de los limpiadores en húmedo puede conducir a problemas de contaminación por aguas y sólidos residuales. Estas desventajas pueden ser minimizadas o evitadas con un buen diseño de los limpiadores y el tratamiento de los vertidos líquidos y los residuos sólidos generados en la remoción de contaminantes.

El diseño más común de un limpiador consiste en la introducción de gotas líquidas dentro de una cámara de aspersión, en donde el líquido es mezclado con la corriente de gas para promover el contacto con la MP.

La recolección mediante un limpiador también puede ser realizada forzando el gas a altas velocidades a través de un líquido para formar corrientes de propulsión a chorro. Los líquidos también son utilizados para sobresaturar la corriente de gas, dando lugar a la limpieza de partículas por medio de condensación.

Se presentan a seguir, algunos equipamientos de esta categoría:

- Torre de “spray” (pulverizadores) / cámaras de aspersión;

Las cámaras de aspersión son limpiadores en húmedo muy sencillos y de baja energía. La corriente de gas cargada de partículas es introducida dentro de una cámara en donde se pone en contacto con gotas de líquido generadas por boquillas de aspersión. Los limpiadores también son conocidos como limpiadores de aspersión preformados, puesto que el líquido es formado en gotas previo al contacto con la corriente de gas. El tamaño de las gotas generadas por las boquillas de aspersión se controla para maximizar el contacto entre el líquido y la partícula y, en consecuencia, la eficiencia de recolección del limpiador.

Los tipos más comunes de cámaras de aspersión son torres de aspersión y cámaras ciclónicas. Las torres de aspersión son cámaras cilíndricas o rectangulares que pueden ser instaladas vertical u horizontalmente. En las torres de aspersión

verticales, la corriente de gas fluye hacia arriba a través de la cámara y se encuentra con varios grupos de boquillas de aspersión produciendo gotas de líquido.

Un de-vaporizador en la parte superior de la torre de aspersión elimina las gotas de líquido y la MP humedecida de la corriente de gas de escape. El líquido limpiador y la MP humedecida también se drenan del fondo de la torre en forma de pasta aguada. Las cámaras de aspersión horizontales operan de la misma manera, excepto por el hecho de que el gas fluye horizontalmente a través del dispositivo.

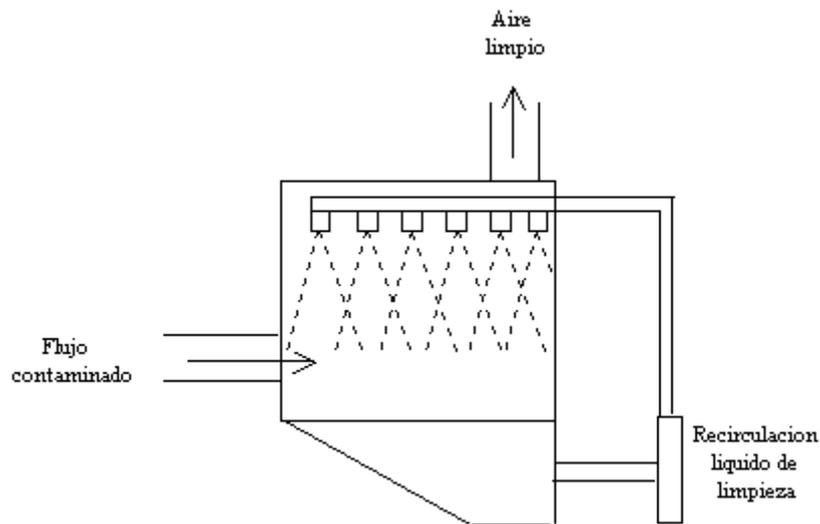


Imagen 08 – Cámara de Aspersión

#### - Lavadores con Lecho Embalado / con Lecho Relleno

Los lavadores con lecho empacado consisten en una cámara que contiene capas de material de empaque de diversas formas, tales como los anillos de Raschig (son piezas de geometría tubular cuyo diámetro es aproximadamente igual a su longitud y que se emplean como relleno para columnas en procesos de destilación y en otros procesos químicos; generalmente se fabrican con material cerámico o metálico y poseen una elevada superficie específica, lo que facilita la interacción entre una fase líquida estacionaria y una fase móvil gaseosa), anillos de espiral, y las sillas de Berl (imagen 09), que proporcionan una gran superficie para el contacto entre el líquido y las partículas.

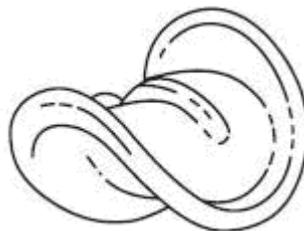


Imagen 09 – Silla de Berl

El empaque se contiene mediante retenes de rejilla de alambre y es sostenido por una placa cerca del fondo del limpiador. El líquido limpiador es introducido de manera uniforme sobre el empaque y fluye hacia abajo a través del lecho. El líquido lo recubre y forma una película delgada. En los diseños verticales, la corriente de gas fluye hacia arriba de la cámara (en contra-corriente al líquido). Algunos lechos empacados están diseñados horizontalmente para el flujo de gas a través del lecho (a corriente transversal).

La corriente de gas es obligada a seguir una trayectoria de circuito a través del embalaje, sobre el cual impacta una gran parte de la MP. El líquido sobre el embalaje recolecta la MP y fluye hacia abajo de la cámara, hacia el tubo de drenaje al fondo de la torre. Un eliminador de neblina (también llamado un “de-vaporizador”) se posiciona típicamente por encima/después del embalaje y el almacén de líquido limpiador. Cualquier líquido limpiador y MP humedecida encauzados en la corriente de gas tratado serán removidos por el eliminador de neblina y devueltos para vaciarse a través del lecho embalado.

#### - Lavadores Venturi

Los limpiadores tipo Venturi, o de aerosol atomizado por gas, aceleran la corriente de gas para atomizar el líquido absorbedor y mejorar el contacto entre el gas y el líquido. Incorporan una sección de garganta dentro del conducto, que fuerza la corriente del gas a acelerarse a medida que el conducto se estrecha y después se expande. A medida que el gas entra a la garganta tipo Venturi, tanto la velocidad del gas como la turbulencia aumentan. El líquido limpiador es rociado dentro de la corriente de gas antes de que el gas alcance la garganta de Venturi. Después el líquido limpiador es atomizado en pequeñas gotitas por la turbulencia en la garganta y la interacción entre gotas y partículas aumenta. La MP humedecida y las gotas de líquido en exceso son separadas de la corriente de gas por un movimiento ciclónico

y/o un eliminador de neblina. Los limpiadores tipo Venturi tienen la ventaja de ser sencillos en su diseño, fáciles de instalar y con requisitos bajos de mantenimiento.

El rendimiento de limpiadores tipo Venturi depende hasta cierto grado de la velocidad del gas a través de la garganta. Varios limpiadores tipo Venturi han sido diseñados para permitir el control de la velocidad variando el ancho de la garganta tipo Venturi.

Debido a la alta interacción entre la MP y las gotas, los limpiadores tipo Venturi son capaces de altas eficiencias de recolección para la MP pequeña.

Aumentar la eficiencia de un lavador tipo Venturi requiere aumentar la caída de presión la cual, a su vez, aumenta el consumo de energía.

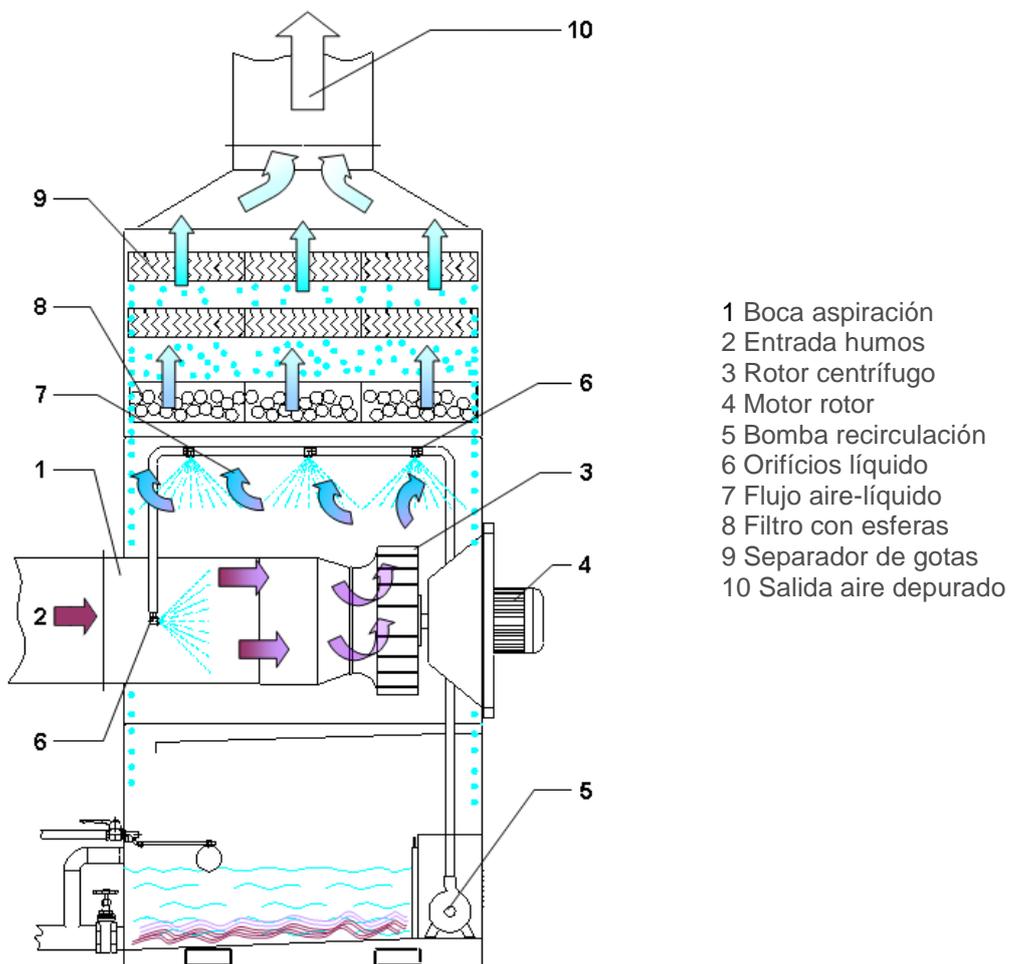


Imagen 10 – Ejemplo de Lavador de gas

### 1.6.2 – Abatimiento de Emisiones Atmosféricas en Uruguay

Las tecnologías que se utilizan en las plantas de generación de energía eléctrica a través de quema de biomasa en Uruguay, para el abatimiento de las emisiones al

aire por chimeneas, están en acuerdo con aquellas disponibles y adoptadas en el mundo, para abatimiento de los contaminantes atmosféricos característicos de esa actividad, que en realidad son los mismos de otros tantos procesos industriales y de generación de calor y energía.

Los equipamientos utilizados en otros países están adentro de aquellos presentados en “1.6.1”, y en ellos, los que usan las empresas involucradas en la producción de energía a través de la quema de biomasa en Uruguay.

En acuerdo con Fundación CONFEMETAL (2002), la eficiencia de los filtros de manga puede acercarse a los 100% y la de los filtros electrostáticos a 99 %.

La evaluación de la eficiencia de los equipamientos de abatimiento de emisiones atmosféricas (Lisboa e Schirmer, 2007), de manera general se puede obtener a través de:

$$E (\%) = \frac{100 (A - B)}{A}$$

E = eficiencia

A = carga de entrada

B = carga de salida

En las visitas realizadas a las empresas, se solicitó a cada una de ellas las informaciones de la eficiencia teórica de los equipos utilizados en sus sistemas de abatimiento de emisiones atmosféricas. Esa información, una vez que no estaba disponible en el momento de la visita, sería enviada a PROBIO, para que se pudiera presentar en este informe, un reporte sobre la adecuación de los sistemas de abatimiento de las empresas en términos de los estándares de emisiones aplicados a su operación por el órgano regulador. Las empresas que enviaron informaciones, menos del 50 % de las empresas visitadas, no las presentaron de manera que se pudiera reconocer la información solicitada de la *eficiencia teórica de los equipamientos de abatimiento*. Se hicieron nuevos contactos con las empresas para solicitud de las referidas informaciones, pero hasta el momento de finalización de la consultoría y de elaboración de este informe, no se obtuvo lo solicitado.

De esa manera, no se puede evaluar de manera concreta la necesidad o no de incrementos en los sistemas de abatimiento utilizados, que una vez operados e instalados en acuerdo con las finalidades de su fabricación, recomendaciones técnicas de operación y mantenimiento adecuado, cumplirían con la captación de

material particulado de manera a conllevar con los estándares practicados para emisiones de material particulado, desde que también fueran dimensionados en acuerdo con las condiciones de los procesos industriales. Además, casi todas las empresas, durante las visitas que se hicieron, no estaban en régimen de procesamiento, de esa manera, algún análisis visual que se pudiera hacer, no fue posible.

De cualquier manera, la eficiencia teórica de los equipamientos de abatimiento de las empresas involucradas conduciría a una información básica, una vez que el tiempo de uso de los equipamientos de abatimiento lleva a la reducción de la eficiencia lo que se puede disminuir con su adecuado mantenimiento.

La evaluación de la eficiencia de los sistemas de abatimiento para que la captación de emisiones conduzca las empresas a estar en acuerdo con los estándares de emisiones a ellas aplicados requiere determinar la eficiencia real de remoción de MP, para lo cual es necesario hacer mediciones de las emisiones de las chimeneas, y realizar un balance de Material Particulado con base en el Material Particulado captado y/o el MP que ingresa al sistema de mitigación, en acuerdo con la Eq. 01.

Para que se pueda evaluar la eficiencia de los sistemas de abatimiento de las empresas y su adecuación a los estándares de emisiones, hay que considerar:

- la necesidad de adaptación de las chimeneas a las condiciones necesarias a los procedimientos de muestreo, adentro de las normativas para esa finalidad, en acuerdo con lo que se presenta en el Anexo I;
- la presentación de resultados de muestreo de emisiones en chimenea en acuerdo con las normativas vigentes;
- presentación de la eficiencia teórica de abatimiento de cada uno de los sistemas de abatimiento que las empresas utilizan en sus plantas, lo que se pidió y no se obtuvo;
- proceder la operación adecuada de los equipos de abatimiento, en acuerdo con los manuales de los fabricantes;
- proceder el mantenimiento adecuado y a un plan de mantenimiento de los equipos de abatimiento, incluyendo comprobación de stock de repuestos y materiales necesarios, cuyas informaciones deberán presentarse periódicamente al órgano regulador (plan de mantenimiento presentado en “III / 3.1”);

- la eficiencia teórica de los sistemas de abatimiento no conduce a resultados reales, una vez que se la obtiene cuando la operación y el mantenimiento son totalmente cumplidos y adecuados;
- cuando no hay un mantenimiento adecuado de los equipos de abatimiento, la eficiencia teórica no llevaría a la obtención de informaciones con credibilidad;
- hay factores que, entre otros y de manera general, afectan la eficiencia de los sistemas de abatimiento como la velocidad del gas, el caudal, el diámetro de la garganta, el tamaño de las partículas y su variación, la esfericidad de las partículas, la diferencia de velocidad entre la partícula y la gota o el gas, la densidad de las partículas, el dimensionamiento de los equipamientos de abatimiento, el desgaste de los equipamientos, la naturaleza física y química del material particulado, discontinuidad del medio gaseoso, temperatura, velocidad de entrada del gas y velocidad de salto (para ciclones y multiciclones), malla, diámetro, altura y vibración (para filtros de manga), viscosidad del gas; sistema de alimentación, de inyección de líquidos, velocidad del gas y caudal del líquido (lavadores).

