

## ANEXO 3

# MEMORIA DE CÁLCULO DEL SISTEMA DE ABATIMIENTO



## **PROYECTO CONTROL DE EMISIONES CALDERA DE VAPOR PLANTA PROMASA**

**Cliente Mandante: director Gerente Sr. Manuel Pauvif**

**Realizador del Estudio: Oscar Hidalgo Diaz**

**Ing. Civil Mecánico**

**Especialista en Combustión y Control de Emisiones**

**Agosto 2021**

## **SUMARIO**

Planta Promasa ubicada en Panamericana ubicada en la ciudad de Los Ángeles, posee para su proceso de secado de madera, dos calderas para producir vapor de baja presión, las cuales utilizan biomasa como combustible

Estas Calderas cuentan parcialmente con equipos de abatimiento, por tanto, el flujo de gases generado en la caldera pasa parcialmente filtrado a la chimenea a través del ventilador de tiro inducido, situación que genera un arrastre de particulado, producto de la combustión, que no permite cumplir con la normativa medioambiental vigente.

La concentración de material particulado en este proceso de combustión está en torno a los 450 mg/Nm<sup>3</sup>-seco, los que se consideran valores altos frente a la normativa vigente, situación que demanda contar con mecanismos mucho más eficaces para lograr un nivel de captura adecuado

La situación operativa de las calderas, permite visualizar que existen oportunidades de mejora, en cuanto la necesidad de incorporar equipos auxiliares adecuados para controlar las emisiones, siendo este el principal objetivo del presente proyecto cumplir con las condiciones exigidas por la norma en términos de no sobrepasar los valores de 30 mg/m<sup>3</sup> establecidos.

Para dicho objetivo el proyecto contempla la incorporación de nuevos equipos, los cuales se detallan a continuación

- Un Ciclón de alta eficiencia
- Un depurador tipo Venturi con inyección de agua atomizada
- Una torre ciclón depuradora con un eliminador de niebla.

El cálculo, diseño y dimensionamiento del nuevo sistema, estará basado en el flujo de gases generado en el proceso de combustión de la Caldera

Lo más relevante de este Proyecto, es que, junto con permitir capturar el material particulado fino para bajar las emisiones PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> será como se indicó anteriormente, es cumplir con lo señalado en la norma medioambiental, cuyo valor es menor a 30mg/m<sup>3</sup>

## **DESCRIPCION DEL SISTEMA DE ABATIMIENTO DE EMISIONES PROPUESTO**

### **1. Conceptualización del Proyecto.**

Planta PROMASA S.A. Los Ángeles posee para su proceso de secado de madera dos calderas de vapor ignetubulares con antehogar húmedo (mixto), las cuales usan como combustible biomasa, cuyas características se especifican a continuación:

<b>Tabla N°1. información general de las calderas</b>				
Identificación de las calderas		Fabricante	Capacidad	Año de fabricación
N°1: SSBIO-138	N°2-SSBIO-139	H. Briones	15 ton/hr	1988

Dadas las características de diseño y funcionamiento operacional de las calderas, las emisiones de material particulado expelido por ambas calderas son altas, excediendo el límite del Plan de Descontaminación de Los Ángeles, y desde luego los valores límites establecido por el Decreto 138 de la Norma Medioambiental. Lo anterior deriva del proceso normal relacionado con el tipo de combustible quemado.

Actualmente ambas calderas poseen como medio de captura de particulado un multiciclón, equipo que es insuficiente para lograr los niveles de abatimiento requerido

### **2. Nivel de emisión de particulado**

Los valores medidos se resumen en la siguiente tabla siguiente.

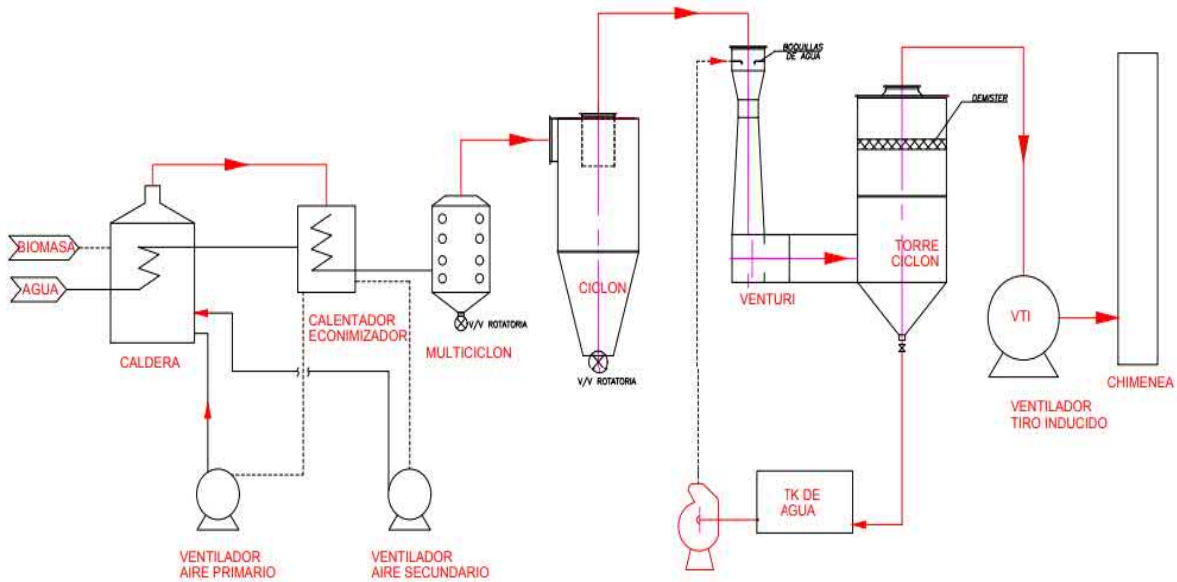
<b>Tabla N°2, Emisiones de las calderas</b>				
MPT	Caldera 1	Caldera 2	PDA Los Ángeles	Decreto 138
Mg/m <sup>3</sup> N @ 6% O <sub>2</sub>	467	443	50	< 50 < 30

