

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la**  
**Producción**

**" REDISEÑO DEL SISTEMA DE DEPURACION DE GASES DE  
COMBUSTION DEL INCINERADOR DEL CENTRO DE DESARROLLO  
TECNOLOGICO SUSTENTABLE (CDTS)"**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACION**

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Roger Andre Prado Pico

Juan Carlos Icaza Arellano

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2016

## AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Emérita Delgado, al Dr. Juan Peralta y al Msc. Mario Patiño; quienes nos guiaron a lo largo de este proyecto. Al Ing. Josue Gavilanes y al Ing. Juan Vera; quienes, con su experiencia, nos ayudaron y contribuyeron con la elaboración de este trabajo.

Esto es para mis padres, Carlos Icaza y Lorena Arellano a mi hermano Martin, para los que ya no están y viven en mi corazón y también para mis amigos, sin duda alguna esto no sería posible de no ser por todos y cada uno de ellos. Gracias por creer en mí y en el camino que escogí.

- *J. Icaza*

Se lo dedico a mis padres, Carlos Prado y Flor Pico, mis hermanos Carola, Johanna, Paolo y Benji, al resto de mi familia y amigos; por el apoyo, la compañía e incentivo; porque sin ellos no sería quien hoy soy, ni hubiera llegado hasta donde estoy.

- *R. Prado*

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Juan Carlos Icaza Coronel

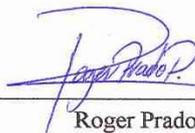
Roger Andre Prado Pico

Dr. Juan Peralta J.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Juan Icaza A.  
Autor 1



Roger Prado P.  
Autor 2



Dr. Juan Peralta J.  
DIRECTOR

## RESUMEN

El proceso de incineración de desechos tiene por objetivo reducir el volumen de los desperdicios y eliminar sustancias peligrosas para la salud por medio de la combustión, lo que implica el uso de combustibles, los cuales generaran sustancias que contaminan al ambiente, siendo necesario utilizar equipos que permitan controlar dichas emisiones, es decir un sistema de tratamiento de gases. Por esta razón el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable en vista de la importancia de este proceso aplicado a la eliminación de desechos hospitalarios, cuenta con un incinerador cuyo propósito es académico pero requiere de un rediseño de su sistema de depuración de gases, que garantice que las emisiones cada vez que se encuentre en funcionamiento estén acorde a los límites permisibles, es decir que sea amigable al ambiente. Para el rediseño de este sistema de depuración se analizaran las diferentes alternativas o equipos apropiados a este fin, para luego elaborar una matriz de decisión que permita seleccionar apropiadamente los componentes encargados de la eliminación de contaminantes, los cuales se encargaran de estos eliminando primero el material particulado y luego los gases ácidos presentes en su composición, también se dimensionaran dichos componentes tomando como restricción de diseño que existe una estructura construida empíricamente y en base a este sistema y su espacio físico se realiza el presente estudio, siendo otra restricción el factor económico debido a que el incinerador será usado con propósitos académicos, donde la aplicación de tecnologías será de gran importancia, motivo por el cual sistemas más sofisticados no serán tomados en cuenta ya sea por su tamaño, necesidad de mantenimiento o combinaciones entre otros equipos.

Para la selección de los equipos se utilizaron datos estadísticos de estudios previos relacionados a la caracterización de los compuestos debido a la incineración de desechos hospitalarios correspondientes al incinerador del CDTs, así como los principios de funcionamiento de las técnicas de depuración de gases y las características de los equipos de remoción de partículas a través de textos guía en conjunto con las normas EPA y su apartado AP 42 para la disposición de desechos hospitalarios, el cual proporciono los distintos factores de emisión de cada componente presente en el contaminante y como este valor varia aplicando los distintos equipos

para control de emisiones. En lo que concierne a materiales usados como se mencionó anteriormente existe una estructura previamente construida de la que se utilizaron sus dimensiones básicas de manera que las modificaciones empleadas como ciertas secciones de la estructura y sus accesorios fueron implementados con la finalidad de optimizar el funcionamiento de los equipos.

Mediante la matriz de decisión se determinó que los equipos más recomendables para remover material particulado y gases ácidos son un lavador de alta energía o lavador Venturi y un lavador de baja energía o torre de aspersion ciclónica, configuración que también es recomendada por la EPA para garantizar una eficiente remoción tanto de material particulado como para gases ácidos respectivamente. Mediante una relación de líquido-gas de  $4 \text{ lt/ m}^3$  para un caudal de gas a la entrada del Venturi de 11752.92 GPM se determinó que el caudal de líquido apropiado es de 47 GPM, también que la velocidad de entrada del equipo es de  $8 \text{ m/ s}$ , en donde por medio de un balance de flujo se obtuvo una velocidad de salida del gas de  $31.46 \text{ m/ s}$ , con una caída de presión de  $10 \text{ in } H_2O$  y una eficiencia global del Venturi de 93.32% para tamaños de partícula menores a 10 micrones, este equipo utilizara dos blowers con una potencia total de 6 hp, los cuales serán capaces de proporcionar movimiento al gas. En lo relacionado a dimensionamiento se realizaron modificaciones a la estructura existente que optimicen la recuperación de presión en este caso se obtuvo una longitud divergente de 0.84 m y una longitud de garganta de 0.63 m, mediante criterios sugeridos por varios autores, Para la torre de aspersion ciclónica con un diámetro de 81 cm se calculó la altura tanto de la zona cilíndrica como la de la zona cónica siendo ambas de 1.62 m con diámetros de salida de aire limpio y de desechos de 40.5 cm y 20.25 cm respectivamente, con una caída de presión de  $8.63 \text{ in } H_2O$  y eficiencias de remoción de gases ácidos como el cloruro de hidrogeno de 70% y de dióxido de azufre en 64.8%, valores que se encuentra dentro de los límites permisibles. Con relacionado a costos la estructura existente según este estudio requerirá ciertas modificaciones en su geometría, para el Venturi un cambio de longitud de garganta y de longitud divergente para ello es necesario 1 planchas de acero inoxidable 304 de 1 mm de espesor, para la torre se requerirán 2 planchas de acero inoxidable 304 de 2 mm de espesor para en manejo de gases ácidos.

**Palabras Clave:** incinerador, depurador, matriz, emisiones, partículas, caudales, eficiencia.

## **ABSTRACT**

*The incineration of waste has the purpose to reduce the volume of waste and eliminate hazardous to health through combustion substances, which involves the use of fuels that generate substances that pollute the environment, being necessary to use equipment allow to control these emissions, in other words, a gas treatment system. For this reason the Center for Sustainable Technology Development because of the importance of this process applied to the disposal of hospital waste, has an incinerator whose purpose is academic but requires a redesign of its system gas cleaning, to ensure that emissions every time they are in operation according to the permissible limits, it means that is environmentally friendly. To redesign this system debug different alternatives or appropriate equipment will be analyzed for this purpose and then develop a decision matrix that allows properly select the components responsible for removing contaminants, which would be responsible for first remove particulate matter and then the acid gases present in its composition, also the equipment will be dimensioned taking as a design restriction that there is a structure built empirically and based on this system and its physical space this study is done, being another restriction the economic factor because of the incinerator will be used for academic purposes, where the application of technologies will be of great importance, which is why more sophisticated systems will not be taken into account either by size, maintenance or combinations among other equipment.*