De manera general, a través de las informaciones que se obtuvieron y de lo que se pudo encontrar durante las visitas, se muestra la necesidad de un plan de mantenimiento de los equipos de abatimiento de las emisiones por chimenea.

Los planes de mantenimiento preventivo tendrían que incluir chequeos periódicos que se harían de acuerdo con lo establecido por los fabricantes, el uso y las especificaciones de los materiales captados. Usando como ejemplo los filtros de manga, aspectos como la calidad de la tela, la malla, los soportes, las dimensiones de cada manga, los mecanismos de descarga, la posibilidad de condensación, la lubricación, la abrasión, la tensión, la soldadura, la temperatura y el flujo de aire son variables de una instalación a otra y llevan a diferentes necesidades en términos de periodicidad de mantenimiento preventivo.

### 1.6.3 - Muestreo de Emisiones en las Chimeneas de las Empresas

Para que se pueda hacer el muestreo de las emisiones a través de las chimeneas de las empresas generadoras de energía en Uruguay, de manera

correcta, confiable y en acuerdo con las normativas de referencia, se presentan los procedimientos que siguen:

a) adecuación de chimeneas a las normativas de referencia para muestreo (las que todavía no están adecuadas);

b) exigencia a los proveedores de servicios en muestreo de chimeneas a presentar lo que sigue:

- certificados de calibración de todos los equipamientos utilizados en el muestreo;
- cuando no hay período de validez para los certificados, adoptar como referencia un período de 6 (seis) meses a partir de la fecha de calibración para los pitots, volumen de 40 m<sup>3</sup> para el gasómetro y placa de orificio contados a partir del volumen de la lectura final del gasómetro en el informe de ensayo de la calibración, o 6 (seis) meses a contar de la fecha de la calibración, se utiliza el criterio de aquel que expire primero;
- determinación de la humedad de los efluentes gaseosos en las chimeneas en muestreo, a través de método válido (Ej.CETESB L.9224, US EPA 04, IRAM 29233), con presentación de su evidencia;
- los pitots utilizados en el muestreo deberán estar debidamente identificados con inclusión de su evidencia en el respectivo certificado de calibración;
- el ducto de salida (chimeneas de evacuación de todos los procesos o equipamientos emisores al aire), deberá atender normativas de referencia (Ej. Norma ABNT, NBR 10.701, L9.221CETESB, US EPA GOOD ENGINEERING PRACTICE STACK HEIGHT REGULATIONS – EPA 450/4-80-023R, INSTRUCCIÓN TÉCNICA - 07 (IT-07): ALTURA DE CHIMENEAS – Gobierno Vasco, 2012, UNE 123-001-94)
- el informe de muestreo deberá identificar el responsable técnico, los certificados de calibración de los equipamientos utilizados, las planillas de cálculo con los datos necesarios para la validación de los valores presentados (régimen de producción, combustibles utilizados y sus respectivos volúmenes, caudal de emisión en base seca y base húmeda y temperatura en la chimenea, humedad de los gases, dimensiones de la chimenea, validación del punto de muestreo y método utilizado;

- certificado de calibración del equipamiento utilizado para las determinaciones obtenidas con las muestras (las determinaciones que se proceden en las muestras de material particulado se refieren a pesaje de los filtros debidamente secos, antes y después del muestreo);
- comparación de los resultados con estándares existentes y con aquellos exigidos por la agencia reguladora;
- inclusión en el informe, de los valores de medición del gasómetro al empezar y al finalizar los muestreos;
- indicación de las evidencias de lo siguiente: de los valores de medición del gasómetro (al empezar y al finalizar los muestreos), de los equipamientos utilizados en el muestreo, los sellos de certificación de las calibraciones en los equipamientos, la identificación de los burbujeadores y conexiones utilizados y las condiciones de operación durante el muestreo para un informe fotográfico;

La posibilidad existente del secado de materias primas antes de su transporte a los procesos de producción de energía, que es una práctica adoptada para mejorar el proceso de generación de energía y que al mismo tiempo contribuye a la reducción de emisiones gaseosas por las chimeneas, conduce a la potencialidad de emisiones de gases contaminantes atmosféricos, y entre ellos, compuestos orgánicos volátiles. Los contaminantes que se pueden generar a través del secado de materias primas para la generación de energía por las empresas involucradas en el tema, serán de acuerdo con los materiales secados y los procesos y tratamientos anteriormente aplicados a ellos. En las plantas visitadas no se han encontrado evidencias del uso de sistemas de abatimiento para esa finalidad. Al mismo tiempo, no se encontraron informaciones de cualquier resultado de monitoreo que pudiera indicar la necesidad de uso de este tipo de sistemas.

Para las emisiones fugitivas / dispersas en las plantas de generación de energía (que se originan por las operaciones de transporte, carga, descarga y operaciones para revolver las materias primas, de su almacenamiento – en los gases generados por la fermentación; por la descarga, transporte, almacenamiento y disposición de las cenizas; y por los gases generados por tratamiento de efluentes), no se encontraron evidencias del uso de métodos efectivos para la reducción de su generación en las plantas visitadas. Solamente en una de las empresas visitadas se encontró protección a la acción del viento para contenedores de residuos.

Considerando lo que fue anteriormente expuesto, se justifican propuestas presentadas que involucran la resolución de los temas pertenecientes a los proveedores de servicios, y a los planes de gestión de emisiones atmosféricas.

#### 1.6.4 - Especificación de los requerimientos que debe cumplir el generador para garantizar el cumplimiento de los estándares de emisiones

Para que se pueda establecer las necesidades al cumplimiento de los estándares de emisiones por el generador, las empresas deberán cumplir lo que sigue:

- adaptar las chimeneas a las condiciones necesarias a los procedimientos de muestreo, en acuerdo con lo que se presenta en “1.5.1” y en el ANEXO I;
- presentar resultados de muestreos puntuales de emisiones a través de chimeneas, por lo menos 02 veces al año;
- presentar la eficiencia teórica de abatimiento de cada uno de los sistemas de abatimiento que utilizan en sus plantas;
  
- proceder a un plan de mantenimiento de los equipos de abatimiento, en acuerdo con lo que se presenta en “III / 3.1”., incluyendo comprobación de stock de repuestos y materiales necesarios, cuyas informaciones deberán presentarse periódicamente al órgano regulador;

II) Sugerencias para la medición y mitigación de dichas emisiones por parte de los generadores, acorde a los estándares y exigencias ambientales nacionales e instalaciones existentes. Esto incluirá la consideración de documentos previos existentes a nivel nacional e internacional.

#### 2.1 – Medición de Emisiones

Primeramente se debe considerar que la medición de las emisiones atmosféricas a través de ductos y chimeneas con diámetros de por lo menos 0,30m debe obedecer a las normativas internacionales para los muestreos. Las que tengan diámetros menores deben asegurar que su muestreo se haga en las mejores condiciones de obtención de las muestras, en términos de su representatividad en cuanto a las características del flujo en función de turbulencias que se puedan tener,

tanto por interrupciones del ducto como por sus paredes y por la influencia de la atmósfera.

Para aquellos ductos y chimeneas con diámetros iguales o superiores a 0,30m, la zona de muestreo debe estar localizada por lo menos 08 veces su diámetro arriba de la última interrupción en el sentido del flujo de salida y por lo menos 02 veces su diámetro debajo de la salida de los gases (Método EPA 01). Esto tiene la razón de evitar muestrear zonas de turbulencia del flujo, por acción de las interrupciones y por acción de la atmósfera. Al mismo tiempo nunca se debe muestrear cerca de las paredes del ducto o chimenea, por la turbulencia generada en el flujo por el atrito de los gases.

a) Ensayos con el Equipamiento de medición:

Los ensayos con los equipamientos de medición de material particulado en chimeneas, deberán estar en acuerdo con:

EPA-40 CFR 60 Appendix B Performance Specification 2 / IRAM 29246-1: Especificaciones y procedimientos para la determinación de óxidos de nitrógeno y de óxidos de azufre mediante sistemas de monitoreo continuo, en emisiones desde fuentes fijas;

EPA-40 CFR 60 Appendix B Performance Specification 3 / IRAM 29246-2: Especificaciones y procedimientos para el monitoreo continuo de oxígeno, en emisiones desde fuentes fijas;

EPA-40 CFR 60 Appendix B Performance Specification 11: Especificaciones y procedimientos para sistemas de monitoreo continuo de material particulado, en emisiones desde fuentes estacionarias.

b) Analizadores portátiles de gases de combustión

Los analizadores portátiles de gases de combustión que utilizan como elemento sensor celdas electroquímicas, para la medición de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub> en gases de chimenea.

c) Condiciones de presión y temperatura

Los valores de contaminantes obtenidos en las mediciones, se deben llevar a condiciones de referencia, entendiéndose como tales las siguientes:

- Presión 1013,3 hPa
- Temperatura 0 °C.

d) Ajuste de resultados a las condiciones de referencia por efecto de la dilución:

$$VC = \frac{21 - O_2 \text{ de referencia}}{21 - O_2 \text{ medido}} V_{\text{medido}}$$

- VC: valor corregido a condiciones de referencia
- Vmedido: será el obtenido en la respectiva medición
- O2 medido: será el obtenido en la respectiva medición
- O2 de referencia: será según el caso:

3 % para combustibles líquidos o gaseosos en grupos Turbo-Vapor

6 % para combustibles sólidos en grupos Turbo-Vapor

15 % en el caso de turbinas a gas

Cuando se consume dos o más combustibles diferentes en forma simultánea, se adopta como tenor de oxígeno el valor mayor de los que correspondiere utilizar para cada uno de ellos, considerado individualmente.

Observaciones:

- Los valores de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> deberán ser registrados en el sistema en partes por millón en volumen (ppmv). Este aplicativo convierte y corrige los datos automáticamente, quedando expresados en mg/Nm<sup>3</sup>;
- Los valores de NO<sub>x</sub> en mg/Nm<sup>3</sup> se calculan suponiendo que todo el NO contenido en los gases de escape se oxida a NO<sub>2</sub>.
- Se deberá acompañar los informes de las determinaciones efectuadas de un esquema de ubicación de la sección de muestreo - Área de la sección - Distancias a curvas o codos, al extremo de salida del conducto, etc.
- Para los monitoreos puntuales de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, las determinaciones a efectuar serán tres como mínimo, en cada ducto, obtenidas a intervalos no inferiores a cinco minutos;

- Para los muestreos de MP se deberán realizar, al menos, dos determinaciones consecutivas;
- Se deberán informar el contenido de humedad, la velocidad y la temperatura de salida del efluente.
- Para el caso específico de las empresas generadoras de energía a través de la quema de biomasa, se indica por lo menos un muestreo puntual al año, durante el período de mayor procesamiento; se pueden añadir muestreos después de la ocurrencia de problemas en los sistemas de abatimiento.
- Los muestreos deberán ser de forma isocinética;

#### e) Informes

Los informes sobre emisiones atmosféricas, deberán presentar:

- Informaciones técnicas sobre equipamientos utilizados para muestreo y determinación de los contaminantes involucrados;
- Metodologías para muestreo y determinaciones;
- Plan de muestreo, incluyendo lugares y repeticiones;
- Certificados de calibración de los equipamientos utilizados en los muestreos;
- si no hay período de validez en los certificados emitidos, deberá ser adoptado como referencia lo que sigue:
  - período de 6 (seis) meses a partir de fecha de calibración para los pitots, volumen de 40 m<sup>3</sup> para el gasómetro y placa de orificio contados a partir del volumen de la lectura final del gasómetro en el informe de ensayo de calibración o 6 (seis) meses a contar de la fecha de la calibración, (se usa el criterio de aquel que expire primero);
  - determinación de la humedad de los efluentes en las chimeneas que serán muestreadas a través de método oficial (Ej. método CETESB L.9224);
  - los pitots utilizados en el muestreo deberán estar debidamente identificados para conferencia, con su inclusión en el respectivo certificado de calibración;
  - el ducto de salida / chimenea de todos los sistemas de control ambiental (filtros de mangas, lavadores y otros equipamientos), deberán atender a las normativas oficiales (Ej. ABNT, NBR 10.701);

- responsabilidad técnica (del responsable por su elaboración);
- las planillas de cálculo con los datos necesarios para la validación de los valores presentados (régimen de producción del emprendimiento, combustibles utilizados y sus respectivos volúmenes, caudal en base seca y en base húmeda y temperatura en la chimenea, humedad de los gases, dimensiones de la chimenea, validación del punto de muestreo y método utilizado);
- certificado de calibración de los equipamiento utilizados para la determinación del material particulado y de los otros contaminantes en muestreo (Ej. SO<sub>x</sub>);
- comparación de los resultados con estándares existentes y con aquellos exigidos a la empresa emisora (contratante del servicio de monitoreo);
- inclusión en el informe, de los valores de medición del gasómetro cuando se empiecen y se terminen los muestreos;
- se deberán indicar a la empresa contratante las evidencias de los valores de medición del gasómetro cuando sea empezado y finalizado el muestreo, de los equipamientos utilizados en el muestreo, certificación de las calibraciones, identificación de los pitots, de los burbujeadores y conexiones utilizados además de las condiciones de operación durante el muestreo para un informe fotográfico;
- la empresa contratante designará técnico (preferiblemente del área ambiental o idóneo en emisiones al aire) que acompañará la realización de las mediciones;

#### f) Metodologías

Method 2 – Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate (type S pitot tube);

Method 3A – Determination of oxygen and carbon dioxide concentrations in emissions from stationary sources (instrumental analyzer procedure);

Method 3 – Gas analysis for the determination of dry molecular weight;

Method 4 – Determination of moisture content in stack gases;

#### Muestreo Isocinético de Material Particulado:

Method 5 – Determination of particulate emissions from stationary sources.

Method 17 – Determination of particulate emissions from stationary sources (in stack filtration method).

Determinación de la concentración de los respectivos contaminantes:

- Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

Method 7E – Determination of nitrogen oxides emissions from stationary sources (instrumental analyzer procedure).

- Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

Method 6C – Determination of sulfur dioxide emissions from stationary sources (instrumental analyzer procedure)

Method 6 – Determination of sulfur dioxide emissions from stationary sources

- Monóxido de Carbono (CO)

Method 10 – Determination of carbon monoxide emissions from stationary sources

- Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)

Method 18 - Measurement of gaseous organic compound emissions by gas chromatography

- Cloro, Ácido Clorhídrico y Fluorhídrico

Method 26 – Determination of hydrogen halide and halogen emissions from stationary sources (non-isokinetic method).

Method 26 A – Determination of hydrogen halide and halogen emissions from stationary sources (isokinetic method).

- Fluoruro Total

Method 13B – Determination of total fluoride emissions from stationary sources (specific ion electrode method).