### **3. Descripción del sistema de abatimiento del proyecto:**

A continuación, se describe los componentes del nuevo sistema de control de emisiones de particulado, el cual cuenta con los siguientes equipos:

- Un ciclón de alta eficiencia
- Un captador de particulado Tipo Venturi
- Una Torre tipo ciclón con atrapador de gotas
- Bomba de agua para boquillas de aspersión en el venturi
- Estanque receptor de agua de nebulización
- Boquillas de agua de nebulización

Oscar Hidalgo D.  
**PROYECTO SISTEMA DE ABATIMIENTO DE EMISIONES**



**Fig.1. Sistema de depuración Propuesto**

**4. Objetivos a lograr:**

- Con la incorporación de los nuevos equipos, se espera un nivel de captura de particulado de hasta un 99%
- Con la incorporación de los nuevos equipos, se espera un nivel de captura de particulado PM10  $\mu\text{m}$  y PM 2,5  $\mu\text{m}$
- Permitirá estar bajo 30 mg/m<sup>3</sup>, lo que permitirá cumplir con el Plan de Descontaminación impulsado por la autoridad de Medioambiente

Oscar Hidalgo D.  
**PROYECTO SISTEMA DE ABATIMIENTO DE EMISIONES**

## 5. Comparación de tecnologías de control de particulado

A continuación, se describen las distintas alternativas y mecanismos posibles de implementar para lograr el control del particulado, de acuerdo a lo requerido por la norma de emisiones

<b>CUADRO 1. COMPARATIVO DE LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS POSIBLES</b>			
<b>Nº</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
1	Multiciclón Vertical	Bajo Rendimiento, costo de mantenimiento moderado a alto	Muy baja eficiencia de recolección (50% 70%). Alto consumo energético, eficiencia variable
2	Multiciclón + Filtro de mangas	Cumple la norma, sin rotura de bolsas	Bolsas fallan con frecuencia, alto costo de reposición y emisión de particulado
3	Scrubber (Captura con agua)	Costo inicial medio (1 a 2)	Eficiencias variables, consumos de agua altos
5	Precipitador electrostático	Cumplimiento de norma (sin falla electrónica)	Alto costo inicial, alto nivel técnico de operadores y mantenedores, alto costo de mantenimiento, alto costo energético. Requiere de un bajo contenido de CO2
6	Multiciclón axial con extracción de ceniza por eyectores tipo Venturi	Costo inicial menor a (2,4 y 5). Eficiencia mayor a (1 y 3). Cumple norma- 150 mg/m3. Permite control de eficiencias variando inyección de agua, consumiendo <20% de (3)	No logra cumplir control de emisiones para 50 Mg/m3
7	Combinación de Ciclón de alta eficiencia con Venturi e Hidrociclón	Permite cumplir con todos los parámetros logrados con los equipos del Ítem 6, pero además con mayor capacidad de captura de P.M.	Alta eficiencia, logra cumplir control de emisiones para 30 Mg/m3 y captura de PMA hasta 2,5 µm

## 6. Elección de la alternativa de sistema de abatimiento

- Basado en lo anterior, el diseño elegido contempla la instalación de un ciclón de alta eficiencia con entrada tangencial y descarga axial, de acuerdo a lo que se muestra en la figura 8. El particulado será retirado por la parte inferior a través de una válvula rotatoria

## PROYECTO SISTEMA DE ABATIMIENTO DE EMISIONES

- Este tipo de ciclón es el de más alta eficiencia de recolección variando las dimensiones estándar
- En el ciclón los gases resultantes de la combustión son forzados a seguir un movimiento que ejerce fuerza centrífuga sobre las partículas y las dirige a las paredes del ciclón decantando a la parte inferior. Los gases filtrados son expulsados por la parte superior de la cámara, pasando por un espiral de flujo ascendente o vórtice formado por una espiral que se mueve hacia abajo, tal como se ilustra en la figura 9.
- Los ciclones individuales de alta eficiencia pueden remover partículas de 5  $\mu\text{m}$  con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes.

Los ciclones individuales de alta eficiencia como el considerado en este proyecto están diseñados para alcanzar un mayor control de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales.

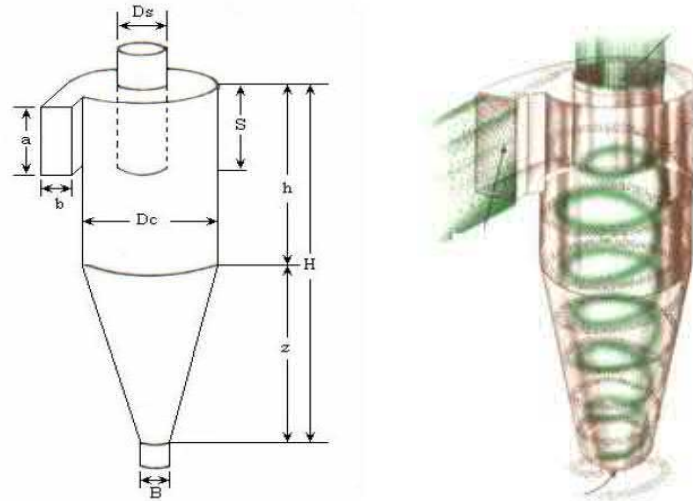
Los rangos de eficiencia de control de los ciclones individuales de alta eficiencia son de 80 a 99% para MP; de 60 a 95% para MP10 y de 20 a 70% para MP 2.5.