*For the selection of equipment statistical data from previous studies related to the characterization of the compounds due to incineration for the incinerator CDTS hospital waste as well as the principles of operation of technical gas purification and characteristics are used equipment particle removal through texts guide in conjunction with the EPA and regulations your document AP 42 for disposal of hospital waste, which provided different emission factors for each present in the contaminant component and as this value varies applying various emission control equipment. With respect to materials used as mentioned above, there is a structure previously built of their basic dimensions were used so that the modifications employed as certain sections of the structure and components were implemented in order to optimize the operation of the equipment. By decision matrix was determined that the most desirable to remove particulate matter and acid gases equipment is a scrubber high energy or venturi*

*scrubber and a scrubber low energy or tower cyclonic spray configuration is also recommended by the EPA to ensure both efficient removal of particulate material to acid gases respectively. By a ratio of liquid-gas 4 liters / m<sup>3</sup> for a gas flow rate to the venturi inlet of 11752.92 GPM was determined that the flow rate suitable liquid is 47 GPM, also the speed equipment input is 8 m / s, where through a flow balance was an exit velocity gas 31.46 m / s obtained with a pressure drop of 10 in H<sub>2</sub> O and an overall efficiency of venturi 93.32% for smaller particle sizes 10 microns, this team will use two blowers with a total output of 6 hp, which will be able to provide gas movement. In relation to sizing changes to the existing structure which maximize pressure recovery in this case made a diverging length of 0.84 m and a throat length of 0.63 m, using criteria suggested by several authors, for the tower cyclonic spray it was obtained with a diameter of 81 cm the height of both the cylindrical portion as the conical area both being 1.62 m diameters clean air outlet and waste of 40.5 cm and 20.25 cm, respectively, with a pressure drop was calculated 8.63 in H<sub>2</sub> O and removal efficiencies acid gases such as hydrogen chloride and 70% sulfur dioxide in 64.8% values is within the permissible limits. With related costs existing structure according to this study it will require modifications in their geometry to the Venturi a change in length throat and divergent for this length 1 plates 304 stainless steel of 1 mm thickness is required for the tower 2 will require 304 stainless steel plates of 2 mm thickness in management for acid gases.*

**Keywords:** *incinerator, scrubber, matrix, emissions, particles, flow, efficiency.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Marco teórico.....	2
CAPÍTULO 2	
2. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	10
2.1. Normas utilizadas para la disposición de desechos hospitalarios.....	17
2.2. Diseño del lavador Venturi.....	17
2.2.1. Calculo de la eficiencia global de remoción.....	20
2.3. Diseño de la torre de aspersion.....	34
2.4. Selección de boquillas para equipos seleccionados.....	38
2.5. Selección de bombas.....	41
CAPÍTULO 3	
3. RESULTADOS.....	48
CAPÍTULO 4	
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	52
4.1. Conclusiones.....	53
4.2. Recomendaciones.....	54

PROPIEDAD INTELECTUAL

BIBLIOGRAFÍA.....55

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NACE	National Association of Corrosion Engineer
SSC	Electrodo de Plata Cloruro de Plata
CSE	Electrodo de Cobre Sulfato de Cobre
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level
CIS	Inspección pasó a paso, medición de potenciales de encendido
MPY	Milésimas de pulgadas por año
EPA	Environmental Protection Agency

## SIMBOLOGÍA

$\eta_o$  = eficiencia global

$\eta_j$  = eficiencia de colección para el rango j

$m_j$  = masa porcentual para el rango j

$P_t$  = penetración

$K_p$  = parámetro de impacto para la velocidad del gas al entrar a la garganta

$F'$  = valor empírico, que puede ser de 0.25 para partículas hidrofóbicas y 0.5 para partículas hidrofílicas.

$K_c$  = factor de corrección de Cunningham

$\rho_p$  = densidad de partícula, g/cm<sup>3</sup>

$d_p$  = diámetro físico de partícula, cm

$V_p$  = velocidad de partícula (igual a la del gas), cm/s

$d_d$  = diámetro de las gotas, cm

$\mu_g$  = viscosidad del gas, Poise

$d_a$  = diámetro aerodinámico de partícula, cm

$d_d$  = diámetro medio de Sauter para las gotas,  $\mu\text{m}$

$V_G$  = velocidad del gas, cm/s

$\sigma$  = tensión superficial del líquido, dinas/cm

$\rho_L$  = densidad del líquido, g/cm<sup>3</sup>

$\mu_L$  = viscosidad del líquido, poise

$Q_L$  = flujo volumétrico del líquido, m<sup>3</sup>/s

$Q_G$  = flujo volumétrico del gas, m<sup>3</sup>/s

$\Delta P$  = Caída de presión

$X$  = longitud adimensional de la garganta

$C_D$  = coeficiente de arrastre para las gotas

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Absorbedores.....	3
Figura 2. Adsorbedores.....	4
Figura 3. Condensadores de contacto y de superficie.....	5
Figura 4. Ciclón.....	7
Figura 5. Precipitadores Electrostáticos.....	8
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología de diseño aplicada.....	10
Figura 7. a y b Factores de emisión de contaminantes y los equipos utilizados.....	15
Figura 8. Tamaño de partícula vs equipos para control de emisiones.....	16
Figura 9. Dimensiones del lavador Venturi.....	26
Figura 10. Dimensiones de la Torre de aspersion ciclónica.....	36
Figura 11. Criterios para selección de boquillas.....	38
Figura 12. Tabla de selección de boquillas.....	38
Figura 13. Sección de la garganta cubierta por las boquillas seleccionadas.....	39
Figura 14. Sección del Ciclón cubierto por las boquillas seleccionadas.....	40
Figura 15. Curva de selección de bombas para lavador Venturi.....	43
Figura 16. Curva de selección de bombas para Torre de aspersion ciclónica.....	46
Figura 17. Diagrama de forma del sistema de depuración de gases de combustión seleccionado.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla1 Tipos de lavadores de Partículas.....	9
Tabla 2 Matriz de decisión para control de material contaminado.....	11
Tabla 3 Ventajas y Desventajas de equipos para control de partículas.....	12
Tabla 4 Técnicas de depuración de gases.....	13
Tabla 5 Matriz de decisión para remoción de gases contaminantes.....	14
Tabla 6 Distribución del tamaño de partículas emitida.....	28
Tabla 7 Eficiencia global del lavador Venturi.....	32
Tabla 8 Potencia de los blowers requeridos para mover el caudal de gas.....	33
Tabla 9 Características de un ciclón convencional.....	35

# CAPITULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción del problema

La incineración es un tratamiento para la eliminación de residuos sólidos y líquidos por medio de un proceso de combustión en donde se logra la reducción en volumen de estos residuos, además de la destrucción de elementos o sustancias peligrosas para la salud. Sin embargo, el producto de la combustión genera sustancias que contaminan al ambiente, las mismas que deben ser controladas por un sistema de tratamiento de gases. Por este motivo, el CDTs decidió construir un incinerador cuyo objetivo es estudiar el proceso de incineración de residuos hospitalarios, así como establecer sus parámetros básicos de operación. Este incinerador necesita un rediseño del sistema de depuración de gases, debido a que su configuración o sistema de funcionamiento aplicado fue seleccionado de manera empírica; actualmente el incinerador se encuentra fuera de operación debido a que no se terminó su construcción. El rediseño de este sistema deberá considerar las regulaciones ambientales pertinentes, como la eficiencia de remoción de contaminantes en los gases o productos de combustión debido a la incineración de desechos hospitalarios; así como en diferentes alternativas basadas en criterios técnicos, de construcción y económicos, esto es la disponibilidad de materiales y equipos así como el costo de los mismos en el mercado; todo esto con la finalidad de proponer un dimensionamiento adecuado para el funcionamiento del equipo.