- Ácido Sulfúrico (niebla ácida)

METHOD 8 – Determination of sulfuric acid mist and sulfur dioxide emissions from stationary sources.

- Amoníaco

CONDITIONAL TEST METHOD (CTM-027): Procedure for collection and analysis of ammonia in stationary sources. (este método no pertenece al App. A).

Se añaden algunos métodos específicos de la EPA:

- Determinación de la velocidad y tasa de flujo volumétrica de gases en chimenea (Tubo Pitot tipo S): Método 2;
  - Medición directa del volumen de gas a través de tuberías o ductos pequeños: Método 2;
  - Determinación de la velocidad y tasa de flujo volumétrica del gas en ductos o chimeneas pequeñas (Tubo Pitot estándar) Método 2C;
  - Medición de la tasa de flujo volumétrica del gas en ductos y tuberías pequeñas: Método 2D;
  - Determinación de la velocidad y tasa de flujo volumétrica de gas en chimenea empleando sondas tridimensionales: Método 2F;
  - Determinación de la velocidad y tasa de flujo volumétrica de gas en chimenea empleando sondas bidimensionales: Método 2G;
  - Determinación de la velocidad del gas teniendo en cuenta la disminución de la velocidad cerca a la pared de la chimenea: Método 2H;
- Análisis de gases para la determinación del peso molecular base seca: Método 3
- Determinación de concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en emisiones de fuentes fijas (Procedimiento del analizador instrumental): Método 3<sup>a</sup>;
  - Análisis de gases para la determinación del factor de corrección de tasa de emisión: Método 3B.

## 2.2 - Tecnologías de Reportes en Continuo

El monitoreo puntual de las emisiones de material particulado en chimeneas ("1.5.1 b"), y sus resultados, son la base para la elección de sistemas de monitoreo continuado. Hay que considerar que muchos de los equipamientos de monitoreo continuado en chimeneas presentan restricciones en términos de funcionamiento y validez de los resultados, cuando la humedad de las emisiones evacuadas es alta.

Los equipamientos de monitoreo continuado de emisiones de material particulado en chimeneas no sustituyen totalmente los muestreos puntuales, que se deben conducir por lo menos una vez al año para comparación de resultados, lo que sirve también para ajuste de los equipos de monitoreo continuado.

Muchos de los equipamientos de reporte continuado presentan la posibilidad de autocalibración, que deberá ser presentada en los datos del monitoreo. Las

informaciones del monitoreo continuado permite a las empresas la indicación inmediata de fallas y problemas en los sistemas de abatimiento de emisiones y/o problemas en los procesos, lo que les puede llevar a la resolución de esos problemas a la brevedad. A los órganos reguladores, desde que los datos del monitoreo continuado de las empresas se dispongan en línea, será posible conocer en tiempo real, los picos de emisiones de material particulado, información de extremo valor para la calidad del aire.

#### 2.2.1 – Evaluación de los Sistemas de Monitoreo Continuo de Material Particulado en Chimeneas

La evaluación de los sistemas, deberá incluir el mantenimiento, la durabilidad, la disponibilidad y la disponibilización de datos y calibración. Las necesidades de manutención de los equipamientos, la disponibilidad de partes cuya substitución sea necesaria, los datos presentados y disponibilizados on line, la compatibilidad con los sistemas de gerenciamiento del órgano regulador, y la posibilidad de autocalibración de los equipamientos, son importantes de considerarse e importantes para la evaluación del órgano regulador antes de su adquisición e instalación. De esa manera, los órganos reguladores deberán conocer previamente las necesidades de mantenimiento y operación de los sistemas. Al mismo tiempo, se deberá evaluar la correlación de los datos presentados por el sistema, con aquellos obtenidos a través de monitoreos puntuales, en lo que se incluyen las informaciones sobre humedad. Se debe evaluar el límite de precisión de datos del equipamiento en relación a la humedad de los gases en emisión. La instalación del sistema de monitoreo debe estar en acuerdo con los métodos de muestreo puntual en chimeneas. Los procedimientos para seguridad de la calidad y control de los datos de los sistema pueden seguir aquellos presentados en el “Appendix F to 40 CFR 60”

Las informaciones sobre linealidad (%), errores de calibración (%), amplitud (%), tiempo de respuesta de frecuencia de la muestra / sistema (Seg.), limites mínimos de detección (ppm / %), gama completa de escala (ppm/%), también de debe evaluar cuanto a los equipamientos de monitoreo continuado y se deberán disponibilizar al órgano regulador.

Informaciones de extrema importancia se refieren a la comprobación de los chequeos de información de velocidad en m/min., para cada uno de los puntos internos que deberán ser muestreados en acuerdo con la metodología de muestreos

puntuales en términos del diámetro de la chimeneas, cuando el equipo permita; la posibilidad de impresión/grabación/transmisión de los datos de los procesos obtenidos a cada 15 minutos; la posibilidad de inclusión en la pantalla, a través del software del equipamiento de monitoreo continuado, de los límites de emisión aplicados a la empresa para cada parámetro, de manera que cualquier concentración superior de emisión del parámetro impuesto sea de visualización fácil y directa, con la posibilidad de accionamiento de alarma visual o sonora; las informaciones de temperaturas, humedad, O<sub>2</sub>, isocineticidad y caudal además de la opacidad. En el caso de no haber posibilidad de lo que está presentado en el ítem anterior, hay desarrolladores de software que pueden desarrollar un sistema para esas finalidades.

Los procedimientos de calibración de los equipamientos deberán presentar lo que sigue:

- plan de calibración, en acuerdo con el fabricante;
- paso a paso del cumplimiento de todos los procedimientos de calibración;
- técnicas de calibración;
- estándares de calibración;
- periodos de tests;
- precisión de resolución;
- almacenamiento de datos y procedimientos de seguridad (frecuencia);
- presentación de informes (ejemplos de informes propuestas disponibles, formulario de informe);
- disponibilización de los datos en la red (velocidad / acuerdo con el órgano regulador).

Se sugiere que el registro de datos de los sistemas de monitoreo continuo de emisiones que se instalen en actividades industriales se realice cada 5 minutos, reportando de manera automática los valores de la temperatura y presión de salida de los gases y disponer esas informaciones en la red, en acuerdo con los requisitos del regulador ambiental, en términos de formato y especificaciones técnicas de los software de adquisición de datos usados en el gerenciamiento de las emisiones.

Se sugiere que, para el caso de no haber disponibilización directa a través de la red, todas las actividades a las cuales les corresponda realizar monitoreo continuo de emisiones, deberán enviar al órgano regulador cada tres meses un informe que contenga el análisis, promedio diarios y horarios y los datos registrados por los

equipos de monitoreo continuo durante este mismo periodo de tiempo, en conjunto con las informaciones correspondientes de los procesos industriales. De manera general, para las empresas generadoras de energía, las informaciones de los procesos están asociadas a la cantidad de energía generada e insertada en la red de las operadoras.

Para los equipamientos extractivos, si el caudal volumétrico del gas de emisión, varía sobre un 10% del valor nominal, se deberán mantener las condiciones de isocinetismo dentro del 10%, debe efectuar un chequeo del volumen de muestra para verificar la precisión del equipo de medición diariamente, lo que tendrá que ser disponibilizado al órgano regulador.

Los equipamientos de monitoreo continuado deberán generar indicadores con las señales del estado del instrumento hacia el registrador de datos del órgano regulador.

Los datos de punto cero, se pueden obtener cuando no se tenga operación de producción, con los equipamientos de monitoreo operando.

Los equipamientos que utilizan dispersión y extinción de luz, deberán tener chequeo diario de la óptica del sistema de medición para asegurar la precisión de la medición, lo que también deberá ser reportado en línea para el órgano regulador.

Antes de la ejecución de cualquier ajuste en los equipamientos, se deberán registrar los datos de respuesta y si los ajustes son automáticos, el sistema debe ser capaz de registrar e informar los valores antes del ajuste.

La infraestructura de sistemas de información y de adquisición y el software para el registro de datos y procesamiento, debe contar con un sistema que permita asegurar que existirán medidas para evitar la pérdida de datos y asegurar la inviolabilidad de los datos registrados. Deben incluir procedimientos automatizados de validación de datos, capaces de generar y mantener reportes de estadísticas de captura, tanto de "datos crudos" como validados, registro de otros eventos que apoyen la correcta validación o no de los datos, registros que faciliten la fiscalización y las auditorías.

Un sistema validado, deberá someterse a una revalidación, la cual considera hacer todos ensayos como si se tratara de una validación inicial, cuando se realice una sustitución, modificación o cambio de una parte componente del sistema de monitoreo continuo de emisiones, que pueda afectar la capacidad del sistema para medir con precisión los parámetros ya validados, cada vez que el propietario hace

una sustitución, modificación o cambio en el sistema de canalización del flujo de gases o el funcionamiento de la fuente, que puedan cambiar significativamente el flujo o el perfil de concentración, cuando se realice la sustitución del analizador, cuando se cambie la ubicación o la orientación de la sonda de muestreo, cuando se tengan modificaciones en el proceso o en los sistemas de abatimiento.

Los sistemas de adquisición de datos de monitoreo continuado de las empresas, por el órgano regulador, podrán incluir la posibilidad de generar la distribución espacial de las emisiones, la indicación de puntos y horarios de las concentraciones máximas, la posibilidad de generar y definir cuadrículas en que todas las fuentes situadas en cada cuadrícula se sumen y se representen con códigos de colores, además de sus concentraciones de emisión, respuestas gráficas, variación de las emisiones asociadas al procesamiento y a los equipamientos de abatimiento de emisiones para verificación del cumplimiento de los estándares y temperatura, presión y humedad de las emisiones. Los sistemas de adquisición y gerenciamiento de datos podrán incluir la posibilidad de integración con modelación de dispersión (ej. Aermoc), como es el caso del "AIRVIRO Air Quality Management System".

### 2.3 – Mitigación de Emisiones

La mitigación de emisiones atmosféricas se deberá proceder a través del uso de las tecnologías más adecuadas a las situaciones individuales, de acuerdo con informaciones básicas presentadas en "III".

Sería importante obtener detalles del sistema empleado por Azucarlito en lo que se incluye la eficiencia real del equipamiento por ellos desarrollado. Ese conocimiento podría conducir a la posibilidad de uso de tecnología nacional para el abatimiento de emisiones atmosféricas.

Las informaciones para mantenimiento de algunos equipamientos para abatimiento de emisiones presentados en "III", conducen a la posibilidad del establecimiento de informes sobre el mantenimiento de los equipamientos, que se exijan de las empresas generadoras y su frecuencia de presentación al órgano regulador. Después de las informaciones presentadas de cada uno de los sistemas, se encuentran sugerencias de reportes.

La necesidad de cambios o inclusión de otros equipamientos y / o otros sistemas, solamente se podrá establecer una vez que se tengan resultados válidos de emisiones en chimeneas, cuyos muestreos se procedan en los períodos de mayor procesamiento de las empresas.

III) Sugerencias que permitan orientar en los requerimientos ambientales para dar cumplimiento a los estándares de emisiones de fuentes fijas. Estas deberán especificar los requerimientos técnicos relacionados con los sistemas de mitigación y su mantenimiento, la frecuencia de mediciones, el formato de sistematización y reporte de datos, la frecuencia de reportes a DINAMA, entre otros, para garantizar el cumplimiento de los estándares de emisiones.

### 3.1- Mantenimiento de Sistemas de Mitigación

El mantenimiento de los sistemas de mitigación debe hacerse de manera preventiva, para que se pueda tener menores riesgos de emisiones fuera de los límites establecidos por la agencia reguladora. El mantenimiento correctivo se hará en casos extremos para los cuales la prevención debidamente realizada, no pueda evitarlos.

De una manera general, la periodicidad y las acciones preventivas estarán en acuerdo con cada una de las diferentes metodologías de captación utilizadas, con las diferentes características físicas de entrada de los gases en el sistema, el contenido de materias sólidas y su poder abrasivo, la posibilidad e intensidad de condensación, la posibilidad de acidez o la alcalinidad de los materiales, el tiempo de residencia de los materiales en los sistemas, las velocidades de entrada y de salida del flujo gaseoso y las características de los materiales de construcción de los sistemas. Así, para cada tecnología diferente de captación, para cada dimensión diferente del sistema, para cada fabricante diferente y para cada condición y características diferentes de los gases, para diferentes velocidades y cantidades de procesamiento se tendrán diferentes necesidades y periodicidades para el mantenimiento de los sistemas de mitigación.

Teniendo en cuenta necesidades y características individuales en acuerdo con lo que fue presentado anteriormente, se indican algunas bases de información para las principales tecnologías en abatimiento de emisiones:

### *Filtros de Manga: Mantenimiento y Conservación*

*Lo que se presenta incluye la conservación y el mantenimiento de los filtros de manga, lo que podrá transformarse en informes generados por las empresas a la agencia reguladora.*

- Comprobar el correcto funcionamiento de un filtro nuevo o equipado con mangas nuevas después de una parada técnica: Dejar el filtro trabajar durante unas horas y después controlar la tensión de las mangas, los puntos de fuga y las pérdidas de carga; también comprobar el efecto de la variación térmica, que puede desprender y/o romper alguna manga;
- Para alargar el ciclo de vida de las mangas, empezar a filtrar a una velocidad inferior a la normal; una manga nueva tiene una resistencia muy baja al flujo de aire y si no hay en ese momento otros factores de resistencia, la velocidad de filtración a través de las mangas será muy alta;
- Para el aumento de la permeabilidad y de la eficacia, después del proceso anterior, elevar gradualmente la velocidad hasta alcanzar los valores normales; de esa manera será posible la formación progresiva de una precapa en la superficie de la manga; y se evitará la obstrucción del medio filtrante, permitiendo mayor permeabilidad y aumento de la eficiencia;
- Para evitar la condensación, que es habitual en las paredes del filtro y de las mangas, evitar la introducción de aire procedente de lugares en donde se procede el gas de combustión en un filtro que trabaja sin temperatura (frío); la consecuencia de la condensación es la obstrucción y la corrosión en las partes metálicas; precalentar el filtro y mantener la humedad lo más alejada del sistema, hasta que las paredes y los conductos estén a temperaturas por encima del punto de rocío; durante el proceso de precalentamiento, el mecanismo de contracorriente debe estar cerrado a fin de evitar condensaciones en las paredes de la célula aislada (sin efecto para los sistemas “pulse-jet” ); el precalentamiento se debe efectuar tanto en los filtros “Bag-house” como en los compartimentados; la condensación puede anular las garantías de los constructores;
- En los procesos en que se puede tener puntos de rocío ácidos o alcalinos, el funcionamiento correcto sería en “by-pass” durante el inicio de las operaciones hasta

que la temperatura esté por encima del punto de rocío; en cualquier otro caso, habrá una condensación ácida en las mangas y filtro que en poco tiempo causará daños irreversibles;

- Capacitar personal para saber reconocer cuándo un nivel de pérdida de carga, caudal, temperatura o humedad es anómalo para el buen funcionamiento del sistema; anticiparse a ello es vital para el ahorro y el medioambiente; un manual a pie de filtro con las disfunciones, sus causas y posibles soluciones es un buen método, junto al registro de pérdidas de carga;

- Registrar las pérdidas de carga durante un ciclo de filtración para utilización posterior como referencia para detectar problemas por pérdida de carga alta o baja; se puede hacer a través de anotación periódica de los valores indicados por los manómetros; en grandes instalaciones la opción es instalar un sistema automático de registro y alarma;

- Una alta pérdida de carga puede indicar aumento de caudal del gas a filtrar; inicio de la sobrecarga de las mangas; tolvas demasiado llenas que pueden obturar las mangas; condensaciones en el medio filtrante; mecanismo de limpieza inoperante (vibrador, aire comprimido, etc.).