El diseño de Ciclón de alta eficiencia combinado con Venturi, se enmarca dentro de lo recomendado por el estado del arte en materia medioambiental

Generalmente, los ciclones por sí solos no son suficientes para cumplir con las reglamentaciones más estrictas en materia de contaminación del aire, pero tienen un propósito importante como pre-limpiadores antes del equipo de control final, tal como el Venturi incorporado en el proyecto.

Esta es la razón por la que en este proyecto se ha usado dicha combinación ya que el Venturi si permite capturar particulado hasta 0,5  $\mu\text{m}$

Este tipo de ciclones funcionan con fuerzas inerciales al hacer cambiar de dirección el flujo del gas. El gas al entrar al ciclón, es forzado en un flujo circular. Las partículas de mayor tamaño se separan del flujo por inercia, golpean la pared interior del separador, luego caen por gravedad y son acumuladas en la tolva inferior. Finalmente, el flujo pasa por un ducto interior llamado comúnmente vortex Finder, en el cual las partículas de menor tamaño logran caer, debido al menor diámetro.



**Figura 2. Ciclón simple: (a) entrada tangencial y descarga axial**

### 6.1. Depurador Venturi:

El Venturi-Scrubber cumple con las exigencias medioambientales para la captura de material particulado

Un depurador tipo Venturi, se beneficia del aumento en la velocidad de la corriente gaseosa en la sección más estrecha del tubo, para mejorar el contacto entre el gas y el líquido (agua), debido a la atomización de esta última. Posteriormente, la velocidad del fluido se reduce, y la mezcla de partículas y agua tiende a aglomerarse, siendo finalmente separada de la corriente gaseosa por medio de un eliminador de niebla.

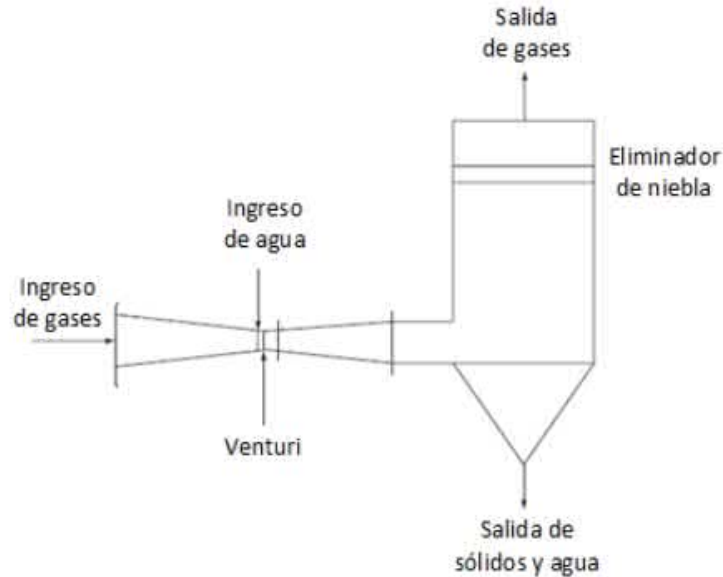
En definitiva, estos sistemas usan un flujo líquido para remover partículas sólidas. En ellos el gas resultante de la combustión, cargado con material particulado pasa por un tubo corto con extremos anchos y una sección estrecha.

Esta constricción hace que el flujo de gas se acelere cuando aumenta la presión. El flujo de gas recibe un rocío de agua antes o durante la constricción en el tubo.

La diferencia de velocidad y presión que resulta de la constricción hace que las partículas y el agua se mezclen y combinen. La reducción de la velocidad en la sección expandida del cuello permite que las gotas de agua con partículas caigan del flujo de gas.

Los lavadores Venturi pueden alcanzar 99 por ciento de eficiencia en la remoción de partículas pequeñas.





**Fig. 3. Depurador Venturi con Torre de aspersión**

## **6.2. Combinación de ciclón de alta eficiencia con separador Venturi e hidrociclón.**

La razón de elegir implementar este sistema se justifica en el hecho de que el separador Venturi, es capaz de separar partículas menores de  $< 1\mu$ , lo cual no puede lograr el ciclón por sí solo.

El objetivo de la implementación de un depurador tipo Venturi, es la minimización de la concentración de las emisiones de MP en la caldera de biomasa.

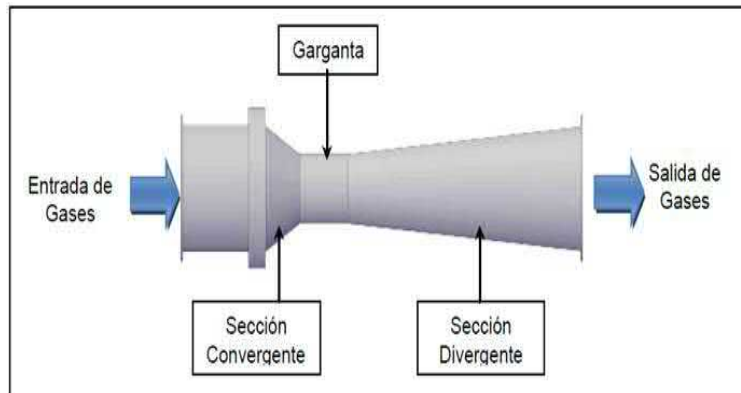
Las emisiones de MP ya fueron caracterizadas y son las que se muestran en la fig. 1., por tanto, se conoce su concentración y distribución de tamaños. Por otro lado, la eficiencia del equipo se puede determinar y optimizar mediante la aplicación de un modelo del depurador. La principal característica del depurador tipo Venturi es su sección estrecha, donde se capta la mayor parte de la masa de MP mediante agua.