## **1.2. Objetivos**

### **OBJETIVOS GENERALES**

- Diseñar un sistema de depuración de gases de combustión acorde a las paramétricos técnicos y operacionales del incinerador existente.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar y analizar las diferentes alternativas de diseño para el tren de depuración de gases de combustión.
- Elaborar una matriz de decisión de la alternativa de diseño adecuada.
- Dimensionar los diferentes equipos de control y elementos auxiliares que conformar el sistema de depuración de gases de combustión seleccionado.
- Evaluar los costos de la alternativa seleccionada.

## **1.3. Marco teórico**

### **1.3.1 Remoción de gases y control de partículas**

El sistema de control de emisiones de los gases contaminantes que descarga el incinerador para desechos hospitalarios trata a los productos captando partículas y eliminando gases contaminantes, es decir que se enfocan en el control de partículas y en los gases y vapores originados en el proceso, destacando la diferencia entre estos tipos de contaminantes debido a que el tamaño de las partículas se miden en micrones mientras que el tamaño de las moléculas de los gases son tan pequeñas que apenas pueden expresarse en angstroms. En consecuencia los sistemas para colectar partículas son distintos a los utilizados para remoción de gases.

Los gases más destacados producto de la incineración debido a su alta peligrosidad y emisión son: Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO), pero dada a la

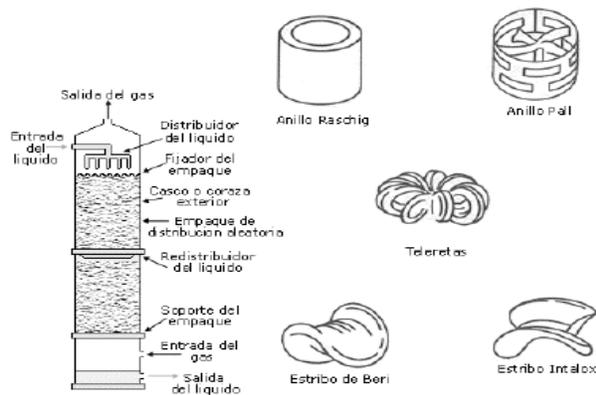
naturaleza de estas sustancias que producen contaminación, ya sea por toxicidad o por producir un olor desagradable, por esta razón el nivel de control de emisiones gaseosas se vuelve más complejo de lo esperado. Por todo lo dicho el dispositivo se encargara del control de emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y material particulado, siendo estos gases contaminantes los que se desea remover.

### 1.3.2 Técnicas de depuración de gases.

Una vez identificado los principales gases a remover, es necesario establecer la técnica de depuración apropiada para la emisión de gases contaminantes que corresponden a procesos físico – químicos como: la absorción, adsorción, condensación y combustión.

#### Absorción

El proceso de absorción considera que los gases residuales se componen de mezclas de sustancias en fase gaseosa, siendo algunas solubles en fase líquida, estas al ponerse en contacto con un líquido provoca que el componente contaminante se disuelve, a medida que el flujo de gas pasa por el líquido, este absorbe el gas de misma manera como el azúcar es absorbido en un vaso de agua cuando se agita (Inche, 2004).



Fuente: [http://165.158.1.117/bvsci/e/fulltext/orienta/lecc8/lecc8\\_2a.html](http://165.158.1.117/bvsci/e/fulltext/orienta/lecc8/lecc8_2a.html)

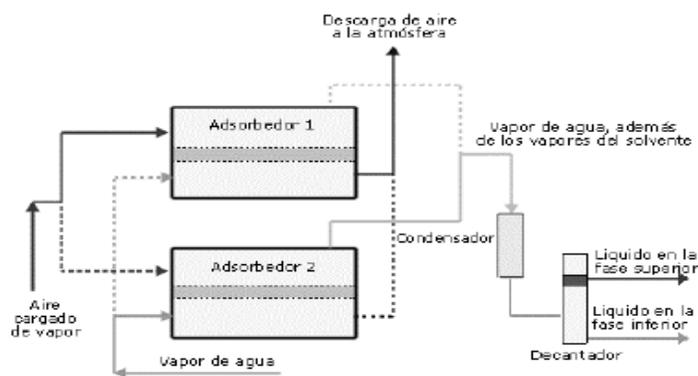
Figura 1. Absorbedor

## Adsorción

Es un proceso que se realiza a través de sólidos, los cuales retienen sobre su superficie los gases, vapores y líquidos contaminantes debido a reacciones químicas y fuerzas superficiales, provocando una difusión desde la masa gaseosa hasta la superficie externa del sólido y las moléculas del gas en el interior de los poros de dicho sólido, facilitando el proceso de retención de contaminantes.

Los sólidos más apropiados para la adsorción son aquellos que poseen grandes relaciones superficie / volumen, es decir los que presentan una elevada porosidad y área superficial para que ocurra el contacto sólido – gas, de los cual se destacan: tierra de Fuller, bauxita, carbón activado, alúmina activada, tamices moleculares, entre otras.

Para evitar una disminución en la eficiencia (Nerea Martin Estevez-Monica Melon Vega-Pili Sanchez Alviz, 2000) de retención se recomienda la sustitución o regeneración del adsorbente en forma periódica.



Fuente: [http://165.158.1.117/bvsci/e/fulltext/orienta/lecc8/lecc8\\_2a.html](http://165.158.1.117/bvsci/e/fulltext/orienta/lecc8/lecc8_2a.html)

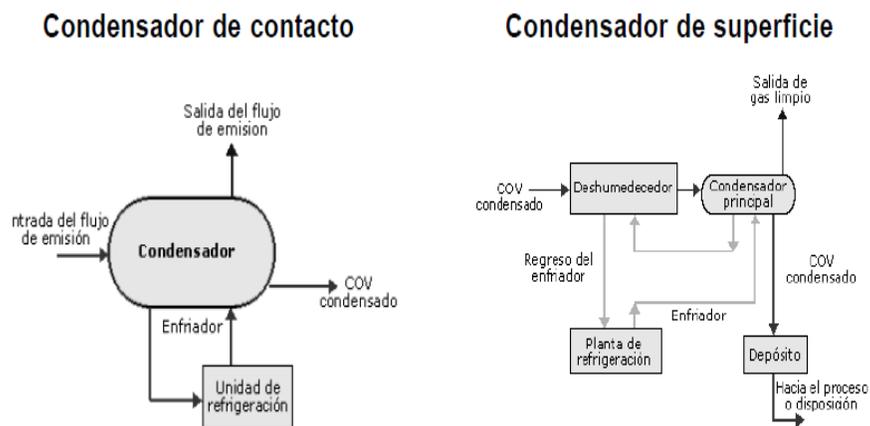
Figura 2. Adsorbedor

## Condensadores

Los condensadores remueven contaminantes gaseosos mediante la reducción de la temperatura del gas hasta un punto en el que el gas se condense y se pueda recolectar en estado líquido.

Estos dispositivos son usados generalmente para recuperar los productos valiosos de un flujo de desechos. En el control de la contaminación de aire se emplean condensadores de contacto y de superficie.

En los condensadores de contacto, el gas hace contacto con un líquido frío, en los condensadores de superficie los gases entran en contacto con una superficie fría en la cual circula un líquido o gas enfriado, como la parte exterior de un tubo (Inche, 2004).