- Una pérdida de carga baja significa que el ventilador ha reducido las vueltas, tal vez por resbalamiento; mangas rotas o desprendimientos; tuberías de entrada obstruidas o válvulas cerradas; pérdida entre los compartimientos del filtro;

- Aspiración de partículas distintas llevan a variaciones en el caudal y en la velocidad de filtración;

- Excesivo caudal de aspiración a través de pocas mangas llevará sobrecarga de polvo a las mismas o a velocidades de paso demasiado altas, lo que significa, respectivamente, emisiones de partículas, obstrucciones de las mangas o que éstas se atasquen o rompan;

- Caudal de aspiración demasiado bajo significa condensaciones en el filtro, suponiendo riesgos y costes;

- El ajuste en el sistema de limpieza prolongará el ciclo de vida de las mangas, aunque siempre buscando el punto de equilibrio entre duración de la manga y nivel de pérdida de carga; para encontrar el equilibrio una buena fórmula es hacer funcionar al mínimo el sistema de limpieza por un período que puede ser de algunos días; en el momento en que las pérdidas de carga sean demasiado altas, se debe aumentar gradualmente la acción del sistema de limpieza (frecuencia, intensidad y

duración); al cabo de unas horas de realizada esta maniobra, la pérdida de carga deberá volver a los valores normales, y entonces se podrá de nuevo reducir la acción de la limpieza si no se observa la gradual fluctuación en la pérdida de carga significa que las mangas están demasiado limpias;

- La única forma de asegurar que el filtro trabaje con el sistema de limpieza mínimo posible es operar continuamente en torno al mismo; los cambios en los procesos de elaboración o en el tipo de mangas utilizados variarán las exigencias del acondicionamiento de las mangas continuamente; mantener vigilancia en eso significa importantes ahorros económicos: coste energético, coste de reposición de mangas, ineficiencia del sistema, y otros.

- Las fibras que componen la manga, su estructura y su acabado (tratamientos), han sido pensadas para operar a una determinada velocidad de filtración, granulometría, tipología de partícula, etc.; si se producen cambios de las condiciones normales de funcionamiento previstas, aunque sólo sean del 10%, se debe realizar un análisis de todo el funcionamiento del filtro tanto desde un punto de vista de rendimiento técnico como económico;

- Cuando se para un filtro, hay que prevenir la humedad en su interior; se pueden formar condensaciones mediante el enfriamiento de gases (contenedores de humedad, en especial los de combustión) si no son "by-pasados" por el sistema del filtro y reemplazados con aire seco antes de que el filtro se enfríe; otras condensaciones peligrosas se producen al afectar al filtro condiciones climáticas húmedas (alta humedad relativa, lluvia, niebla, etc.) durante paros prolongados;

- Existen diferentes métodos para evitar la condensación en los filtros, uno de ellos es purgar a fondo la instalación antes de los paros y luego cerrarla completamente, casi precintándola; otro método es introducir aire caliente durante un cierto período en la instalación ya cerrada; un filtro estanco se puede presurizar con aire seco antes de pararlo completamente, a fin de evitar que aire húmedo exterior pueda ser aspirado dentro del mismo;

- Además del mantenimiento general previsto durante los paros, es aconsejable limpiar los ángulos y puntos quebrados de todas las acumulaciones de polvo que puedan solidificarse durante paros prolongados, así como retirar todo el material que pueda arder y, en cualquier caso, quitar, limpiar y almacenar las mangas en un ambiente idóneo;

- Una manga que pierda polvo puede destruir rápidamente todas las mangas que la rodean si no se sustituye rápidamente;
- Altas velocidades de filtración con partículas abrasivas pueden dañar las mangas en poco tiempo, si no se construye un deflector de partículas que, a su vez, debe ser inspeccionado regularmente para comprobar que no haya sido afectado por erosión o desgaste;
- Un hilo de humo visible en la chimenea significa que, seguramente, se está produciendo una pérdida causada muy probablemente por algún agujero en una de las mangas;
- El polvo que escapa por una rotura en una manga en el caso del “Bag-house” destruye la manga adyacente; una solución inmediata si no se dispone del repuesto es atar las dañadas, estrangulándolas sobre la placa tubular, hasta su sustitución;

#### Chequeo / Inspección

Se presenta un chequeo de inspección en la tabla 02, a seguir, para que las empresas puedan adoptar chequeos semejantes, en acuerdo con sus necesidades específicas:

Componente	Inspeccionar y observar
Mecanismo de sacudida (“Bag-house”)	Funcionamiento justo sin doblar demasiado la manga. Cojinetes. Soportes. Mandos. Lubricación
Mangas	Desgaste por abrasión o envejecimiento. Condensación. Tensión errónea. Mangas sin elasticidad. Roturas
Manómetros	Marcha normal del $\Delta p$ . Control diario
Instalación de evacuación de polvos	Cojinetes. Soportes. Partes deformadas. Mecanismos de mando destruidos o deformados. Lubricación
Estructura del filtro y tolvas	Pernos deformados. Roturas de las soldaduras. Pintura desconchada. Corrosiones
Tuberías y conductos	Corrosiones. Orificios. Daños externos. Sujeciones con pernos. Soldaduras. Incrustaciones de polvo
Válvulas pulsantes (“Pulse-jet”)	Se debe oír el estallido del aire comprimido
Ventiladores	Instalación apropiada. Lubricación de los compresores. Pérdidas en las tuberías y conductos
Válvulas	Justo funcionamiento y sincronización de los cilindros que pierden. Enganches de aire viciado. Lubricación. Guarniciones.

...continuación Tabla 02

Puertas	Destrucción. Deformación. Guarniciones desapropiadas. Cierre perfecto.
---------	--

Tabla 02 – Inspecciones

La tabla 03, presentada a seguir, muestra síntomas, causas y posibles soluciones para los filtros de manga:

Síntoma	Causa	Posible Solución
Alta pérdida de carga del filtro	Dimensionamiento insuficiente del filtro	Consulte al constructor. Instale mangas más largas (si es posible). Añada nuevos compartimentos. Pruebe mangas especiales.
	Instalación de limpieza mal ajustada	Aumente la frecuencia. Limpie durante más tiempo. Limpie más rigurosamente.
Alta pérdida de carga del filtro	Presión de aire comprimido demasiado baja ("Pulse jet")	Aumente la presión. Disminuya la duración y/o la frecuencia. Controle el secador de aire. Observe posibles obstrucciones en las tuberías
	Presión de aire contracorriente demasiado baja (aire invertido)	Aumente las vueltas del ventilador de contracorriente. Observe las posibles pérdidas. Controle las juntas de las válvulas.
	Sacudida insuficiente ("Bag-house"). Válvulas de aislamiento que no se cierran	Aumente la velocidad del sacudidor. Controle las juntas. Controle las guarniciones. Controle los generadores de aire. Controle los mecanismos neumáticos
	Tensión de mangas insuficiente	Tense las mangas
	Válvulas pulsantes que no funcionan ("Pulse-jet").	Controle los diafragmas y las válvulas piloto.
	Mal funcionamiento del "timer" de regeneración.	Controle si el "timer" funciona con todos los contactos. Controle la salida de todos los terminales.
Alta pérdida de carga del filtro	Incapacidad de quitar el polvo de las mangas.	Condensación sobre las mangas. Envíe muestra de mangas y polvo al constructor de las mangas para análisis en laboratorio. Limpie en seco o cambie las mangas. Reduzca el caudal.
	Excesiva turbulencia de partículas del filtro	Vacíe continuamente las tolvas. Limpie las mangas "aquí y allí" y no en secuencia ("Pulse-jet").
	Lectura incorrecta de la presión	Controle fijaciones. Controle los tubos flexibles en cuanto a pérdidas. Controle líquido del manómetro. Controle el diafragma de la columna

Amperaje bajo del motor del ventilador.	Bajo volumen de aire. Alta pérdida de carga.	Ver arriba.
	Palas del ventilador y del motor	Controlar los planos.
	Conductos atascados.	Limpie los conductos y controle la velocidad en los mismos.
	Válvula correctora ventilador cerrado.	Ábrala y fíjela en posición

Tabla 03 - Síntomas, Causas y Posibles Soluciones de problemas en filtros de manga.

Para el caso de las empresas que usan sistemas de filtros de manga, se propone en un primer momento un informe mensual conteniendo una copia de los registros de pérdida de carga durante los ciclos de filtración, firmada por un técnico responsable, una serie de imágenes de las chimeneas (con fecha en las imágenes) y comprobación de stock de mangas (con copia de las facturas de compra) con registros de entrada y de salida de esos materiales con las debidas fechas. Se puede solicitar que se instalen equipamientos de registro de la presión de los gases (entrada y salida del sistema de abatimiento) que contengan los valores de presión, con fecha y hora, para comprobación de las pérdidas de carga.

#### *Separadores Electrostáticos - PES*

El *Specific Collection Area* - SCA (área específica de recolección) es un parámetro utilizado para comparar PESs y estimar burdamente su eficiencia de recolección. El SCA es el área total de la placa recolectora dividida por la rapidez de flujo volumétrico del gas y tiene unidades de s/m o s/pie. Puesto que el SCA es la relación  $A/Q$ , es con frecuencia expresada como  $m^2 / (m^3/s)$ . El SCA es también uno de los factores más importante al determinar el capital y varios de los costos anuales del PES (por ejemplo, costos de mantenimiento y de disposición del polvo), porque determina el tamaño de la unidad.

La caída de presión en un PES se debe a cuatro factores principales:

- Placa difusora (usualmente presente)—(placa perforada a la entrada);
- Transiciones a la entrada y salida del PES;
- Deflectores en las placas de recolección (refuerzos) o corrugados;
- Resistencia de la placa plana de recolección contra el flujo de gas;

La limpieza de los materiales recolectados de las placas frecuentemente es acompañada, intermitente o continuamente, de golpeteo severo de las placas con martillos automáticos o pistones, usualmente a lo largo de los bordes superiores, excepto en el caso del PES húmedo que utiliza agua. El golpeteo desprende al material, el cual cae a lo largo de la placa hasta que se asienta en una tolva para polvo. Las características del polvo, la intensidad del golpeteo y la frecuencia del golpeteo, determinan que tanto material es reencauzado y que tanto llega a la tolva permanentemente.

Para PESs húmedos, debe considerarse el manejo de aguas residuales. Para sistemas simples con polvos inocuos, el agua con partículas recolectadas por el PES puede descargarse del sistema del PES a un clarificador removedor de sólidos (ya sea dedicado al PES o parte del sistema de tratamiento de aguas residuales de la planta), y de ahí a disposición final. Los sistemas más complejos pueden requerir remoción de la capa flotante y de lodos, clarificación en equipo dedicado, ajuste de pH y/o tratamiento para remover los sólidos disueltos. El agua atomizada del pre-acondicionador del PES puede tratarse separadamente del agua utilizada para inundar las placas recolectoras del PES, de modo que la más limpia de las dos aguas pueda regresarse al PES. La recirculación del agua tratada al PES puede aproximarse al 100 por ciento.

La tolva debe diseñarse de modo que todo el material en ella se deslice hasta el fondo, donde puede ser evacuado periódicamente, a medida que la tolva se llena. El polvo es removido a través de una válvula hacia un sistema de manejo de polvo, tal como un transportador neumático. Las tolvas son con frecuencia suministradas con calor auxiliar para prevenir la formación de grumos o plasta y la obstrucción subsecuente del sistema de manejo de polvo.

La evaluación del desempeño, problemas y diagnósticos se pueden hacer a través de registros de los históricos de operación, que pueden indicar donde están las fallas y su frecuencia, cuales son los problemas típicos, y que se hizo sobre ellos. Estos registros, de una manera general se proceden por sistemas informatizados. La frecuencia de chequeos es una forma de conocer y corregir los problemas operacionales.

Muchos de los problemas operacionales se reflejan en las características eléctricas, en la resistividad del material captado y en los procesos del efecto

corona. Inspecciones diarias permiten la identificación de problemas y su corrección antes de mayores riesgos y de mayores fallas.

Se proceden a inspecciones semanales que empiezan con la interpretación de las inspecciones diarias para la identificación de parámetros que puedan conducir a la necesidad de mantenimiento y de la solución correcta y en tiempo, de los problemas encontrados en las inspecciones diarias. Las inspecciones se deben conducir comparando las informaciones de operación con aquellas características del equipamiento

El chequeo diario se debe conducir inspeccionando entre otros, los niveles de electricidad del efecto corona, las condiciones de operación del proceso (temperatura de los gases, flujo de oxígeno, vapor), sistema de descarga de polvos, opacidad, ruido del aire. De manera semanal se debe hacer el análisis de tendencias de la operación de los equipamientos, limpieza o sustitución de filtros de aire de purga y de los sistemas de calentamiento, ruido de entrada del aire, condiciones anormales y flujo de gases. Cada tres meses se debe inspeccionar la existencia de corrosión, distribución de gases, acumulación de polvos, alineamiento, presión y vibración. De manera anual se debe inspeccionar cada uno de los componentes del equipamiento incluyendo electricidad y conexiones.

Para el caso de las empresas que usan sistemas PES, se propone en un primer momento presentar un informe mensual conteniendo las inspecciones diarias y semanales firmada por un técnico responsable, una serie de imágenes de las chimeneas (con fecha en las imágenes) y comprobación de stock de partes del equipamiento (con copia de las facturas de compra) con registros de entrada y de salida de esos materiales con las debidas fechas. Para aquellos que no tengan sistemas informatizados se puede solicitar información de la posibilidad de informatizarlos y, si es posible, solicitar que lo sean.

De una manera general, cuando los sistemas de abatimiento presentan problemas de reducción de la capacidad de retención de material particulado, las agencias de regulación exigen que los procesos se reduzcan de tal forma que a través de la escala de Ringelman, sus emisiones estén en acuerdo con su licencia de operación, y, para comprobarlo se exigen imágenes con horario y copias de los registros de cantidad de energía generada / transmitida a la red.

Cuando hay rotura total o acontecimientos que impidan totalmente la captación de material particulado a través de los sistemas de abatimiento, los órganos

reguladores sellan todo en las plantas, hasta que los sistemas de abatimiento vuelvan a funcionar en acuerdo con las licencias de operación, en términos de emisiones atmosféricas. Los sellos solamente pueden ser sacados por el órgano regulador, que lo hará cuando la empresa comunique la resolución total del problema, que tendrá que comprobarse posteriormente a través de nuevas mediciones de emisiones en chimeneas.