El modelo innite-throat, relaciona la captura de MP con las características geométricas y condiciones de operación que enfrenta el equipo. En particular, permite determinar el agua necesaria para la depuración, y el diámetro y longitud de la sección estrecha de un depurador tipo Venturi de geometría cilíndrica.

Finalmente, el diseño de la sección convergente y divergente, se realiza utilizando parámetros recomendados para sus longitudes y ángulos, mientras que los materiales de construcción del equipo se deben seleccionar considerando la erosión y la presión externa sobre éste.

Las principales ventajas de un Sistema Venturi, son las siguientes:

- Diseño simple y compacto
- Alto grado de separación para partículas de polvo finas y aerosoles
- Insensible a obturaciones
- Absorción simultanea de gases contaminantes



**Figura 4. Componentes de un Venturi**

## **7. Diseño del sistema de depuración**

El objetivo de la implementación de un depurador tipo Venturi, es la minimización de la concentración de las emisiones de MP en la caldera de biomasa

El funcionamiento de un depurador tipo Venturi requiere la presencia de algunos equipos secundarios, relacionados de la forma indicada en la Figura 4, y que cumplen las siguientes funciones:

- Bomba: impulsa el agua que actúa en el depurador, captando el MP.
- Eliminador de niebla: permite separar el agua atomizada del flujo gaseoso.
- Ventilador: extrae gases desde la caldera, a través del depurador y del eliminador de niebla.
- Estanque Sedimentador: permite disminuir la concentración de partículas en el agua residual, para su reutilización, contiene el agua que se suministrará al depurador.

### **7.1. Aspersores del Depurador Venturi**

El Venturi cuenta con un aspersor para realizar el proceso de decantación del particulado. Utilizando un aspersor especial tipo Espiral Jet SPJ-FX 316 L (abertura amplia) para inyección de líquido de lavado, proporcionando un patrón de aerosol solido en forma de cono, con área de impacto circular.



**Figura 5. Boquillas Aspersores**

## **7.2. Torre de aspersión**

La torre incorporada en el proyecto consiste en una cámara cilíndrica vacía, donde ingresan los gases de combustión y agua. El funcionamiento del equipo se basa en la absorción y arrastre del MP por medio del agua. Se incorpora un eliminador de niebla en la parte superior para impedir que el agua sea expulsada a través del ducto superior de salida

Como puede apreciarse en el cuadro anterior la mejor opción a implementar es la que corresponde a la alternativa 7 (Combinación de Ciclón de alta eficiencia con Venturi e Hidrociclón)

Esta unidad combina los efectos de ciclón e Hidrociclón. Es en este último donde se realiza la separación de las microgotas de agua que contienen el material particulado y los contaminantes por medio de la fuerza centrífuga, esta se emplea también como torre de lavado por aspersión. El líquido es drenado por la parte inferior y conducido al sistema de tratamiento.

El Hidrociclón estará conectado al Venturi a través de una transición, este también contará en la parte superior con eliminador de niebla, cuyo objetivo será evitar que la mezcla de gases con líquido salga por la parte superior hacia el VTI y la chimenea respectivamente.

El material tanto del Venturi como del ciclón será acero inoxidable

## **7.3. Eliminador de nieblas –Demister del Hidrociclón (Separación del líquido de lavado)**

El principio básico de operación del Demister del Hidrociclón es el de favorecer la retención de líquidos, mediante mecanismos físicos de impactación, coalescencia y drenaje de las gotas de líquido sobre los componentes del eliminador.

El eliminador de niebla atrapa gotas del líquido de lavado que son arrastradas por el flujo de gases de combustión. Estas gotas generalmente contienen sólidos en suspensión o disueltos.

Es común que, en un lavador de partículas, tipo Venturi, las gotas del líquido de lavado sean arrastradas junto con la corriente gaseosa que se quiere limpiar. Esto producirá una disminución de la eficiencia de remoción calculada, pues las gotas que viajan junto con el gas estarán cargadas con el material particulado que se quiere remover.

Oscar Hidalgo D.  
**PROYECTO SISTEMA DE ABATIMIENTO DE EMISIONES**

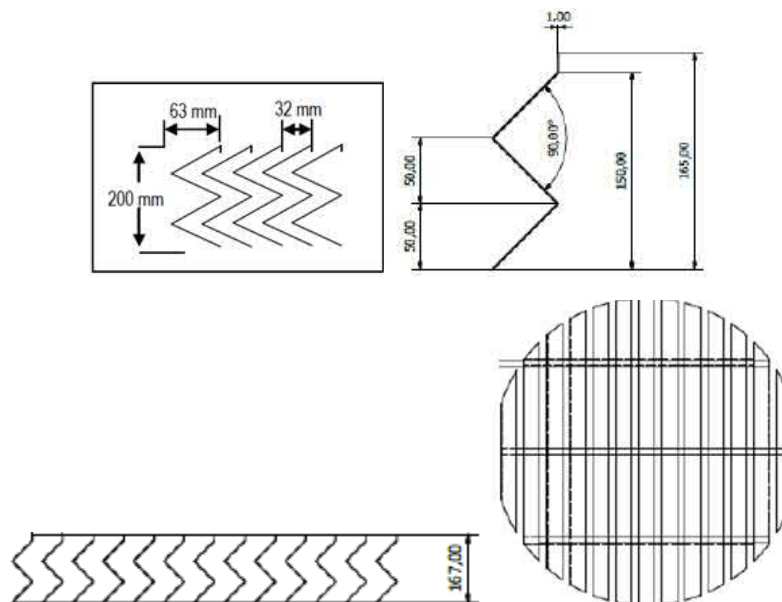
Si bien el cálculo de las dimensiones de la torre ciclón aminora el efecto, de todas formas, es necesario instalar un eliminador de niebla (gotas) en la parte superior de la torre ciclón, el que tiene por objeto la separación del líquido con sólidos inmersos en el gas, es decir el eliminador de neblina del tipo zigzag, ayudara a que se separe el líquido con el gas, haciendo que se formen gotas en la superficie del eliminador de neblina y caigan a la parte inferior del ciclón