Fuente: [http://165.158.1.117/bvsci/e/fulltext/orienta/lecc8/lecc8\\_2a.html](http://165.158.1.117/bvsci/e/fulltext/orienta/lecc8/lecc8_2a.html)

Figura 3. Condensadores de contacto y de superficie

## Combustión

En el proceso de combustión se eliminan compuestos orgánicos, así como determinadas sustancias inorgánicas transformándolos en dióxido de carbono y vapor de agua. La combustión puede ser

espontánea o por procesos catalíticos (Nerea Martin Estevez-Monica Melon Vega-Pili Sanchez Alviz, 2000).

- La **combustión espontánea** trata de eliminar gran parte de los gases que son tóxicos y de olores fétidos, esta se realiza a altas temperaturas y con tiempo de retención controlado, lo cual hace que el costo de combustible sea elevado.
- Los **procesos catalíticos** tienen como finalidad la combustión a temperaturas más bajas en presencia de un catalizador que por lo general es un metal de transición colocado en una matriz de alúmina. Este proceso es empleado para la eliminación de trazas de compuestos que presentan fenoles, formaldehído, azufre, entre otros. La desventaja que presenta la combustión catalítica es la contaminación del catalizador por ciertas sustancias en forma de partículas.

### **1.3.3 Control de emisiones para captación de partículas**

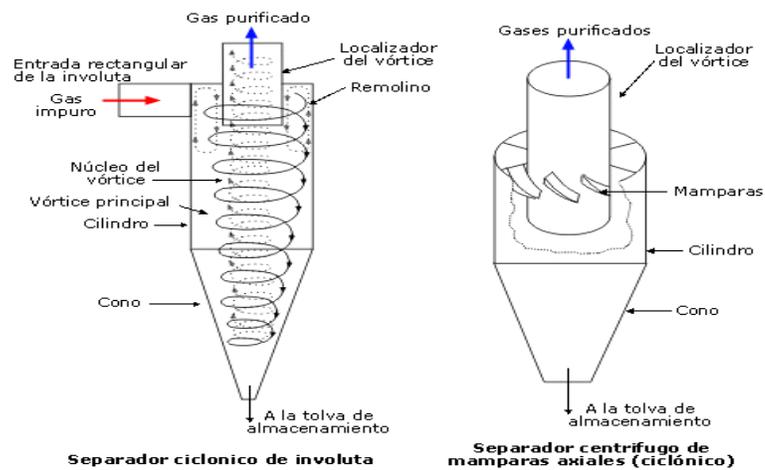
Para la captación de partículas, se pueden establecer los siguientes tipos de equipos de depuración: colectores de inercia o ciclones, precipitaciones electrostáticas, filtros de mangas, lavadoras y absorbedores húmedos.

#### **Ciclones**

Los ciclones separan las partículas por inercia, están formados básicamente por un recipiente cilíndrico vertical donde se introduce tangencialmente el gas cargado con material particulado, en donde la corriente es desviada en círculo debido a la fuerza centrífuga entonces la partículas se lanzan al exterior al formar la mezcla gaseosa un

remolino vertical descendente, dicha corriente espiral del gas cambia de dirección al llegar al fondo del recipiente, saliendo por un conducto situado en el eje.

Los ciclones son equipos útiles y baratos que pueden captar material particulado en seco ligero o grueso, pero su eficiencia de captación es baja para partículas pequeñas, reduciendo su utilización a un proceso previo al paso de los gases por un equipo de captación más eficiente.



Fuente: [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_orientacion/lecc8/lecc8\\_3e.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_orientacion/lecc8/lecc8_3e.html)

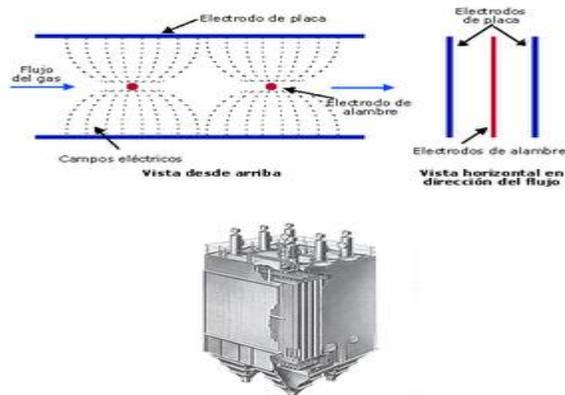
Figura 4. Ciclón

### Precipitadores electrostáticos

En los precipitadores electrostáticos las partículas se cargan eléctricamente para someterlas a la acción de un campo eléctrico que las atrae hacia los electrodos que generan el campo depositándose en ellos.

La ventaja de estos precipitadores consiste en que pueden separar cualquier tipo de sustancia en forma de partícula con una eficiencia

superior al 99%, claro está que en partículas que no deben poseer una alta resistencia eléctrica, en el caso de que esto suceda será necesario un acondicionamiento químico de la corriente gaseosa.



Fuente: <http://web.ing.puc.cl/power/alumno10/mitigacion/Precipitador%20electrostatico-MP.html>

**Figura 5. Precipitador electrostático**

## Filtros

En los filtros, la corriente de gases cargados con material particulado atraviesa un medio poroso en donde dichas partículas quedan atrapadas. Una de las variantes de filtros más usadas corresponde al filtro de mangas, los cuales pueden tratar grandes volúmenes de gases con alta concentración de partículas.

Con este dispositivo es posible conseguir eficiencias mayores al 99% independiente de las características del gas, alcanzando una separación de partículas de un tamaño de 0.01 micras.

Este proceso conforme pasa el gas genera una capa de polvo sobre el material filtrante provocando que la intercepción y retención de partículas vaya aumentando, como consecuencia se incrementa la resistencia al flujo y la pérdida de carga, obligando a disponer de un mecanismo de limpieza automática y frecuente del filtro.

## Lavadores y absorbedores húmedos

Finalmente los lavadores y absorbedores húmedos son equipos que transfieren la materia suspendida en un gas portador a un líquido adecuado para la absorción en la fase de mezcla gas – líquido, a causa de la colisión entre las partículas y las gotas de líquido en suspensión en el gas.

Para la clasificación de los lavadores de partículas se considera la energía que demanda el dispositivo para mover el fluido en su interior, la tabla 1 muestra los tipos de lavadores de partículas, sus consumos energéticos, el tamaño de partícula capaz de remover y sus eficiencias respectivamente.

**Tabla 1. Tipos de lavadores de partículas**

	Consumo Energético [HP/1000 cfm]	Eficiencia	Tamaño de Partícula [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Energía Baja</b>	0,5 a 2	90%	>8
<b>Energía Moderada</b>	1 a 3,5	95%	>5
<b>Alta Energía</b>	3 a 10	98%	>0,5

(Vera, 2005)

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Mediante el proceso de diseño se describe los pasos a seguir a partir de un escenario que nace de las necesidades del usuario, hasta las especificaciones de un equipo que satisface dicha necesidad, siendo nuestro mayor paso en dicha secuencia de diseño la definición del problema y los distintos puntos de decisión en donde encontramos las alternativas para satisfacer la necesidad y sus correspondientes subproblemas, para luego ser evaluadas con la finalidad de escoger una que sea en términos técnicos y económicos las más viable, en la Figura 6 se muestra brevemente la metodología de diseño aplicada.