### *Lavadores de Gases*

Los lavadores de gases, de una manera general, se deben mantener de manera que todas las puertas de inspección estén herméticamente selladas; los escapes eventuales deben ser reparados inmediatamente; hacer la renovación de la pintura siempre que sea necesario para evitar la corrosión; la red hidráulica o el suministro de agua debe ser continuo y suficiente; la bomba y las boquillas deben ser inspeccionados frecuentemente, principalmente debido a obstrucciones; las láminas de eliminación de pequeñas gotas deben ser inspeccionadas mensualmente, para evitar acumulación de suciedades y la consecuente fuga de agua; realizar la inspección periódica (por lo menos una vez por semana) de las placas filtrantes para verificar si están dañadas y si es necesario, deben ser sustituidas inmediatamente.

Cuando se sucede pérdida de carga muy alta se debe verificar si todas las boquillas están funcionando normalmente; si los filtros están con una capa muy espesa de polvo o partículas, porque puede el material particulado colectado no estar siendo retirado del tanque y de esa manera se debe cambiar el agua del tanque cuando se acumulen grandes cantidades de suciedades - el ángulo de inclinación del tanque debe estar en dirección al drenaje para permitir que el polvo fluya.

Cuando el caudal de gases es muy alto, se debe medir el caudal y regular la compuerta para la condición de diseño.

Cuando la pérdida de carga es muy baja, se debe verificar si existen aberturas en la región de los filtros y si están instalados correctamente; verificar si hay fugas de aire u obstrucciones en los conductos del sistema; certificarse que todas las compuertas o rejillas del sistema están correctamente colocadas para permitir que el aire pase a través del lavador; certificarse que la placa de sellado del tanque esté bien instalada o la carcasa no tenga agujeros, rajaduras o sellos flojos que permitan que el aire pase por el lavador sin pasar por las placas.

Los repuestos más comunes de los lavadores de gases son las boquillas pulverizadoras y las placas filtrantes.

Para el caso de las empresas que usan sistemas de lavadores de gases, se propone en un primer momento un informe mensual conteniendo una copia de los registros de pérdida de carga durante los ciclos de filtración, firmada por un técnico responsable, una serie de imágenes de las chimeneas (con fecha en las imágenes) y comprobación de stock de boquillas, filtros y otras partes (con copia de las facturas de compra) con registros de entrada y de salida de esos materiales con las debidas fechas. Se puede solicitar que se instalen equipamientos de registro de la presión de los gases (entrada y salida del sistema de abatimiento) que contengan los valores de presión, con fecha y hora, para comprobación de las pérdidas de carga.

### 3.2 - Mediciones de Emisiones Fugitivas

Las mediciones en emisiones fugitivas / difusas se pueden establecer en acuerdo con levantamientos de su potencialidad de generación en las empresas. De manera general, son importantes las mediciones de material particulado que se pueden proceder en acuerdo con el método EPA 40 CFR Part 50, Appendix B, HI-VOL Samplers para TSP.

La altura de la toma de muestras deberá ser aquella de la altura de respiración de los seres humanos, y para eso se lleva en cuenta el promedio de la altura de los oídos que está establecida como 1,50 m.

Es importante que los equipamientos de muestreo estén localizados en un ángulo de 45° con las construcciones más altas, árboles y otros obstáculos a la toma de muestras.

También se tiene que tener en cuenta la necesidad de monitoreo paralelo de las condiciones meteorológicas en el lugar y la necesidad de, por lo menos muestrear dos puntos al mismo tiempo (empezar y terminar al mismo tiempo, el muestreo en dos puntos distintos, uno de ellos aguas abajo y otro aguas arriba de las fuentes de emisiones en relación a la dirección del viento).

La elección de los puntos llevará en cuenta la localización de las fuentes de emisión difusa y la dirección del viento, estableciendo un punto “aguas abajo” y otro “aguas arriba”.

Se deberá proceder a la calibración de los equipamientos antes de empezar el muestreo, y los calibradores deberán estar debidamente calibrados.

### 3.3 - Reducción de Generación de Emisiones Fugitivas / Difusas

Para la reducción de las emisiones fugitivas / difusas de material particulado se indican algunas informaciones básicas:

- Reducir la altura de caída cuando se descargan los materiales;
- Cerrar totalmente contenedores después de la recolección de materiales;
- Evitar la carga de cintas hasta los bordes;
- Elegir posición correcta de carga y descarga en función de la dirección del viento;
- Cubrir completamente los materiales transportados;
- Circulación y operación de vehículos y máquinas en velocidades tales que reduzcan la generación y dispersión de polvo;
- Proteger los materiales de la acción del viento mediante la instalación de pantallas o barreras cortavientos naturales o artificiales;
- Promover el transporte interno de materiales a través de sistema cerrado de cintas (ej. tuberías con cintas internas de transporte);
- Establecer e implantar plan correctivo y preventivo de generación de emisiones fugitivas / difusas;

IV) Aspectos relevantes para la implementación de las sugerencias en el contexto nacional.

#### 4.1- Implementación de Sugerencias

Para la implementación de las sugerencias para mediciones de emisiones a través de chimeneas primeramente hay que prever y estudiar, en conjunto con las empresas, la adecuación de las chimeneas para su ejecución;

Para implementar sugerencias en cuanto al mantenimiento de los equipos de abatimiento, hay que tener detalles de cada uno de los equipos utilizados;

Para implementación de mayores reducciones de emisiones a través de chimeneas, hay que tener los conocimientos de las cuestiones anteriores;

Para el cumplimiento de los límites de emisiones a través de chimeneas (estándares exigidos por el órgano regulador) y su comprobación, hay la necesidad de implementación de lo que está presentado anteriormente, en “4.2”, “4.3”, “4.4”, “4.5” y “4.6”.

#### 4.2 - Software Necesarios y Capacitación

Por lo que se presentó en este informe, existe la necesidad de disponer y utilizar software con salida gráfica para la modelación de contaminantes atmosféricos, principalmente aquellos emitidos por chimeneas. Para eso, se necesita capacitación de profesionales para el uso del software cuya función será la de conferir modelaciones presentadas por las empresas, quienes deberán proporcionar las bases de datos utilizadas para la alimentación del modelo en el lenguaje adecuado al programa utilizado.

Se indica el software Aermol, de uso general por las agencias reguladoras y uno de los propuestos por la EPA.

Otros software que se puedan presentar necesarios a la implementación de lo que se presenta en este informe, así como la capacitación para su manejo se podrá sumar a las necesidades de software y capacitación a lo largo de la implantación de las sugerencias.

#### V) Alternativas de Uso y Gestión de las Cenizas de Fondo y Volante.

##### 5.1 – Generalidades

Las cenizas generadas por plantas de producción de energía eléctrica a través de combustibles sólidos, es tema de importancia, estudios e investigaciones globales en términos de su uso por la gran cantidad generada y por los problemas de disposición.

La disposición de las cenizas en vertederos involucra cuestiones de seguridad y de contaminación ambiental, por la generación de gases (Ej. metano y CO<sub>2</sub>), asociados al efecto invernadero, además de la potencialidad de generación lixiviados que pueden contaminar el subsuelo, el suelo y las aguas subterráneas.

La composición química de las cenizas de los combustibles sólidos vegetales utilizados para la generación de energía es la base para informaciones, estudios e

investigaciones acerca tanto de su utilización como de la contaminación que podrá causar en su disposición y en su emisión. De esa manera, es de extrema importancia conocer previamente los elementos químicos presentes en las cenizas y sus posibles reacciones e interacciones con elementos y compuestos en el medio de su uso o disposición, para establecimiento previo de su potencialidad tóxica.

La presencia de cloruro en las cenizas puede llevar a la formación de dioxinas, compuestos de extrema toxicidad que se pueden formar en la superficie de las partículas en reacciones de combustión. El mecanismo de formación de PCDDs incluye la existencia de un medio rico en oxígeno, una fuente de cloruro y la presencia de un catalizador metálico (Ej. Sodio). Si se considera que hay gran cantidad de elementos metálicos en la composición de las cenizas, la presencia de cloruro podrá indicar la posibilidad de formación de PCDDs en las superficies de las partículas de cenizas. Una metodología que se puede usar para análisis de dioxinas en cenizas, es el US EPA 8280B, que presenta los procedimientos para la extracción de matrices específicas, el “clean-up” para los analitos específicos y la determinación de dioxinas a través de las técnicas de cromatografía gaseosa de alta resolución y espectrofotometría de masa de baja resolución (Hoff, 2002).

Durante el proceso de combustión de la biomasa hay grandes pérdidas sob formas gaseosas de agua, carbono e nitrógeno y en menor cantidad, de azufre, cloruro y otros elementos volátiles, incluyendo la pérdida de partículas sólidas transportadas por flujo convectivo. Hay que tener en cuenta que la afinidad del cloruro con el hidrógeno es más fuerte que la afinidad del cloruro con el sodio y con el potasio, que es mayor que la afinidad del cloruro con el plomo (Jenkins et al., 1998; Obernberger, et al., 2006; Steenari et al., 1999; Wu & Biswas, 1993; Sarofim et al., 1994 en Chiang et al., 2001; citados por Pita, P.V.V, 2009).

Las cenizas de combustibles sólidos vegetales están dominadas por  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$ , y en menor medida por óxidos de Magnesio, Aluminio, Potasio y Fósforo. La ceniza proveniente de plantas de largos períodos reproductivos (largos ciclos), como son los árboles tienen, por la dinámica de flujo de nutrientes con la tierra, una composición mineral muy diferente a las plantas que se cosechan varias veces al año, como los cereales. Estas últimas contienen mayores cantidades de óxidos con bajo punto de fusión, particularmente Potasio y Fósforo. Además, contienen substancialmente menores cantidades de metales tóxicos (Melissari, 2012).

Las tablas 04 y 05 presentan respectivamente informaciones de referencia sobre la composición química y de cenizas, y de los metales tóxicos presentes en tres materias primas vegetales.

	Chip madera	Corteza	Cereales
Ceniza Total	< 2 %	3 – 8 %	5 – 10 %
Composición	% en la ceniza		
SiO <sub>2</sub>	25	25	35 - 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	7	2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	4	2
CaO	45	40	7
MgO	5	7	3
K <sub>2</sub> O	5	5	20 - 30
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4	2	6

Tabla 04 - Cantidad y composición química típica de cenizas (fuente: Vitis Energetic, 2007)

Metales tóxicos en cenizas (ppm)	Chip madera	Corteza	Cereales
Pb	25	25	10
Cd	5	5	1
Zn	400	600	250
V	40	60	5
Cr	50	150	15
Ni	60	100	4

Tabla 05 - Cantidad y de metales tóxicos en cenizas de tres materiales (Fuente: Vitis Energetic, 2007)

Las cenizas producidas por la combustión de materiales de origen vegetal, además de su potencialidad de contaminación ambiental, también conducen a problemas en quemadores y calderas. Van Loo (2010), presenta algunos de los problemas relacionados a la ceniza en sistema de combustión de biomasa en quemadores:

- Formación de aglomerados de ceniza en estado líquido parcialmente derretido y su Influencia en la grilla y depósitos de escoria a alta temperatura en los equipos;
- Formación de depósitos de ceniza en lugares de baja temperatura o superficies de intercambio en calderas en donde existen secciones convectivas;
- Corrosión y erosión acelerada del metal del lado de los gases;
- Emisión de ceniza en estado de aerosol (fly-ash), su formación y control;
- Utilización, manejo y disposición de los residuos de ceniza de los equipos de biomasa.

*Las características alcalinas y las altas concentraciones de nutrientes minerales de las cenizas las hacen aptas para que puedan ser reutilizadas como fertilizante.*

*Un grupo de científicos de la Universidad de Santiago de Compostela afirman que la acción de las cenizas complementarían los fertilizantes convencionales que se usan en explotaciones intensivas ganaderas y forestales, donde la extracción de nutrientes provoca un mal estado del subsuelo y de los ecosistemas.*

*Las cenizas de biomasa son también reutilizadas para la elaboración de cemento, como relleno de materiales cerámicos o para luchar contra los derrames de petróleo en el transporte a través de barcos. En este último caso, las cenizas se mezclan con los restos de fuel, consiguiendo así una masa mucho más sólida, cosa que facilita la limpieza, manejo y almacenamiento; esta mezcla se puede reutilizar posteriormente como combustible para centrales térmicas o como complemento corrector de la acidez en depósitos de estériles de dichas centrales.*

*Las cenizas también pueden ser utilizadas para absorber malos olores resultado de la actividad de la industria. Más concretamente, los responsables de los malos olores en muchas actividades industriales son el sulfhídrico y sus derivados. Sobre ellos actúan los materiales obtenidos a partir de los inquemados de biomasa forestal, que desempeñan la función de absorbentes/catalizadores.*

*Se desarrolla un proyecto de investigación que no es otra que la de obtener un nuevo material polimérico, al que se llama Policeniza,*

*compuesto por las cenizas en su mezcla con una resina termoplástica, que podría ser utilizado como aislante acústico, muy útil en sectores como los de la construcción (Castaño, 2010).*

La adición de ceniza a los suelos podría afectar las propiedades físicas del suelo tales como la estructura, la distribución de poros y la densidad con implicaciones directas en la aireación del suelo. Por lo tanto, podría incrementar la permeabilidad hídrica así como a su capacidad de retención de agua minimizando así los impactos de la escorrentía superficial.

Los efectos de la aplicación de cenizas de madera en las propiedades físicas y mineralógicas apenas se conocen (Demeyer, A et al., 2001), aunque se sabe que la adición de ceniza de madera al suelo puede afectar en gran medida a la textura, aeración, capacidad de retención de agua y la salinidad del suelo.

Etegni y Campbell (1991) demostraron que las partículas de ceniza de madera se hinchan en contacto con el agua y pueden obstruir los poros del suelo. Por consiguiente, esto puede reducir la aireación y aumentar la capacidad de retención de agua.

Algunos autores subrayan que la ceniza de madera utilizada como enmienda de suelo debe de ser originada únicamente a partir de la combustión de residuos forestales o de madera no tratada (Bramryd y Fransman, 1995; Meiwes, 1995).

Cantidades moderadas de cenizas devuelven al suelo buena parte de los nutrientes extraídos durante el aprovechamiento forestal. En algunos casos, esta práctica se ha empleado para aliviar las deficiencias de P, Ca y Mg que presentan frecuentemente las plantaciones forestales en suelos ácidos. Diferentes trabajos han mostrado respuestas positivas sobre el crecimiento y el estado nutricional de los árboles, lo que se atribuye a aumentos en la disponibilidad de nutrientes limitantes en el suelo (Ferm et al., 1992; Vance, 1996). Hay que considerar que los suelos forestales son ricos en materia orgánica y N orgánico, por lo que los aumentos de pH en estos suelos podrían conducir a un aumento de la mineralización de N, con el riesgo de pérdida de N en forma de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  o  $\text{N}_2$  a través de procesos de nitrificación y desnitrificación (Kahl et al., 1996).

El uso de la ceniza como fertilizante, todavía no presenta informaciones claras sobre la posibilidad de generación de cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo a lo largo del tiempo. Koppejan, J., and van van Loo, S. (2008), presentan límites para el uso de las cenizas en suelos, en acuerdo con lo que sigue:

- 1000 kg / ha / año para cultivos agrícolas;
- 750 kg / ha / año para pasturas;
- 3000 kg /ha / 50años para bosques.