Para separar el polvo del gas, el líquido de lavado se administra al flujo de gas bajo presión. Parte de las partículas se asocia con el líquido de lavado en el momento de su contacto. El gas, que contiene las gotas de líquido, se bombea por el aspersor. Su forma envía el flujo de gas por una trayectoria curva.

Bajo el efecto de la fuerza centrífuga las partículas de polvo y las gotas de líquido se precipitan en las paredes del separador y se evacuan del separador en forma de lodo

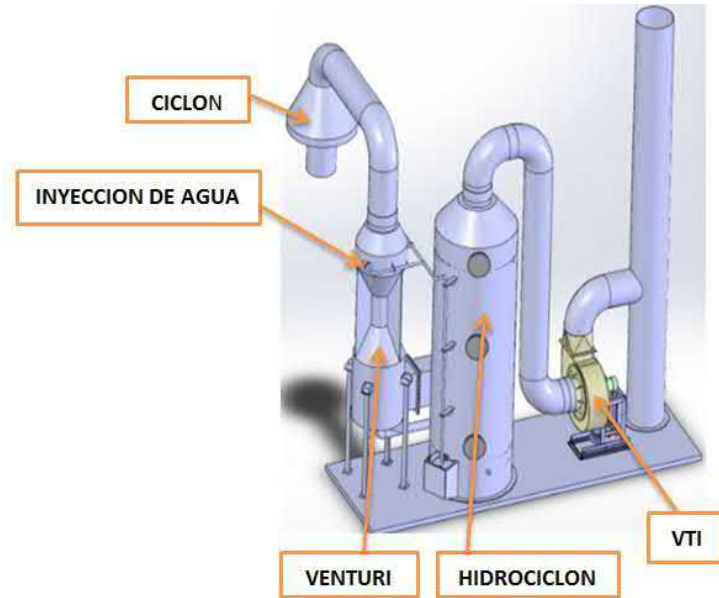
El diseño de placa chevrón consiste en placas en forma de zigzag, el cual reduce el taponamiento y facilita la limpieza. La ventaja de este diseño es que se obtiene una mayor eficiencia de colección y mejor estabilidad en la construcción.

La figura 6, siguiente muestra un diseño del eliminador de niebla que será implementado en la torre ciclón, el cual estará conformado por pletinas y ángulos de acero inoxidable en las dimensiones que se indican



**Figura 6. Eliminador de neblina deflector tipo zig zag o placa chevron**

Oscar Hidalgo D.  
PROYECTO SISTEMA DE ABATIMIENTO DE EMISIONES



**Figura 7: Esquema de montaje sistema de abatimiento con ciclón de alta eficiencia y Venturi con Hidrociclón**

**8. Otros equipos que contempla el proyecto:**

- Válvula rotatoria bajo ciclón con motor eléctrico
- Tornillo de extracción con motor eléctrico
- Válvulas tipo mariposa para agua
- Bomba de agua
- Boquillas aspersores

**9. COMPARACION NUEVO SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES VERSUS EL ANTIGUO**

A continuación, se presenta un cuadro comparativo con las diferencias del nuevo sistema de emisiones versus el antiguo

<b>CUADRO 2. COMPARATIVO DEL NUEVO SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES VERSUS EL ANTIGUO</b>	
<b>Estado con sistema antiguo de abatimiento</b>	<b>Estado con nuevo sistema de abatimiento</b>
Equipos con diseño no apto para cumplimiento de norma	Equipos con diseño de alta eficiencia
Alto nivel de emisiones	Bajo nivel emisiones
Alto arrastre de carboncillo por biomasa no combustionada	Sin arrastre de carboncillo por biomasa no combustionada
No cumple con la norma	Cumple con la norma bajo 30 mg/m <sup>3</sup>



## **MEMORIAS DE CALCULO PROYECTO CONTROL DE EMISIONES CALDERA DE VAPOR PLANTA PROMASA**

**Cliente Mandante: director Gerente Sr. Manuel Pauvif**

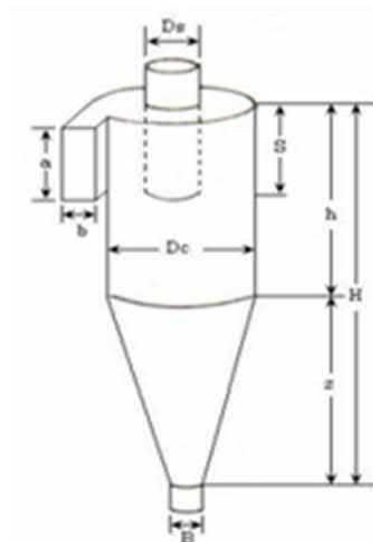
**Realizador del Estudio: Oscar Hidalgo Diaz  
Ing. Civil Mecánico  
Especialista en Combustión y Control de Emisiones**

**Agosto 2021**

## **MEMORIA DE CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL CICLÓN SWIFT DE ALTA EFICIENCIA:**

### **1. Elección de la alternativa de sistema de abatimiento**

Tomando en consideración la exigencia de la norma, el proyecto de diseño elegido contempla la instalación de un ciclón de alta eficiencia de recolección, con entrada tangencial y descarga axial, de acuerdo con lo que se muestra en la figura 1.