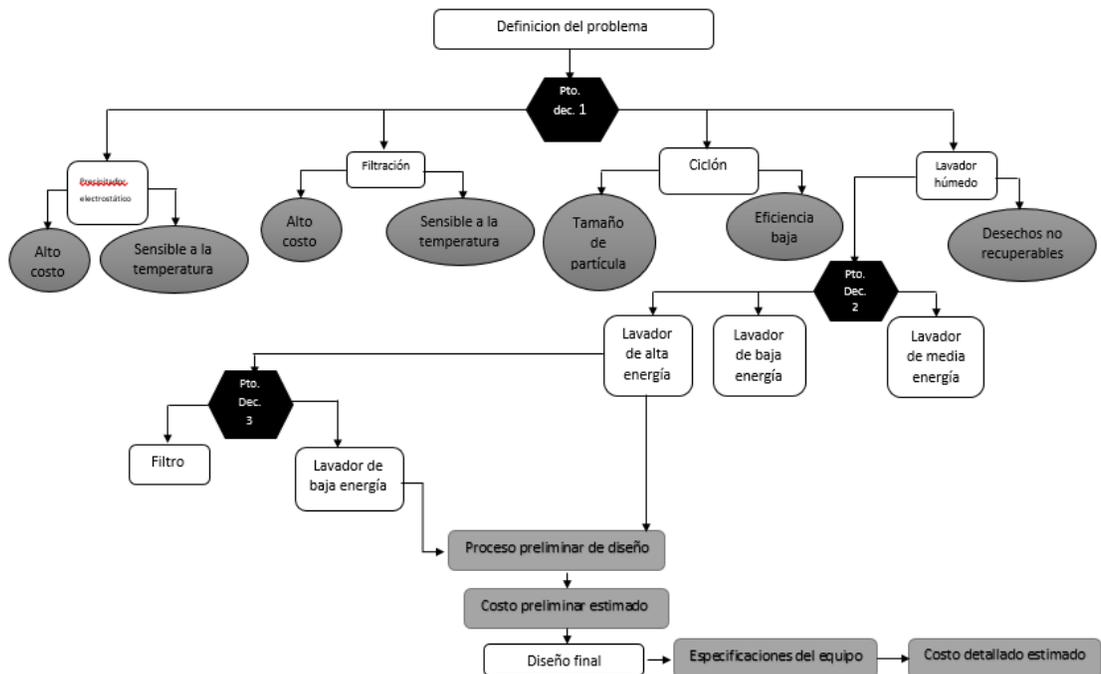


Figura 6. Diagrama de flujo de la Metodología de diseño aplicada

El objetivo principal de nuestro trabajo consiste en el rediseño de un tren de depuración de gases emitidos por un incinerador de desechos hospitalarios del Centro de desarrollo tecnológico sustentable, cuya finalidad es estrictamente académica, de esta manera se establece como necesidad que nuestro diseño

considere la aplicación de tecnología a menor costo, priorizando también las normas ambientales respectivas.

Una vez definido el problema en el cual se requiere remover tanto material particulado como gases contaminantes producto de la incineración, se establece el primer punto de decisión que considerara los distintos equipos capaces de remover los contaminantes anteriormente mencionados, así como los problemas o desventajas de cada uno en su aplicación.

Luego de enunciar las distintas alternativas con sus respectivos problemas, estas se evaluarán mediante el uso de dos matrices de decisión correspondientes al caso de remoción de material particulado y al de gases contaminantes, ambas en función de parámetros de interés ponderados porcentualmente debido a su relevancia en el proceso de diseño.

Los equipos sujetos a evaluación para la matriz de decisión para material particulado son: ciclones, precipitadores electrostáticos, filtros de mangas y lavadores húmedos. Se considerará como parámetros de interés el costo del equipo, susceptibilidad a los cambios de temperatura, tamaño de partículas y la eficiencia de captación de contaminantes, donde la eficiencia tendrá el mayor peso seguido del costo y el tamaño de partícula.

**Tabla 2. Matriz de decisión para control de material contaminado**

	Costo (25%)	Temperatura (10%)	Tam. Part. (25%)	Eficiencia (40%)	Total
Ciclones	0,75	0,4	0,5	0,8	2,45
Precip Elect	0,25	0,1	1	1,6	2,95
Filtros Mangas	0,5	0,3	0,25	1,6	2,65
Absorb Húmedos	1	0,2	0,75	1,2	3,15

El resultado de la primera matriz nos lleva al segundo punto de decisión, en donde se escoge el equipo que específicamente resuelva el problema del material particulado cuyas desventajas no superen sus beneficios.

Adicional a lo anterior se muestran las tablas 3 y 4, que ilustran las ventajas y desventajas de las diferentes alternativas para el control de emisiones.

**Tabla 3. Ventajas y Desventajas de equipos para control de partículas**

<b>EQUIPO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>Ciclón</b>	<p>Bajo costo instalado y de mantenimiento.</p> <p>Operación con gases a altas temperaturas.</p>	<p>Eficiencia de captación disminuye a medida que el tamaño de partícula decrece.</p>
<b>Lavadores y absorbedores húmedos</b>	<p>Eficiencia de colección relativamente alta.</p> <p>Permite manejar gases inflamables con poco riesgo.</p> <p>Reducción en la temperatura de gases calientes.</p> <p>Permite remover gases y partículas al mismo tiempo.</p> <p>Permite variar su eficiencia de colección con facilidad.</p> <p>Control de partículas sólidas o líquidas.</p>	<p>Pueden presentar problemas de corrosión.</p> <p>Tanto el líquido de lavado como los sedimentos producidos pueden generar contaminación al desecharse.</p> <p>Un alto incremento en la humedad del gas hace visible la descarga en la chimenea.</p> <p>No se puede recuperar las partículas tal como son generadas en la fuente</p>
<b>Precipitadores electrostáticos</b>	<p>Alta eficiencia de colección incluso para partículas muy pequeñas.</p> <p>Puede manejar grandes volúmenes de gas.</p> <p>Permite la recuperación del material colectado ya sea sólido o líquido.</p> <p>Puede manejar gases a altas temperaturas.</p> <p>Caída de presión pequeña. Bajo costo de operación.</p>	<p>Alto costo de instalación. El espacio requerido es grande.</p> <p>Las variaciones en las condiciones de operación pueden afectar su desempeño.</p> <p>Poco adecuado cuando la resistividad de las partículas es demasiado alta o demasiado baja.</p> <p>No son útiles en la remoción de contaminantes gaseosos.</p>
<b>Filtros de mangas</b>	<p>Eficiencia de colección es muy alta.</p> <p>Permite manejar fluidos de gas pequeños o muy grandes.</p> <p>Se pueden utilizar para filtrar diversos tipos de polvos.</p> <p>Consumo de energía moderado.</p>	<p>El espacio que ocupan es grande.</p> <p>Riesgos de explosión e incendio ante la presencia de chispas.</p> <p>El manejo de gases húmedos provoca problemas en la limpieza de las mangas.</p> <p>Condiciones extremas de temperatura y corrosión pueden dañar las mangas.</p>

(Vera, 2005)

**Tabla 4. Técnicas de depuración de gases**

<b>Técnica de depuración</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>ABSORCION</b>	Útil para recuperar productos o purificar gases con alta concentración de compuestos orgánicos.	El líquido absorbente de poseer propiedades especiales de solubilidad del contaminante deberá con el tiempo ser desechado o dirigido hacia algún sistema de tratamiento
<b>ADSORCION</b>	La concentración es pequeña. El contaminante no puede ser oxidado. El contaminante es venenoso. Se requiere purificar aire en espacios cerrados.	No es adecuado en gases que contienen partículas, ya que obstruye el material adsorbente.
<b>CONDENSACION</b>	Útil para recuperar gases que intervienen en procesos productivos.	Su uso no es conveniente a las condiciones que son expulsados la mayoría de los gases de descarga, es decir cercanos a condiciones de saturación que podrían permitir que estos gases se enfríen o aumenten la presión externa

(Vera, 2005)

Posteriormente se procede a llegar al tercer punto de decisión, cuyo resultado depende del uso de la matriz para el caso de remoción de gases contaminantes, para este punto el costo, la temperatura, la eficiencia y la eliminación de desechos son de gran importancia al momento de escoger un equipo para dicho propósito, para este caso el mayor peso le corresponde a la eficiencia luego el costo junto con la eliminación de desechos y finalmente la temperatura.