El Departamento de Físico Química de Materiales del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (España), estudia la producción de hidrógeno y zeolitas a través de tratamientos aplicados a la ceniza: otra manera de utilización. En un pretratamiento, las cenizas son tratadas con una disolución acuosa alcalina y a temperatura ambiente durante 24 horas. En este pretratamiento, la disolución genera hidrógeno, que puede ser empleado como combustible alternativo. El hidrógeno se forma por la disolución del aluminio metálico presente en la ceniza de partida. En la segunda etapa del método, la disolución se somete a tratamiento térmico en un reactor, lo que da lugar a la formación de zeolitas sintéticas cristalinas mayoritariamente, con propiedades adsorbentes y de intercambio iónico, con un amplio abanico de aplicaciones, entre ellas, tratamiento de lixiviados en los propios vertederos de cenizas (volantes). Ese procedimiento, para el cual ya se ha solicitado la patente, consigue transformar las cenizas en nuevos productos de interés comercial y no añade a la ceniza de partida ningún otro componente, como es el caso del polvo de vidrio, escoria de aluminio, hidróxido de aluminio, ceniza volante de la combustión del carbón o sílice amorfa, utilizados en otras tecnologías.

Nikhil Gupta, del Instituto Politécnico de la Universidad de Nueva York y Pradeep Rohatgi de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee han desarrollado y realizado pruebas de estrés en metales compuestos hasta en un 50 % de cenizas volantes sustituyendo al aluminio. Los compuestos de metales y cenizas volantes realizados con una concentración un poco menor, 20 o 30 % por unidad de peso, crearon un compuesto que era igual de fuerte que el original pero mucho más ligero. Gupta ha sido financiado por la Oficina de Investigación Naval de los EEUU, entre otras agencias gubernamentales. Uno de los usos que se está explorando, afirma, es si estos materiales pueden usarse para fabricar vehículos blindados o barcos más ligeros.

Además, aunque las informaciones no tengan un origen técnico, se encuentran referencias al uso de cenizas para hacer jabón y detergente.

El uso de las cenizas en la producción de mortero, es una opción para el uso de esos residuos. El reciclaje de las cenizas en la producción de materiales con base en cemento puede ser un beneficio al medioambiente, ya que los productos

resultantes tienen propiedades mecánicas adecuadas y baja liberación de elementos peligrosos (Maschio et al., 2011).

En algunos países, se utilizaron cenizas como relleno en construcciones que involucran grandes áreas de pavimentación, pero sin contacto con aguas subterráneas, algunos de ellos son estacionamientos, hangares de almacenamiento, etc. (Confederation of European Waste-to-Energy Plants, 2011).

En la construcción de carreteras, se utilizan cenizas como material de relleno incluso en pendientes. En Portugal, la empresa Valorsul fue la pionera en el comercio de un nuevo agregado derivado de cenizas para la construcción de carreteras. El material, propio para capas de base y sub-base de pavimentos, es una alternativa ambiental y económica al tradicional (Associação de Entidades de Valorização Energética de Resíduos Sólidos Urbanos, 2011).

Teniendo en cuenta que las cenizas pueden llevar a riesgos ambientales, su disposición en vertederos en Brasil debe estar en acuerdo con lo que dispone el Decreto nº 183/2009, que establece el régimen jurídico para disposición de residuos en vertederos. Los riesgos se deben a la percolación y lixiviación de las cenizas a través de las aguas, arrastrando para la napa freática, elementos eventualmente tóxicos, que podrán llegar a las fuentes de suministro de agua. Algunos de los límites se establecieron en acuerdo con la solubilidad de determinados elementos químicos evaluados a través de ensayo para determinación de la composición del lixiviado de materiales de residuos granulares y de lamas (EN 12457/1-4) con los procedimientos prácticos para evaluación de conformidad.

## 5.2 - Cenizas Volantes

Las cenizas volantes (CV) son residuos sólidos provenientes de la combustión de materiales como el carbón, pet-coke, madera, de la incineración de residuos sólidos urbanos y de procesos de fundición (Moreno, 2002). De acuerdo a la norma europea EN 450 las cenizas volantes se definen como granos de polvo fino, compuesto por partículas vítreas esféricas (ECOBA, 2006). El hecho de ser muy ligeras y de pequeño tamaño (0,5-100µm) las hace susceptibles al arrastre por el flujo de los gases exhaustos de la combustión. Por lo que conlleva a la necesidad de eliminar las cenizas volantes de la corriente gaseosa por medio de procesos de separación como ciclones, filtros mangas o precipitadores electroestáticos.

La composición de cenizas volantes de 03 diferentes procedencias, se presenta en la tabla 06 a seguir:

Procedencia ceniza	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
Combustión de madera <sup>(1)</sup> %	25	2	2	40	5
Combustión de pet-coke <sup>(2)</sup> %	2-12	0,3	-	44	3
Combustión del carbón <sup>(3)</sup> %	59	27	7	0,8	1,0

Tabla 06 – Comparación de cenizas volantes generadas por 03 combustibles sólidos  
Fuente: 1: Demeyer et al., 2001; Comisión Europea, 2006; 2006; De Souza K., 2006; 2: Thenoux et al., 2007; 4: Moreno (2002).

Desde la década del 50 el uso principal que se le ha otorgado a las cenizas volantes es en la industria del cemento y del hormigón (Querol et al., 2002; ECOBA, 2006), principalmente en la construcción de obras civiles, muros de embalses, arrecifes coralinos artificiales entre otros. Sin embargo este campo de aplicación no puede asimilar toda la ceniza volante generada, ya que no toda cumple con las especificaciones ASTM C618 (Guth, 2005).

El efecto benéfico de la ceniza de madera como fertilizante se procede en el suelo como resultado de su composición química y solubilidad, y se puede comparar a la aplicación de una fórmula NPK 1:3:7, más Ca, Mg y micronutrientes (Nolasco et al. 1999). Según Moro y Gonçalves (1995), muchas investigaciones han demostrado la importancia de la aplicación de cenizas de madera en el suelo como incremento de su fertilidad, nutrición mineral y productividad de los bosques.

Actualmente, se presenta gran necesidad de desarrollo de estudios e investigaciones en cuanto al uso de residuos de biomasa vegetal para la producción de madera en bosques (Dallago, 2000).

Las cenizas de madera se pueden aprovechar en el campo, como correctivos de la acidez del suelo, por presentar en su composición química, nutrientes y bases cambiables (VIEIRA, 2012).

La producción y comercialización de sílice, obtenido a través de las cenizas volantes de la quema de la cáscara de arroz es efectivamente conducida por una generadora de energía en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil. El producto (sílice) es empaquetado y comercializado para empresas de producción de materiales cerámicos y para la industria de construcción civil. De esa manera, hay una gran reducción de disposición de la ceniza en el suelo, se eliminan operaciones que

serían necesarias para la disposición y todos sus efectos ambientales, además de los efectos ambientales potenciales en el suelo y en el agua de los materiales dispuestos y se agrega valor comercial al residuo producido.

### 5.3 - Cenizas de Fondo

En acuerdo con The Confederation of European Waste-to-Energy (CEWEP, en inglés, 2011), conjunto de metales de cenizas de fondo pueden ser una contribución importante para mayor eficiencia de los recursos en Europa. El Packaging Group de la Asociación Europea del Aluminio (EAA en inglés), junto con la CEWEP, estimaron que, en toda Europa, más de 200.000 toneladas de aluminio puede ser reciclada por año, a través de las cenizas de fondo lo que llevó a más operadores locales a invertir en el derecho de equipos de separación para las cenizas y condujo a los estados miembros a mayores exigencias en cuanto a la disposición de las cenizas en vertederos.

Las cenizas de fondo podrán ser utilizadas como reemplazo de parte de los áridos que se ocupan en la fabricación de productos prefabricados de hormigón, como solerillas, apoyos y soleras. También es posible incorporarlas en la fabricación de carpetas asfálticas de tráfico medio (Castaño, 2010).

Nail et. al (2001), realizaron tests con cenizas de fondo, generados por quema de madera, que indicaron su aceptabilidad para sustituir parcialmente el uso de arena hormigón premezclado y/o reemplazar agregados gruesos y finos en productos de concreto como ladrillos, bloques y piedras para pavimentación debido a su gradación gruesa.

En EE.UU., el uso de cenizas de fondo como material de relleno de terraplenes y como base y sub-base de carreteras está muy extendido y en Europa también se opta por esta vía.



**Imagen 11 - Ejemplo de una barrera sonora construida en Holanda, con cenizas de fondo**

**Fuente: Confederation of European Waste-to-Energy Plants, 2011.**

Hay informaciones del uso de cenizas como barrera de sonidos, que suele presentar un aspecto natural a lo largo de las autovías, como la que se encuentra en la A12 en De Meern con 12 kilómetros de extensión, y sus bases de construcción son de cenizas de fondo (imagen 11).

Durante las visitas a las empresas, en conjunto con técnicos de PROBIO y de DINAMA, se incentivó la realización de análisis de las cenizas volantes y de fondo, para que se pudiera empezar estudios sobre las posibilidades efectivas para el uso de cantidades de cenizas que lleven a una mayor y considerable reducción de su disposición y al mismo tiempo, su disposición adecuada en términos de su composición química y sus potenciales efectos al suelo y al agua.

## VI - Complementaciones

### 6.1 - Aplicabilidad de metodologías de reporte y control utilizadas en otros países al sector energético nacional.

La reglamentación de las emisiones atmosféricas utilizada en otros países es aplicable a Uruguay, por tanto que se consideren en el momento actual principalmente las necesidades apuntadas en cuanto a la modelación, la certificación de equipamientos.

Un tema que también hay que considerar es la no disponibilidad en Uruguay de mezclas estándares para muchos compuestos orgánicos volátiles, lo que conlleva a la imposibilidad, por ejemplo, de analizar cada uno de esos gases que potencialmente los ductos de secado de las materias primas pueden emitir, y en eso, el secado de materiales con tratamientos como impermeabilizantes, pegamentos y otros.

En acuerdo con los medios actuales, unas cuantas de las proposiciones para control de las empresas que realizan emisiones presentadas en este informe y que se practican en otros países, no podrían ser implementadas por la agencia reguladora, por no haber posibilidad para que lo haga, ya sea por el número de técnicos en emisiones atmosféricas y calidad del aire; disponibilidad de herramientas para su exigencia o ejecución (caso de la modelación de dispersión), y también por

la falta de proveedores de servicios relacionados a esos temas, con posibilidad efectiva de brindarlos.

#### a) Metodologías de Reporte

Las metodologías de reporte en términos de emisiones atmosféricas utilizadas en otros países en el momento actual, no son totalmente aplicables a Uruguay principalmente en lo que se refiere a las calibraciones y certificaciones de los equipos para muestreo en chimeneas, información necesaria en los reportes en muchos países. Eso considerando que todavía no hay una institución encargada nacionalmente en Uruguay, por las certificaciones de calibraciones de equipamientos para esa finalidad.

También se puede presentar, que entre otros reportes en emisiones atmosféricas y calidad del aire, los estudios de impacto de emisiones atmosféricas incluyen la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos con salidas gráficas y posibilidad de inclusión de informaciones sobre el terreno, lo que permite información sobre puntos para muestreo en calidad del aire, conocimiento de las inmisiones generadas (su localización y su concentración), permitiendo planear aplicar y gestionar herramientas de reducción y abatimiento de emisiones atmosféricas.

#### b) Metodologías de Control

Una vez que en Uruguay se utilizan las mismas tecnologías utilizadas en otros países tanto para procesos como para el abatimiento y control de emisiones atmosféricas en las empresas de producción de energía a través de la quema de biomasa, es posible aplicar las mismas metodologías de control.

Hay que considerar los límites de emisiones existentes en países como Brasil, tanto federales como estatales. Éstos últimos no pueden superar a los primeros. Muchas agencias ambientales estatales aplican límites inferiores a los de nivel federal.

La necesidad de aumentar el número y dimensión de equipamientos para abatimiento así como el uso de combinaciones de tecnologías de captación de emisiones atmosféricas solamente podrá ser estudiada una vez que se tengan

informaciones efectivas de las emisiones a través de chimeneas, en las industrias involucradas en el tema.

## VII – Bibliografía Consultada y Recomendada

Ahmaruzzaman, M. 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 327-363.

Bramryd, T., Fransman, B. 1995. Silvicultural use of wood ashes - effects on the nutrient and heavy metal balance in a pine (*Pinus sylvestris*, L) forest soil. *Water, Air and Soil Pollution* 85, pp 1039–1044.

Biedermann, F., Obernberger, I., Ash-related Problems during Biomass Combustion and Possibilities for a Sustainable Ash Utilization. Austrian Bioenergy Centre GmbH. Graz, Austria. Disponible en: < <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Biedermann-AshRelated-2005-10-11.pdf>>.

Bradley, M.J. & Associates, Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) de América del Norte, Mejor tecnología disponible para el control de la contaminación atmosférica en América del Norte: directrices para el análisis y estudios de caso, Montreal, Quebec – Canadá, 2005.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, do Ordenamento Territorial e do Desenvolvimento Regional, Decreto-Lei n.º 183/2009.  
<<http://dre.pt/pdf1s/2009/08/15300/0517005198.pdf>>

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, do Ordenamento Territorial e do Desenvolvimento Regional, Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA  
< <http://www.mma.gov.br/port/conama/>>

CANADA, Alberta Environment, Standards and Guidelines for the Use of Wood Ash as a Liming Material for Agricultural Soils, July 2002.< <http://www.gov.ab.ca/env/>>

Comisión Europea 2006, Calefacción de grandes edificios con biomasa, Aspectos técnicos básicos <<http://www.ALTENER.com>>

Confederation of European Waste-to-Energy Plants. Brussels, 14 December 2011

DALLAGO, J. S. Utilização da cinza de biomassa de caldeira como fonte de nutrientes no crescimento de plantas de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). 2000. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

Demers, P., Teschke, K. ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO (71.7), Disponible en:  
<<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/71.pdf>>

Campanharo, M.; Monnerat, P.H.; Ribeiro, G.; Pinho, L.G. da R., UTILIZAÇÃO DE CINZA DE MADEIRA COMO CORRETIVO DE SOLO. Universidade Estadual do Norte Fluminense, RJ.

Dafico, D. A., MÉTODO DE PRODUÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ PARA UTILIZAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO, UFSC, Florianópolis, 2001.

Castellanos, P.R, et al., Energías y Cambio Climático, Ediciones Universidad de Salamanca, Salamanca, 2008, 417p.

De Souza K.(2006). Utilización de cenizas procedentes de plantas incineradoras de RSU como material constituyente de hormigones de relleno, Tesis doctoral en la Universidad Politécnica de Madrid

Demeyer A.(2001). Characteristics of Wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. Bioresource Technology vol 77:287-295

ECOBA, European Coal Combustion Products Association (2006). Disponible en: <<http://www.ecoba.com>>

Etiégni, L., Campbell a. G., 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. Bioresour. Technol.37, pp 173 - 178.

ESPAÑA, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Sistema Español de Inventarios, SNAP Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera 1990-2011. Volumen 2: Análisis por Actividades, CAPÍTULO 1: COMBUSTIÓN EN LA PRODUCCIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA <<http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/volumen2.aspx>>

FERM, A., HOKKANEN, T., MOILANEN, M., ISSAKAINEN, J., 1992. Effects of wood bark ash on the growth and nutrition of a Scots pine afforestation in central Finland. Plant Soil 147, 305-316.