**Fig.1. Ciclón de alta eficiencia**

Los gases de la combustión entran por el ducto tangencial, salen por el ducto axial, y el particulado será retirado por la parte inferior a través de una válvula rotatoria.

El ciclón estará diseñado para capturar el material particulado de tamaño superior a  $5\ \mu$ , con una eficiencia sobre un 80%

**TABLA 1. DE EFICIENCIA DEL CICLON EN FUNCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS**

Tipo de Ciclón	Eficiencia de remoción (%)		
	Total, de partículas a remover	PM 10	PM 2,5
De Alta eficiencia	80 - 90	60 - 95	20-70

### **2. Cálculo del Ciclón:**

Para calcular el diámetro del ciclón se selecciona una velocidad de entrada que está en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s.

Para este caso, por tratarse de un ciclón de alta eficiencia se selecciona una velocidad de entrada de 27 m/s. Con este valor se puede determinar el diámetro del ciclón y otras dimensiones con base en las relaciones establecidas para las familias de ciclones (tabla 1).

## 2.1. Área del ducto de entrada:

- Caudal de gases= 43.520 m<sup>3</sup>/h =12 m<sup>3</sup>/seg
- Área =  $Q/V_i = 12/27 = 0,4477 \text{ m}^2$
- Área del ducto de entrada = a × b
- Área del ducto= 0,4477 = 0,5 Dc x 0,2 Dc
- $D_c = \sqrt{\frac{0,5577}{0,1}} = 2,11$ , se aproximará a 2 m

En función de diámetro calculado la siguiente tabla muestra los valores calculados para el resto de los parámetros

TABLA 2. CON DIMENSIONES CALCULADAS DEL CICLON A INSTALAR				
Parámetro Dimensional	Nomenclatura	Determinación de parámetros	Dimensiones del Ciclon	Unidad
Diámetro del cilindro	Dc	$D_c = \sqrt{\frac{A}{0,1}}$	2.000	mm
Altura total del cilindro	h	1,4 x Dc	2.800	mm
Altura del Cono	Z	2,5 x Dc	5.000	mm
Altura de entrada	a	0,44 x Dc	880	mm
Ancho de entrada	b	0,25 X Dc	500	mm
Diámetro de salida de las partículas	Ds	0,4 x 2	800	mm
Diámetro de decantación del particulado	B	0,4 x Dc	800	mm
Longitud ducto de salida	S	0,5 x Dc	1000	mm
Altura total del ciclón	H	3,9 x Dc	7.800	mm
Numero de Vórtices	n	6	5	-o-
Factor de Configuración	F.C.	402,88	-o-	-o-
Material	Acero A-36, plancha de 4 mm de espesor de pared			



## 2.2. Calculo de la Longitud Natural del Ciclón:

**Factor de configuracion "G":**

$$L < H - S$$

H: Altura del ciclón

S: Longitud ducto de Salida

Ds= Dimetro del ducto de Salida

$$L = 2,3 \times Ds \times \sqrt[3]{\frac{(Dc)^2}{a \times b}}$$
$$L = 2,3 \times 0,8 \times \sqrt[3]{\frac{(2)^2}{0,88 \times 0,5}}$$
$$L = 3,83$$

$$3,83 < 7,8 - 2,081$$

$$3,83 \text{ m} < 5,72 \text{ m, Cumple}$$

Este tipo de ciclón tiene como parámetros de diseño, además de la determinación del diámetro.

- La caída de presión o perdida de carga
- La velocidad de entrada

## 2.3. Calculo de la Perdida de carga en el ciclón

Teóricamente,  $D_p$ , es el tamaño de la partícula más pequeña que puede ser recolectada, esto significa que todas las partículas de diámetro  $d_p$  o mayores pueden ser recolectadas con una eficacia del 100%.

$$dp = \left[ \frac{9 \cdot \mu \cdot W}{\pi \cdot Ne \cdot Vi \cdot (\rho p - \rho g)} \right]^{1/2}$$

$$dp = \left[ \frac{9 \cdot 2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 0,75}{\pi \cdot 6 \cdot 27 \cdot (1000 - 0,8)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{0,0001404}{532557,21} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,00001623 \text{ m} = 16,23 \mu\text{m}$$

El diámetro mínimo de partícula que puede ser recolectada con un 100% de eficacia está directamente relacionado con la viscosidad y con el ancho del conducto de entrada del ciclón, y es inversamente proporcional al número de giros, la velocidad de entrada el gas y la diferencia de densidad entre el gas y la partícula.

En la práctica, la eficiencia de recolección de partículas depende de estos parámetros, pero esto predice que tasas de las partículas mayores del  $D_p$  que son recolectadas.