**Tabla 5. Matriz de decisión para remoción de gases contaminantes**

	Costo (25%)	Sensible a la temperatura (10 %)	Eficiencia de remoción (40 %)	Eliminación de desechos (25 %)	Total
<b>Filtro</b>	0,25	0,1	0,4	0,5	1,25
<b>Lavador Húmedo</b>	0,5	0,2	0,8	0,25	1,75

Cabe destacar que el objetivo de este trabajo es diseñar un tren de depuración de gases contaminantes para un incinerador de desechos con propósitos didácticos, se consideró que la aplicación de tecnologías sofisticadas y por consecuencia costosas no serán tomadas como alternativas en este estudio, motivo por el cual las alternativas propuestas provienen de sugerencias de normas ambientales aplicadas a este caso particular, es decir a la incineración de desechos hospitalarios y los equipos utilizados en funcionamiento independiente y sus combinaciones con otros, siendo estos en su mayoría los ya mencionados como tecnologías sofisticadas.

Para este caso en particular la EPA en el documento “Compilation of Air Pollutant Emission Factors” conocido como AP – 42, sugiere que si se requiere remover gas ácido y material particulado simultáneamente es posible combinar un lavador Venturi seguido por uno de baja o media energía, cuyo propósito individual para cada tipo de lavador húmedo será:

Lavador húmedo de baja energía: utilizado principalmente para el control de gases ácidos, siendo las torres de aspersion las más utilizadas.

Lavador húmedo de media energía: para control de material particulado y gases ácidos, el más utilizado en esta categoría corresponde a las torres rellenas.

Lavador húmedo de alta energía: usado principalmente para material particulado, para mayor remoción se recomienda el uso de Venturis.

Control Level <sup>b</sup>	NO <sub>x</sub> <sup>c</sup>			CO <sup>c</sup>			SO <sub>2</sub> <sup>c</sup>		
	lb/ton	kg/Mg	EMISSION FACTOR RATING	lb/ton	kg/Mg	EMISSION FACTOR RATING	lb/ton	kg/Mg	EMISSION FACTOR RATING
Uncontrolled	3.56 E+00	1.78 E+00	A	2.95 E+00	1.48 E+00	A	2.17 E+00	1.09 E+00	B
Low Energy Scrubber/FF									
Medium Energy Scrubber/FF							3.75 E-01	1.88 E-01	E
FF							8.45 E-01	4.22 E-01	E
Low Energy Scrubber							2.09 E+00	1.04 E+00	E
High Energy Scrubber							2.57 E-02	1.29 E-02	E
DSI/FF							3.83 E-01	1.92 E-01	E
DSI/Carbon Injection/FF							7.14 E-01	3.57 E-01	E
DSI/FF/Scrubber							1.51 E-02	7.57 E-03	E
DSI/ESP									

<sup>a</sup> References 7-43. Source Classification Codes 5-01-005-05, 5-02-005-05. Blanks indicate no data.

<sup>b</sup> FF = Fabric Filter

DSI = Dry Sorbent Injection

ESP = Electrostatic Precipitator

<sup>c</sup> NO<sub>x</sub> and CO emission factors for uncontrolled facilities are applicable for all add-on control devices shown.

Control Level <sup>b</sup>	Total Particulate Matter			Lead <sup>c</sup>			TOC		
	lb/ton	kg/Mg	EMISSION FACTOR RATING	lb/ton	kg/Mg	EMISSION FACTOR RATING	lb/ton	kg/Mg	EMISSION FACTOR RATING
Uncontrolled	4.67 E+00	2.33 E+00	B	7.28 E-02	3.64 E-02	B	2.99 E-01	1.50 E-01	B
Low Energy Scrubber/FF	9.09 E-01	4.55 E-01	E						
Medium Energy Scrubber/FF	1.61 E-01	8.03 E-02	E	1.60 E-03	7.99 E-04	E			
FF	1.75 E-01	8.76 E-02	E	9.92 E-05	4.96 E-05	E	6.86 E-02	3.43 E-01	E
Low Energy Scrubber	2.90 E+00	1.45 E+00	E	7.94 E-02	3.97 E-02	E	1.40 E-01	7.01 E-02	E
High Energy Scrubber	1.48 E+00	7.41 E-01	E	6.98 E-02	3.49 E-02	E	1.40 E-01	7.01 E-02	E
DSI/FF	3.37 E-01	1.69 E-01	E	6.25 E-05	3.12 E+01	E	4.71 E-02	2.35 E-02	E
DSI/Carbon Injection/FF	7.23 E-02	3.61 E-02	E	9.27 E-05	4.64 E-05	E			
DSI/FF/Scrubber	2.68 E+00	1.34 E+00	E	5.17 E-05	2.58 E-05	E			
DSI/ESP	7.34 E-01	3.67 E-01	E	4.70 E-03	2.35 E-03	E			

<sup>a</sup> References 7-43. Source Classification Codes 5-01-005-05, 5-02-005-05. Blanks indicate no data.

<sup>b</sup> FF = Fabric Filter

DSI = Dry Sorbent Injection

ESP = Electrostatic Precipitator

<sup>c</sup> Hazardous air pollutants listed in the *Clean Air Act*.

**Figura 7 a y b. Factores de Emisión de contaminantes y los equipos utilizados (EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1997)**

Teniendo este criterio en cuenta junto a los resultados producto de evaluar las alternativas en las matrices de decisión que lo corroboran, los equipos de

control de emisión seleccionados para gases contaminantes y material particulado son una torre de aspersión y un Venturi respectivamente.