Francescato, V., Antonini, E., Bergomi, L.Z., Wood fuels Handbook, European Biomass Association, Ed. Italian Agriforestry Energy Association, Legnaro, IT. 2008. Disponible en: <[http://www.aebiom.org/IMG/pdf/WOOD\\_FUELS\\_HANDBOOK\\_BTC\\_EN.pdf](http://www.aebiom.org/IMG/pdf/WOOD_FUELS_HANDBOOK_BTC_EN.pdf)>.

Fundación CONFEMETAL, Enciclopedia de Medio Ambiente, FC Editorial, 133p. Madrid, 2002

Granström, K., Emissions of volatile organic compounds from wood, Division for Engineering Sciences, Physics and Mathematics, Department of Environmental and Energy Systems, Karlstad University Studies, Karlstad, Sweden, 2006.

Generalitat de Catalunya, Comisión Interdepartamental del Cambio Climático, GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI), Marzo 2011.

Gobierno Vasco, Guía Técnica para la Medición, Estimación y Calculo de las Emisiones al Aire, IHOBE Sociedad Publica de Gestión Ambiental, Noviembre 2005.

Gonçalves, J. L. M., Moro, L., Uso de cinza de biomassa florestal como fonte de nutrientes em povoamentos puros de *Eucalyptus grandis* e avaliação financeira. IPEF, Piracicaba, n. 48-49, p. 18-27, 1995

GUERRINI, I. A.; MORO. L.; Influência da aplicação de resíduos industriais de fábrica de celulose e papel em plantios de eucalipto: influência no solo e na planta. In: GUERRINI, I. A.; BELLOTE, A. F. J.; BULL, L. T., ed. Seminário sobre uso de resíduos industriais e urbanos em florestas. Botucatu. Fundação de Estudos e pesquisas Agrícolas e Florestais – FEPAF / UNESP, 1994. p. 189-215.

Guth G. (2005). Experiencias del sector privado sobre la gestión integral de las cenizas de coque de petróleo. Seminario Gestión Integral de cenizas generadas por utilización de coque de petróleo. Universidad de Concepción.

KAHL J.S., FERNÁNDEZ I.J., LINDSEY E.R., PECKENHAM J., 1996. Threshold application rates of Wood ash to an acidic forest soil. *J. Environ. Qual.* 25, 220-227.

Hoff, C.S, Metodologia de Análise de Dioxinas em Cinzas da Incineração de Couro WetBlue, UFRGS, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2002.

Hoffmann, R., Jahn, S. L., Bavaresco, M., Sartori, T. C., Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Santa Maria, RS

Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos (Sevilla), CENTRO DE INVESTIGACION CONJUNTA, Oficina Europea de IPPC Sostenibilidad en Industria, Energía y Transporte, Prevención y Control Integrado de la Contaminación, Documento de Referencia sobre Mejores Técnicas Disponibles para Incineración de Resíduos, Agosto de 2006.

KAHL J.S., FERNÁNDEZ I.J., LINDSEY E.R., PECKENHAM J., 1996. Threshold application rates of Wood ash to an acidic forest soil. *J. Environ. Qual.* 25, 220-227.

Kopecky, M.J., Meyers, L. N., Wasco, W., Using industrial wood ash as a soil amendment, Cooperative Extension Publications, N. Murray St. Madison, WI.

Koppejan, J., and van van Loo, S. (ed.), *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, ed. Routledge, Chippenham, UK.2012, 464p.

Lisboa, H.M., Schirmer, W.N., *Controle da Poluição Atmosférica*, Unidade VII, Montreal, 2007

MEHTA, P.K., Rice husk ash - A unique supplementary cementing material. In: *Advances in concrete technology*. CANMET. Ottawa, 1992, p. 407-431

Meiwes, K.J. 1995. Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water Air Soil Pollut.*;85, pp 143 -152.

Melissari, B. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, núm. 10 (2012) ISSN 1510-7450 • ISSN (en línea) 1688-9584, 2012.

Moreno N.(2002).Valorización de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa. Aplicaciones ambientales. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña.

NOLASCO, A. M.; GUERRINI, I. A. BENEDETTI, V. Uso de resíduos urbanos e industriais como fontes de nutrientes e condicionadores de solos em plantios florestais. In: Simpósio de fertilização e Nutrição Florestal, Piracicaba, 1999.

Natalia Fernández Castaño, 2010, PLANTAS DE BIOMASA, < <http://limpiezastecnicasindustriales.com/plantasdebiomasa.pdf>>

Pardo, A., Luxán, M. P., NORMALIZACIÓN ESPAÑOLA SOBRE CENIZAS VOLANTES (NORMAS UNE), Informes de la Construcción, Vol. 39 n.º 394, marzo/abril, 1988.

Pimenta, L. Compostos Orgânicos Voláteis Produzidos por Fungos Associados à madeiras em Decomposição r Tóxicos Patógenos de Importância Florestal e Agronômica, Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG, 2007.

Pita, P.V.V., VALORIZAÇÃO AGRÍCOLA DE CINZA DA CO-COMBUSTÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOMASSA LENHOSA, Universidade de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2009.

Querol X., Moreno N., Umaña J.C., Alastuey A., Hernández E., López-Soler A. and Plana F.(2002). Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. International Journal of Coal Geology 50:413-423.

Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Rio Grande do Sul, Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM, < <http://www.fepam.rs.gov.br/>>

**SAITER, O. Utilização de resíduos agrícolas e florestais como fonte de energia para a secagem de grãos de *Coffea canephora* var. Conilon.** 2008. Monografia (trabalho de conclusão do curso de Engenharia Florestal) Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro:2008.

Srinath, S., Reddy G.V., Combustion and Emission Characteristics of Rice husk in a Rectangular Fluidized Bed Combustor, 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, IPCBEE vol.6 (2011) © (2011) IACSIT Press, Singapore, 2011.

Supancic, K. et Obernberger, I., Wood Ash Utilization as a Stabilizer in Road Construction, First Results of Large Scale Tests. Austrian Bioenergy Centre GmbH. Graz, Austria. Disponible en: < <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Supancic-Ash-Utilizationin-Road-Construction-2011-06-06.pdf>

Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus, and Rakesh Kumar WOOD ASH: A NEW SOURCE OF POZZOLANIC MATERIAL June 2001 Department of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science For presentation and publication at the ACI Maharastra Chapter, Mumbai, India, July 2001

Uruguay, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, División Nacional Medio Ambiente, Propuesta de Estándares de emisiones gaseosas de fuentes fijas - Grupo Gesta Aire. Disponible en:

<<http://www.mvotma.gub.uy/sustancias-quimicas-restringidas-yo-prohibidas/item/10003099-propuesta-de-est%C3%A1ndares-de-emisiones-gaseosas-de-fuentes-fijas-grupo-gesta-aire.html>>

Uruguay, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, División Nacional Medio Ambiente, PROPUESTA ESTANDARES CALIDAD DE AIRE GRUPO GESTA AIRE. Disponible en:

<  
[http://www.ciu.com.uy/innovaportal/file/42609/1/gesta\\_aire\\_web\\_dinamica\\_calidad\\_aire.pdf](http://www.ciu.com.uy/innovaportal/file/42609/1/gesta_aire_web_dinamica_calidad_aire.pdf)>

US EPA 452/B-02-002, Sección 06, Controles de Materia Particulada, Capítulo 3 Precipitadores Electroestáticos

< <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs6ch3-s.pdf>>

US EPA - Operation and Maintenance Manual for Electrostatic Precipitators

<<http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/20008QN4.pdf>>

US EPA Combined Heat and Power Partnership, *Biomass CHP Catalog*, Biomass Conversion Technologies

U. S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership, Biomass Combined Heat and Power, Catalog of Technologies v.1.1, 2007. Disponible en: < [http://www.epa.gov/chp/documents/biomass\\_chp\\_catalog.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/biomass_chp_catalog.pdf)>

US EPA 452/B-02-002 Sección 6, Controles de Materia Particulada, Triangle Park, Septiembre de 1999.

Van Loo, S and Koppejan, J. Handbook of Combustion and Co-Firing, 2010.

VANCE E.D., 1996. Land application of wood-fired and combination boiler ashes: an overview. J. Environ. Qual. 35, 937-944.

VIEIRA, A. C. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. Cascavel-PR. 72 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, UNIOESTE. 2012.

Wardoyo, A.Y.P., Biomass Burning: Particle Emissions, Characteristics, Airborne and Measurements, Queensland University of Technology, School of Physical and Chemical Sciences, Queensland, Australia, July 2007.

WERTHER J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in energy and combustion science**. Alemanha: Pergamon, v.26, p. 1-27, 2000.

Wood fuels Handbook, 2008.

## ANEXO I

### ADAPTACIÓN DE CHIMENEAS A LAS CONDICIONES DE MUESTREO

#### 5.1.1 - Definiciones y Conceptos Importantes

##### *a) Altura mínima de chimeneas*

Ej. Normativa SEMA 054/06 establece en su artículo 8º como estándar de condicionamiento de fuentes estacionarias una altura mínima para garantizar una buena dispersión de las emisiones.

Los criterios adoptados determinan:

- 3 metros arriba de las edificaciones de su instalación;
- altura física de la chimenea deberá ser determinada en acuerdo con la tasa de emisión del contaminante crítico y de la elevación de la pluma;
- 5 metros arriba de la altura de la residencia más alta en un radio de 300 m o en un radio de 30 x la altura de la chimenea.

##### *b) Selección del sitio de medición*

- la toma de muestra o la medición de velocidad de salida de las emisiones se realiza en un sitio localizado al menos ocho (8) diámetros de chimenea “arriba” (en el sentido del flujo) y dos (2) diámetros “abajo” (en el sentido del flujo) de cualquier perturbación tal como una curva, una expansión o contracción, de la chimenea o una llama visible (imagen i);

##### *c) Localización para la inserción de la sonda*

- en acuerdo con la normativa EPA 1 (imagen ii);

##### *d) Métodos US EPA*

Método 1 – Determinación de ocales y puntos de muestreo.

Método 2 – Determinación de la velocidad y del caudal

Método 3 – Determinación del aire en exceso y peso molecular en base seca

Método 4 – Determinación de la humedad de los gases.

Método 5 – Determinación de las emisiones de material particulado en fuentes estacionarias

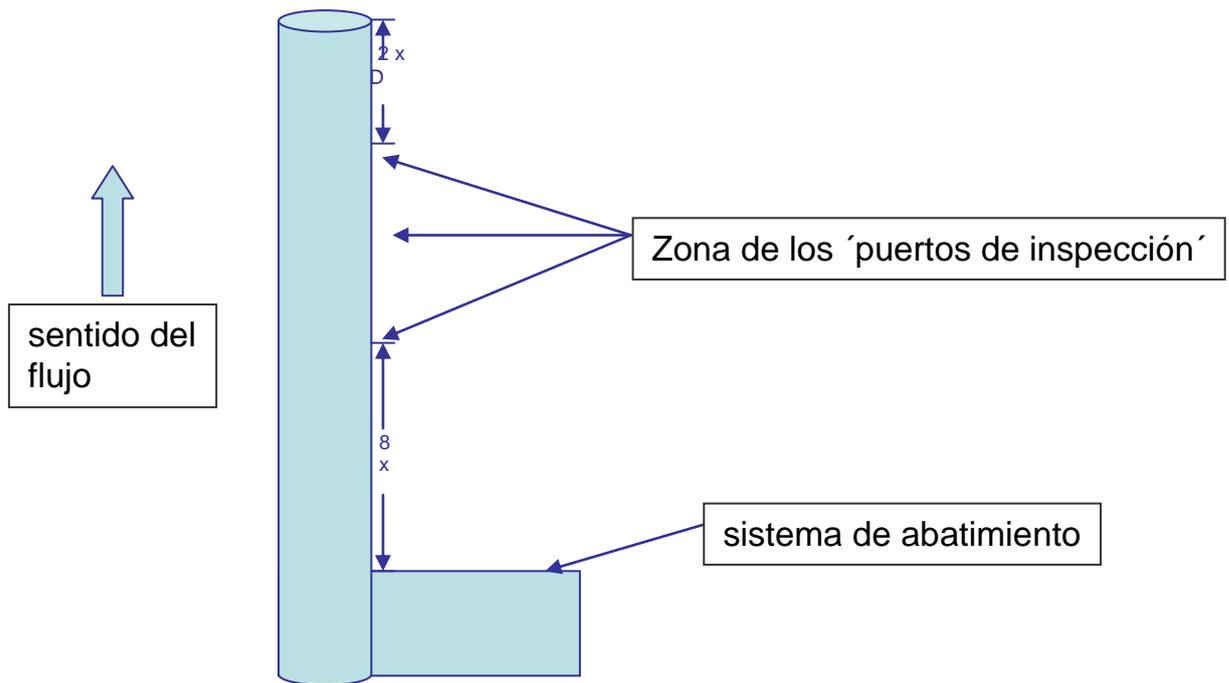


Imagen i: Localización del sitio de muestreo

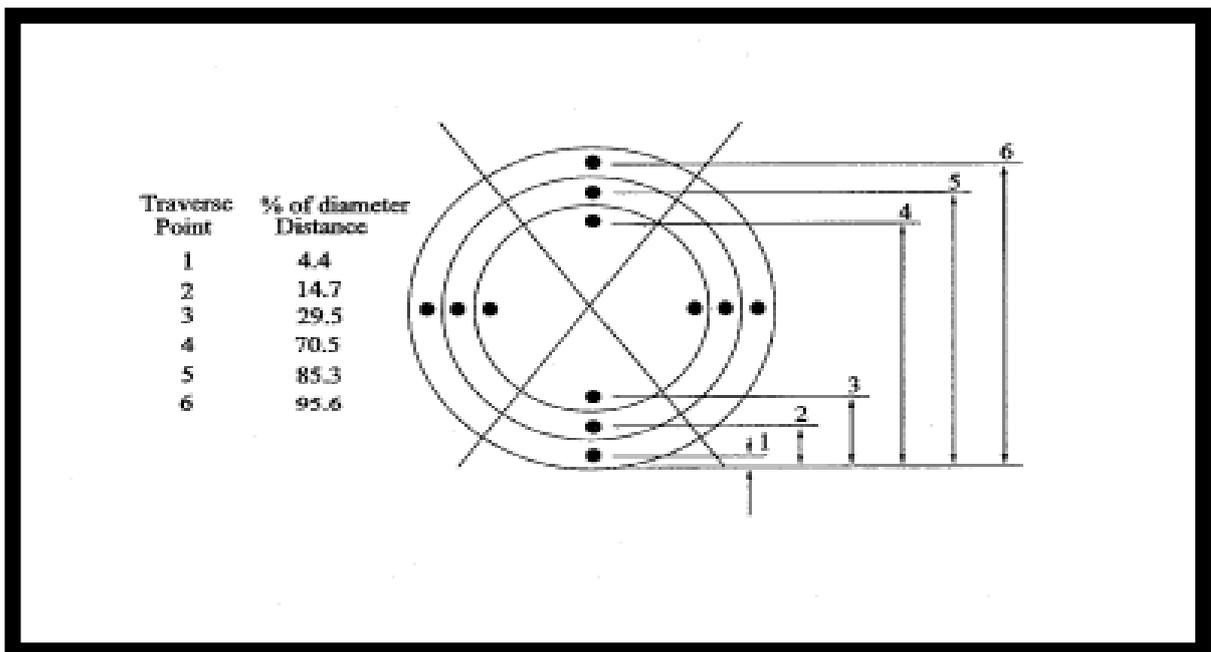


Imagen ii: Inserción de la sonda de muestreo

e) acondicionamiento de los puertos de muestreo

Los puertos de muestreo deberán ser acondicionados en acuerdo con las imágenes iii, vi y vii;