A continuación, se usa la relación semi-empírica desarrollada por Lapple (1951) para calcular un "50% diámetro de corte",  $d_{pc}$ , que es el diámetro de partículas recogidas con 50% de eficiencia del ciclón.

$$d_{pc} = \left[ \frac{9 \cdot \mu \cdot W}{2 \cdot \pi \cdot Ne \cdot Vi \cdot (\rho p - \rho g)} \right]^{1/2}$$

La partícula para remover en este caso son las gotas de agua que han sido arrastradas desde el ciclón, que contienen en su interior las pequeñas partículas de carboncillo.

$$Ne = \frac{1}{a} \cdot \left( h + \frac{z}{2} \right)$$

$$Ne = \frac{1}{0,88} \cdot \left( 2,8 + \frac{5}{2} \right) = 6$$

$$d_{pc} = \left[ \frac{9 \cdot 2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 0,75}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 27 \cdot (1000 - 0,8)} \right]^{1/2} = \left( \frac{0,0001404}{1065114,42} \right)^{1/2} = 11,75 \mu m$$

Por lo tanto, la eficacia de recolección se calcula:

$$p = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{dp} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{11,75}{16,23} \right)^2} = \frac{1}{1,525} = 0,6561 = 65,61\%$$

Otro parámetro a considerar en el diseño del ciclón es la pérdida de carga, por cuanto esta afectará directamente a la capacidad del VTI.

Existen muchos modelos para dicho diseño, en este caso se ha usado la aproximación de Shepherd y Lapple:

$$Hv = K \cdot \frac{a \cdot b}{Ds^2}$$

Dónde:

- $Hv$  = Numero de vórtices
- $K$  = constante que depende de la configuración del ciclón y de las condiciones de operación
- 

Teóricamente,  $K$  puede variar considerablemente, pero lo normal es que varíe entre 12 y 18 (Caplan 1962). Licht (1984) recomienda fijar el valor de  $K$  en 18, por lo que:

$$Hv = 14 \cdot \frac{0,88 \cdot 0,5}{(1)^2} = 6,16$$

Convirtiéndolo en pérdida de carga:

$$AP = \frac{1}{2} \cdot \rho g \cdot vi^2 \cdot Hv$$

$\rho$ : Densidad de los gases

V: Velocidad de entrada al ciclón

Hv: Numero de vortices

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \frac{43.520}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,8^2} = \frac{86.623,2 \text{ m}}{h} = \frac{24,062 \text{ m}}{s}$$

$$AP = \frac{1}{2} \cdot 0,8 \cdot 24,062^2 \cdot 6,16 = 1.426,6 \text{ Pa}$$

$AP = 1,426,6 \text{ kPa}$ , convenientemente baja ya que:

$AP = 1.426,6 \text{ Pa} < 2.488,16 \text{ Pa}$  (valor estandarizado) OK

## **MEMORIA DE CALCULO DEL LAVADOR DE GASES TIPO VENTURI**

Una vez que se extrae el particulado mayor a 5 micrones en el ciclon, se realizara un lavado físico con agua, del gas en un dispositivo tipo Venturi, que permite retener las partículas sólidas no extraídas en el ciclon, así como compuestos contaminantes (HCl, HF, NH<sub>3</sub>, HCN y parcialmente H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>), así como:

El lavador Venturi de alta energía y eficiencia, posee la capacidad de remover partículas mayores a 0.5  $\mu\text{m}$  con una eficiencia de hasta 98%.

En un lavador Venturi se identifican tres zonas, que son:

- zona convergente
- garganta
- y zona divergente.

El gas cargado con partículas ingresa a la zona convergente, donde debido al cambio gradual en la sección transversal por donde fluye, se producirá un incremento en la velocidad del gas hasta alcanzar un valor máximo en la zona que se conoce como garganta.

La velocidad relativa entre las gotas del líquido de lavado y las partículas a removerse, es el parámetro más importante en todo lavador de gases destinado a la remoción de partículas.

Esto se debe a que los mecanismos físicos por los cuales las partículas son capturadas en las gotas del líquido, dependen directamente de dicha velocidad.

A mayor velocidad relativa entre las gotas del líquido de lavado y las partículas, mayores serán las posibilidades de que se lleve a cabo la captación de partículas, pues los mecanismos de impacto inercial e intercepción son beneficiados con el aumento de dicha velocidad.

Por eso, un lavador Venturi puede inclusive ser utilizado para remover partículas del tipo PM<sub>2.5</sub>.

<b>Tabla 3. VALORES PARA EL DISEÑO DEL LAVADOR DE PARTÍCULAS VENTURI</b>	
<b>Velocidad del gas en la garganta</b>	<b>Condición</b>
VG > 4575 cm/s	Para Alta eficiencia de remoción de PM
2000 < VG < 2300 cm/s	Para Absorción y remoción de PM simultáneas
<b>Relación Líquido - Gas</b>	<b>Condición</b>
0.26 < L/G < 2,6 litros/m <sup>3</sup>	Para Remoción de PM
5.5 < L/G < 11 litros/m <sup>3</sup>	Para Absorción de gases y remoción de PM
<b>Caída de presión</b>	<b>Condición</b>
10 < $\Delta P$ < 150 pulg de H <sub>2</sub> O	Inferior en aplicaciones de absorción

0,0254 < ΔP < 0,381 Kg/cm <sup>2</sup>	
<b>Dimensiones típicas</b>	
Área de entrada / Área de la garganta = 4:1	
Ángulo de convergencia = 12. 5°	
Ángulo de divergencia = 3. 5°	

### Dimensionamiento del dispositivo

Para dimensionar el lavador Venturi, primero se asume una velocidad adecuada en la garganta; por ello de la tabla anterior asumimos que VG = 4. 600 cm/s

$$V_g = 46 \text{ m/s}$$

Caudal de gases

$$G_d = 43.520 \text{ m}^3/\text{hora} = 12 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$A_2 = \frac{G_d}{V_g} = \frac{12}{46} = 0,26 \text{ m}^2$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \times 0,26}{3,14}} = 0,5755 \text{ m}$$