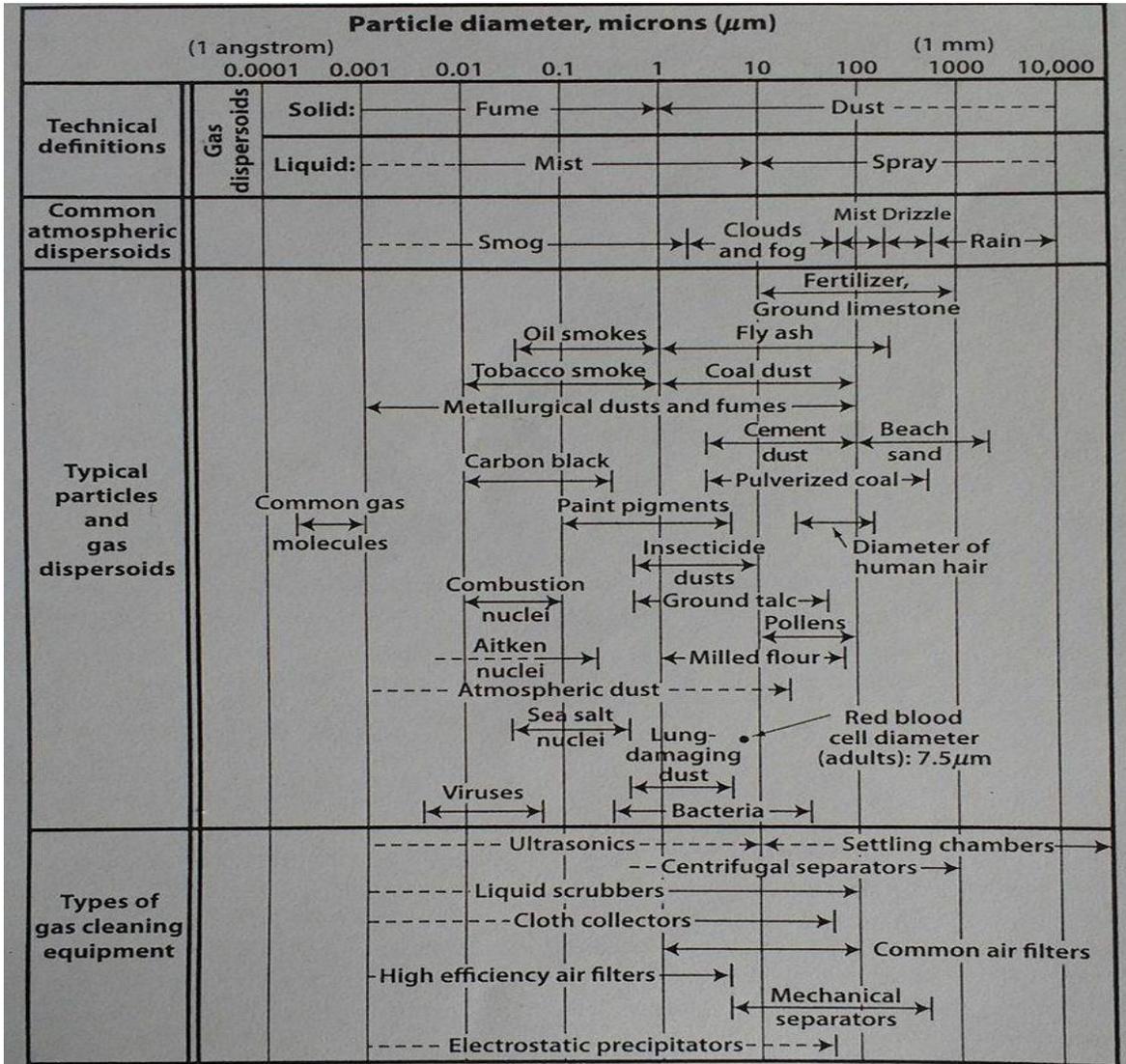


Figura 8. Tamaño de Partícula vs Equipos para Control de Emisiones

(Ally, 2011)

## **2.1 Normas utilizadas para la disposición de desechos hospitalarios**

- Para el desarrollo del presente proyecto se utilizará como referencia la norma “NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA EL MANEJO Y DISPOSICIÓN FINAL DE DESECHOS SÓLIDOS”, es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental (Ley No. 37. RO/ 245 de 30 de Julio de 1999 y del Acuerdo Ministerial No. 14630. RO/ 991 de 3 de Agosto de 1992) para la Prevención y control de la Contaminación Ambiental y se somete a las disposiciones de estos, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional. LIBRO VI ANEXO 6 de la República del Ecuador.
- Otras normativas a revisar serán el Reglamento de Manejo de Desechos Sólidos en los Establecimientos de Salud de la República del Ecuador. Registro Oficial N° 106 de 10 de enero de 1997 del libro de Biolegis (legislación nacional) o Bioecuador, del acuerdo ministerial N° 001005 de 26 de Diciembre de 1996, norma EPA 452/B-02-002 (U.S. Environmental Protection Agency) capítulo 2 de incineradores y la norma del Ministerio de Ambiente de la República de Colombia de 21 de Enero del 2002.

## **2.2 Diseño del lavador Venturi**

A través del proceso de selección se determinaron los equipos a utilizar para este proyecto siendo el lavador Venturi el responsable de remover material particulado, ya que será quien reciba la carga producto de la incineración en primera instancia. Este equipo en particular y su capacidad de captación dependerán en forma considerable de la velocidad relativa entre el líquido de lavado y las partículas a remover, esto se debe a que estos dispositivos tienen la particularidad de presentar tres zonas en su geometría, cada una con un propósito, tales zonas son:

- **Zona de convergencia:** es por donde el gas ingresa.
- **Garganta:** es aquí donde el gas alcanzara su máximo valor de velocidad debido al gradual cambio de sección hasta llegar a ella y justo en este lugar donde se inyecta agua para captar partículas debido a la velocidad alcanzada, provocando una ruptura en la tensión superficial del agua generando la formación de pequeñas gotas. Todo esto con la finalidad de que ocurra el contacto físico entre las gotas del líquido de lavado y las partículas, para que estas últimas sean removidas de la descarga gaseosa.
- **Zona de divergencia:** este punto corresponde a la salida del gas una vez terminado el proceso.

El valor de la velocidad relativa entre las gotas del líquido de lavado y las partículas a remover es de gran importancia ya que dan origen a los mecanismos físicos con los que las partículas son captadas por las gotas del líquido antes mencionado y ocurren en cualquier tipo de lavador húmedo, los cuales se describen a continuación:

- **Impacto inercial:** corresponde al principal mecanismo de remoción, el cual ocurre cuando las partículas tienen una inercia tal que son capaces de abandonar la trayectoria del flujo del gas que las transporta para impactar en la superficie de las gotas quedando retenidas, mientras el gas se desvía alrededor de ellas, siendo las partículas de diámetro mayor a 10  $\mu\text{m}$  colectadas comúnmente por este mecanismo.
- **Intercepción:** se da en partículas de diámetros 0.1  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  que aún siguen la trayectoria de las líneas de flujo del gas y que no fueron captadas por el impacto inercial, estas al pasar muy cerca de las gotas provoca un contacto superficial entre ambas quedando así la partícula adherida.

- **Difusión:** ocurre por las colisiones aleatorias con las moléculas de gas cuando su trayectoria con las gotas del líquido de lavado coinciden quedando las partículas contaminantes atrapadas, este mecanismo comúnmente se da en partículas de diámetro 0.1  $\mu\text{m}$  incluso a menores de 0.5  $\mu\text{m}$ .

Los mecanismos de impacto inercial e intercepción serán beneficiados a medida que la velocidad relativa aumente, ya que esto a su vez incrementaría la capacidad de captación de partículas, es por esta razón que el lavador Venturi será utilizado.

Para realizar los cálculos pertinentes al diseño del lavador Venturi es necesario conocer los parámetros que influyen en su desempeño, siendo primero la distribución del tamaño de partícula y la cantidad de material particulado con estos datos se determina la eficiencia global de colección del equipo, describiendo que los diferentes tamaños de partícula no serán colectadas con la misma eficiencia predominando un solo mecanismo de colección de las mismas, además de que se puede obtener cuanto material particulado podrá removerse de la corriente gaseosa.

Sabiendo la temperatura y flujo de la corriente del gas se determinará la cantidad de líquido de lavado que se evaporará en el proceso de remoción de tal manera que si la evaporación aumenta, más será la cantidad de líquido a inyectarse para tratar el gas. Con el flujo de gas se determinará el tamaño que debe tener el lavador.

Los valores de velocidad del gas y caída de presión se encuentran directamente relacionados debido a que al aumentar la velocidad ayudará a los mecanismos de colección a incrementar su posibilidad de captación, pero también conlleva a un aumento de la caída de presión para cual se deberá llegar a un equilibrio razonable entre ambas variables, mediante

valores recomendados por normas técnicas basadas en datos estadístico de estudios previos aplicados a sistemas de depuración de gas de desechos hospitalarios.

La relación liquido-gas nos indica que volumen de líquido debe inyectarse para tratar un determinado volumen de gas, es decir que a mayor relación implicara una mayor eficiencia de colección.