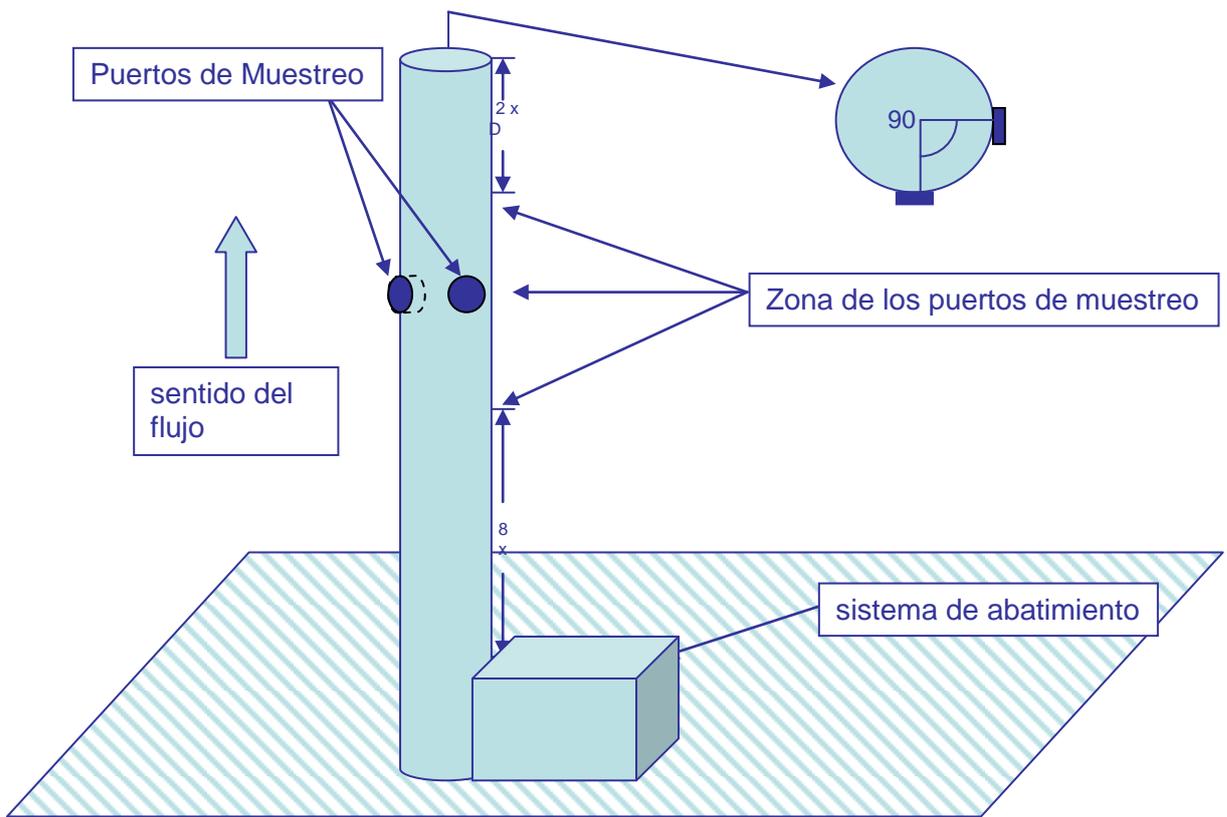


Imagen iii: Puertos de muestreo

f) Plataformas para muestreo

En acuerdo con las imagenes iv, v, vi y vii

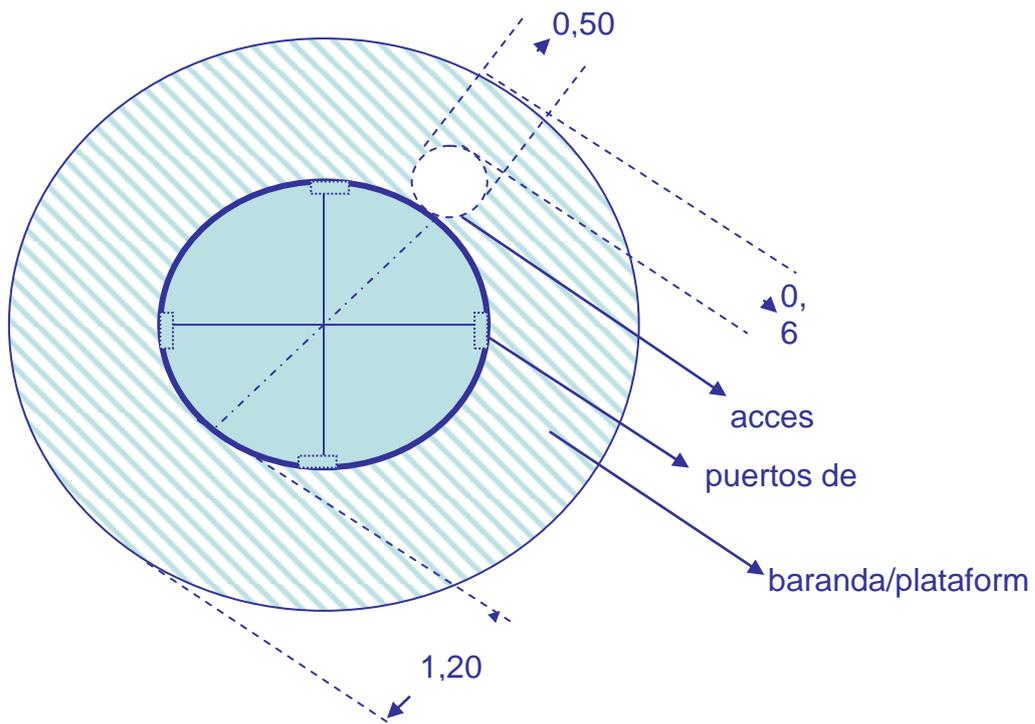


Imagen iv: plataforma en chimenea

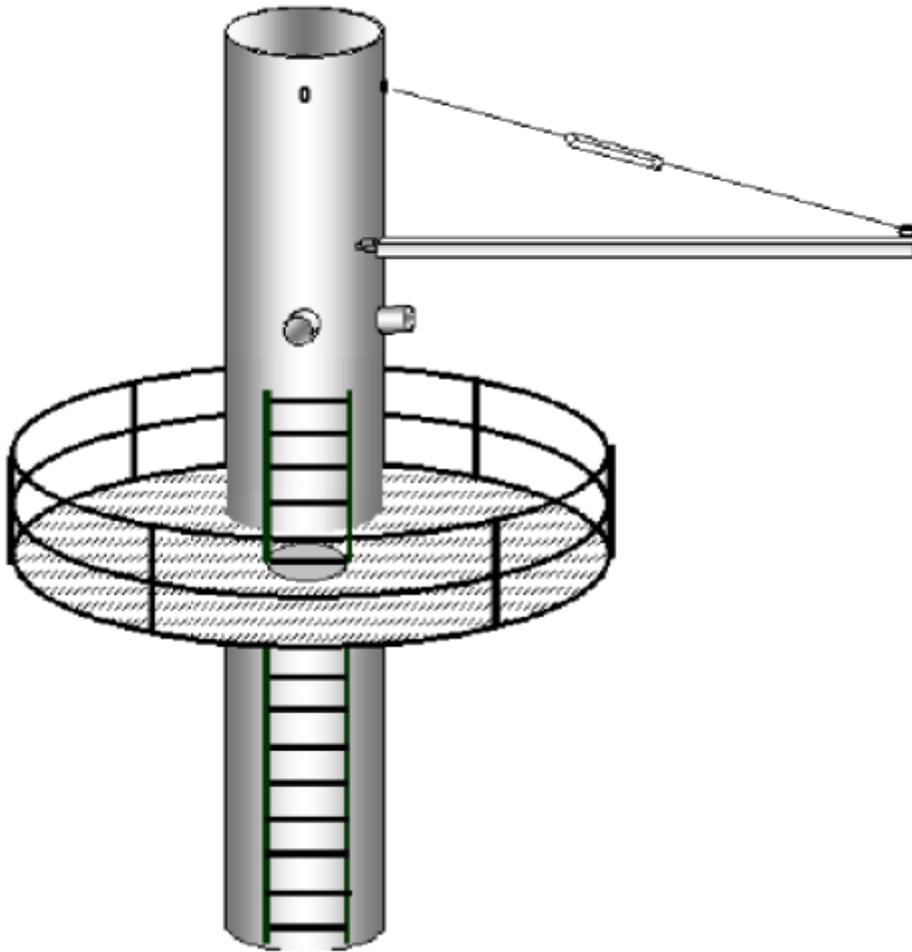


Imagen v: plataforma en chimenea

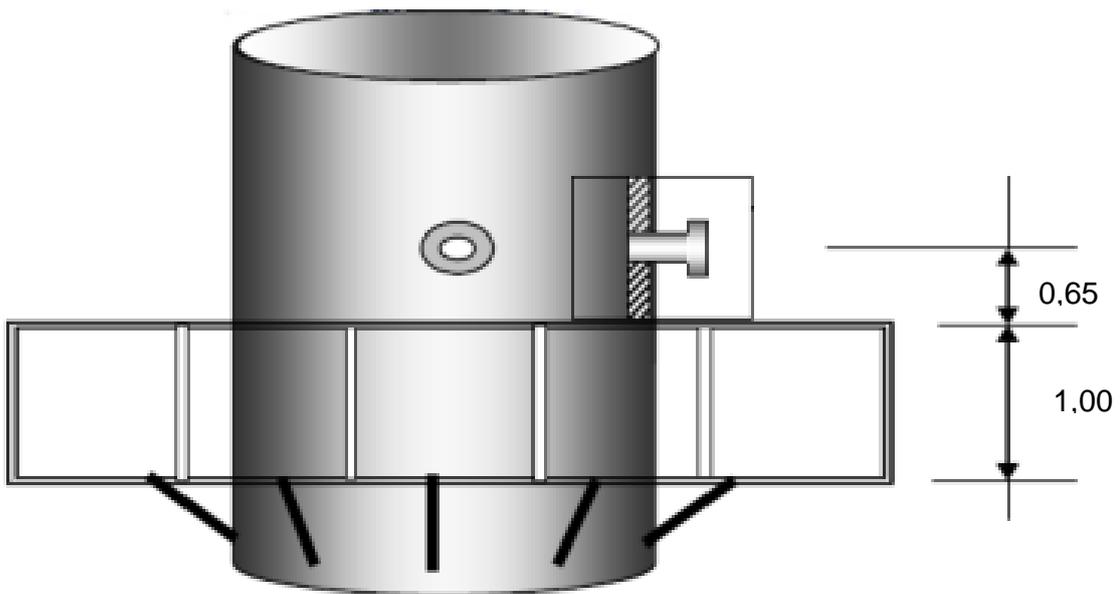


Imagen vi: puerto y plataforma

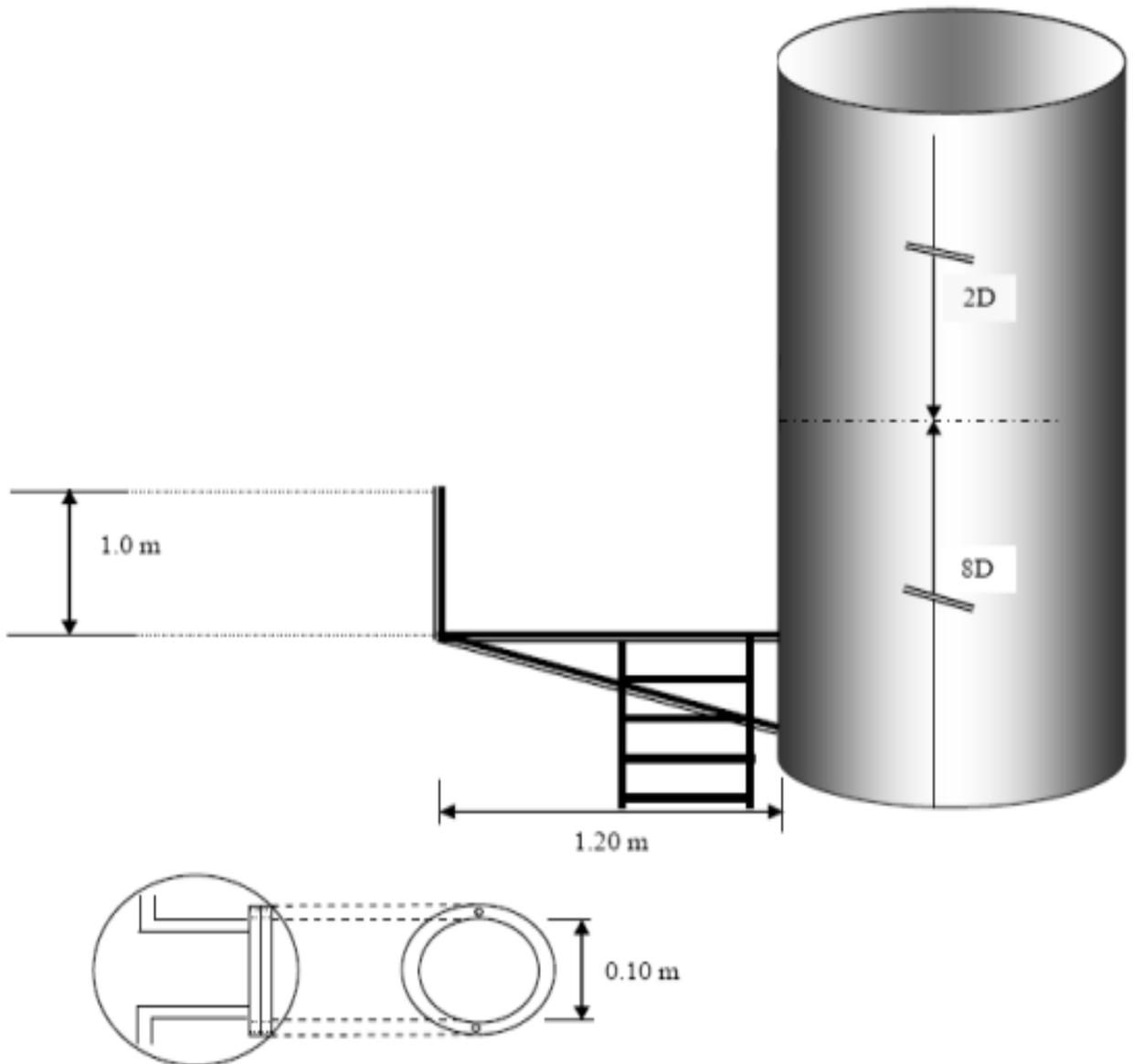


Imagen vii: detalles plataforma, puerto y localización de los puertos