D<sub>2</sub> = 57,5 cm. Dado que: el Área de entrada / Área de la garganta = 4:1, se bajará el diámetro de la garganta a 50 cm

$$l_c = a / \tan 12,5^\circ$$

$$a = \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} = \frac{800}{2} - \frac{500}{2} = 150 \text{ cm}$$

$$l_c = 150 / 0,22169 = 67,66 \text{ cm,}$$

*l<sub>c</sub> se ajusta a 610 mm para incrementar velocidad*

$$l_d = b / \tan \beta/2$$

$$l_d = \frac{b}{\tan \beta/2} \times 2 = \frac{15}{\tan 3,5} = 245,2478 \text{ cm, se aproxima a 2.450 mm}$$

### Resumen de datos.

- Longitud de la zona convergente: l<sub>c</sub> = 610 mm**
- Longitud de la garganta: l<sub>t</sub> = 370 mm**
- Longitud de la zona divergente: l<sub>d</sub> = 2.450 mm**
- Diámetro de la garganta: D<sub>2</sub> = 500 mm**

- e. **Diámetro en la entrada: D1** = 800 mm
- f. **Diámetro en la salida: D3** = 800 mm
- g. **a**= 150 mm
- h. **b**= 150 mm

El primer parámetro por calcular para el diseño de lavador Venturi será la penetración,  $P_t$ , que se define como la fracción de partículas de un diámetro específico que no son capturadas y que por lo tanto logran atravesar el equipo, se relaciona con la eficiencia de remoción por medio de:

$$P_t = 1 - d_f$$

El caudal inicial de partículas que se tiene en el gas, que son las partículas restantes que quedan después de la filtración en el ciclón es de 0,54 g/h. Se requiere limpiarlo para quedar con un caudal de partículas final de 0,02 g/h, calculando para esto la eficacia y la penetración.

$$d_f = \frac{m_i - m_o}{m_i} \cdot 100$$

$$d_f = \frac{\frac{0,54g}{h} - \frac{0,02g}{h}}{\frac{0,54g}{h}} \cdot 100 = 96,29\%$$

$$P_t = 1 - d_f = 1 - 0,9629 = 0,0371$$

Fijamos la sección del Venturi en 0,785 m<sup>2</sup>, contando con que tenemos un caudal de 43.520 m<sup>3</sup>/h, calculamos la velocidad del gas en la garganta:

$$velocidad \left( \frac{m}{seg} \right) = \frac{12 \frac{m^3}{s}}{0,785 m^2} = 15,29 m/seg$$

Los lavadores Venturi que proveen por si mismos la formación de gotas de líquido, pues la energía requerida para la atomización del líquido de lavado la proveerá la corriente gaseosa acelerada en la garganta del dispositivo.

Esta atomización neumática de doble fluido (gas y agua), puede presentarse en dos formas: atomización tipo gota y atomización tipo nube.

En este cálculo se considera la atomización tipo gota, aunque se producirá un amplio rango de tamaño de las gotas, es posible predecir un diámetro promedio utilizando la ecuación de Nukiyama-Tanasawa.

A este, se lo conoce como diámetro de Sauter, que en el caso del aire o agua se calcula por medio de la relación:

$$Dd(\mu m) = \frac{16.400}{\text{velocidad gas} \left( \frac{ft}{s} \right)} + 1,45 \cdot \left( \frac{L}{G} \frac{gal}{1000 ft^3} \right)^{1,5} = \frac{16.400}{50,13} + 1,45 \cdot 15^{1,5}$$

$$Dd = 41,14(\mu m)$$

Se ha supuesto que:

- Relación L/G=15 gl/1000 ft<sup>3</sup>
- Velocidad gas= 15,29 m/s= 50,13 ft/s
- El rango de diámetro de gota = 75-150 μm
- Densidad gas=0,80kg/m<sup>3</sup> = 0,0499 lb/ft<sup>3</sup>

También es importante conocer la caída de presión a través del dispositivo, pues de ello dependerá la demanda de energía requerida para mover el gas a través del dispositivo, el cual corresponde a:

$$Ap \text{ (in } H_2O) = \frac{v^2 \cdot pg \cdot A^{0,133} \cdot L/G^{0,78}}{1270}$$

$$AP \text{ (in } H_2O) = \frac{(50,13)^2 \cdot 0,0499 \cdot 6^{0,133} \cdot 15^{0,78}}{1270} = 1,1 \text{ in } H_2O$$

$$AP = 249 Pa, \text{ muy aceptable}$$

### Eficiencia de remoción

Asumiendo atomización tipo gota, el diámetro promedio de las gotas, o diámetro de sauter es:

$$Dd = \frac{58.600}{vg} \frac{(\sigma)^{0,5}}{(\sigma \cdot g)^{0,5}} + 597 \left( \frac{\mu L}{(\sigma \cdot g)^{0,5}} \right)^{0,5} \left( 1000 \frac{QL}{QG} \right)^{1,5}$$

Siendo:

Dd: Diámetro medio de Sauter para las gotas,

$V_c = \text{Velocidad del gas} = (4,88 \times 10^{-3}) \text{ cm/seg}$

$\sigma = \text{Tensión superficial del líquido} = 65,9 \text{ Dynas}$

$\rho_L = \text{Densidad del líquido} = 0,98 \text{ } 0,98 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$

$\mu_L = \text{Viscosidad del líquido} = 2,04 \times 10^{-3} \text{ Poise}$

$Q_L = \text{Flujo Volumétrico del líquido} = 0,01224 \text{ m}^3/\text{seg}$

$Q_g = \text{Flujo volumétrico del gas} = 12 \text{ m}^3/\text{seg}$

Con esta información:

**Dd= 104,48  $\mu\text{m}$**

Con esta información se selección el tipo de boquillas rociadoras para el Venturi

Así, finalmente obtenemos un gas de síntesis exento prácticamente de partículas