El tamaño de la gota del líquido de lavado nos permite manejar el área superficial de captación, sabiendo que a medida que el tamaño de la gota aumenta menor será el área superficial de captación, así mismo que al reducir este tamaño implica que la corriente del gas acelere a las gotas a la velocidad del gas, provocando que la velocidad relativa entre ambos disminuya causando que incluso arrastre al líquido de lavado fuera de la cámara, es por este motivo que se recomienda que este diámetro de la gota este entre 500  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$  (Vera, 2005).

Finalmente la longitud de la garganta y la longitud de la zona divergente deberán garantizar que el contacto entre las gotas y las partículas sea satisfactorio hasta que las gotas sean aceleradas a la velocidad del gas alcanzando ambas la misma velocidad, circunstancia en donde los mecanismos de colección de partículas reducen su acción.

### **2.2.1 Calculo de la eficiencia global de remoción**

Las partículas emitidas en la descarga gaseosa contaminada presentas diferentes tamaños, debido a esto serán distribuidas por rangos, cada rango de partículas presentan un porcentaje de la masa total analizada, de manera que se obtenga la distribución del tamaño de partícula, información que será indispensable al momento de diseñar el lavador Venturi.

Estos rangos de partículas a su vez presentan diferentes eficiencias de remoción, es por ello que es necesario establecer una eficiencia global de remoción, que será expresada de la siguiente forma:

$$\eta_o = \sum \eta_j \cdot m_j \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde

$\eta_o$  = eficiencia global

$\eta_j$  = eficiencia de colección para el rango j

$m_j$  = masa porcentual para el rango j

También se determinara la cantidad de material particulado removido mediante esta relación:

$$m_o = m_i (1 - \eta_o) \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Siendo m el flujo másico de la carga de partícula, y los subíndices i y o valores de entrada y salida del equipo respectivamente.

Una variable muy importante es la penetración que es la fracción de partícula de un diámetro específico que no se capturo, logrando atravesar el equipo de control de partículas, cuya relación con la eficiencia de remoción es la siguiente:

$$P_t = 1 - \eta \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Mediante la ecuación desarrollada por Calvert en 1972, en donde considera el tamaño de la gota del líquido de lavado, el parámetro de impacto, entre otros, se puede predecir la penetración con esta relación:

$$P_t = EXP \left\{ \frac{Q_L \cdot V_G \cdot \rho_L \cdot d_d}{55 \cdot Q_G \cdot \mu_G} \cdot \left[ -0.7 - K_p \cdot f' + 1.4 \cdot LN \left( \frac{K_p \cdot f' + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + K_p \cdot f'} \right] \frac{1}{K_p} \right\}$$

(Ecuación4)

En donde

$K_p$  = parámetro de impacto (Ecuación5) para la velocidad del gas al entrar a la garganta

$F'$  = valor empírico, que puede ser de 0.25 para partículas hidrofóbicas y 0.5 para partículas hidrofílica.

Esta ecuación es eficiente en un 100% para partículas mayores a 5  $\mu m$  pero para valores menores la penetración de relaciona con la caída de presión del dispositivo por medio de la siguiente relación:

$$P_t = 3.47 \cdot (\Delta P)^{-1.43} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

El parámetro de impacto forma parte importante en el diseño ya que describe el comportamiento del impacto inercial como principal mecanismo de colección en los lavadores húmedos, indicando este valor de ser grande implicaría que un buen número de partículas impactaran las gotas del líquido de lavado, de lo contrario si el parámetro de impacto es pequeño las partículas seguirán las líneas de flujo alrededor de las gotas. Para partículas en el régimen de Stokes donde el número de Reynolds es menor a uno, el parámetro de impacto se expresa de la siguiente manera:

$$K_p = \frac{K_c \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot V_p}{9 \cdot \mu_g \cdot d_d} = \frac{d_a^2 \cdot V_p}{9 \cdot \mu_g \cdot d_d} \quad \text{(Ecuación6)}$$

Donde

$K_c$  = factor de corrección de Cunningham

$\rho_p$  = densidad de partícula,  $g/cm^3$

$d_p$  = diámetro físico de partícula, cm

$V_p$  = velocidad de partícula (igual a la del gas), cm/s

$d_d$  = diámetro de las gotas, cm

$\mu_g$  = viscosidad del gas, Poise

$d_a$  = diámetro aerodinámico de partícula, cm

$K_c$  tiene como propósito los efectos del deslizamiento en partículas muy pequeñas, es decir menores a 5  $\mu\text{m}$ .

El diámetro promedio de gota se lo puede predecir mediante el uso de la ecuación de diámetro de Sauter la cual se define como:

$$d_d = \frac{58600}{V_G} \cdot \left( \frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 597 \cdot \left( \frac{\mu_L}{(\sigma \cdot \rho_L)^{0.5}} \right)^{0.45} \left( 1000 \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1.5} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde,

$d_d$  = diámetro medio de Sauter para las gotas,  $\mu\text{m}$

$V_G$  = velocidad del gas, cm/s

$\sigma$  = tensión superficial del líquido, dinas/cm

$\rho_L$  = densidad del líquido, g/cm<sup>3</sup>

$\mu_L$  = viscosidad del líquido, poise

$Q_L$  = flujo volumétrico del líquido, m<sup>3</sup>/s

$Q_G$  = flujo volumétrico del gas, m<sup>3</sup>/s

La caída de presión no permitirá conocer la demanda de energía necesaria para mover el gas a lo largo del dispositivo, para esto se recurrirá a la siguiente expresión:

$$\Delta P = 2 \cdot \rho_L \cdot V_G^2 \cdot \left( \frac{Q_L}{Q_G} \right) \cdot \left( 1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2} \right) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Siendo  $\Delta P$  en dinas/cm<sup>2</sup>, mientras que X se lo calculara mediante la siguiente ecuación:

$$X = \frac{3 \cdot l_t \cdot C_D \cdot \rho_G}{16 \cdot d_d \cdot \rho_L} + 1 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde

X = longitud adimensional de la garganta

$l_t$  = longitud de la garganta, cm

$C_D$  = coeficiente de arrastre para las gotas en función del diámetro de Sauter

Es común que los lavadores Venturi se encuentre en condiciones donde el número de Reynolds se encuentre en un rango entre 10 y 500, donde su relación se define de la siguiente forma :

$$Re = \frac{\rho_G V_G d_d}{\mu_G} \quad (\text{Ecuación 10})$$

De manera que  $C_d$  puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$C_D = \frac{24}{Re_D} + \frac{4}{Re_D^{1/3}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

### Calculo del flujo volumétrico del gas

Para el diseño del lavador de partículas algunos parámetros deberán seleccionarse arbitrariamente, pero existen valores óptimos sugeridos en varias literaturas de diferentes autores (H.E., 1979) (W.T., 1998), que serán tomados como guía para la obtención de valores que serán indispensables para nuestro diseño.

Para la velocidad del gas en la garganta  $V_G$  de 3150 cm/s recomendado para obtener una alta eficiencia de remoción de material particulado, la relación liquido – gas de 4 lt/ m<sup>3</sup>, valor dentro del rango

que garantiza que el dispositivo remueve material particulado. Se conoce el flujo másico  $m'_{aire} = 1079.01 \text{ kg/h}$  del aire utilizado para el actual sistema de depuración, así como su temperatura igual  $600^\circ\text{C}$ , información que nos provee a su correspondiente densidad de  $0.4042 \text{ kg/m}^3$  (CONESUP) y nos permitirá calcular el caudal de gas usado por el equipo, de la siguiente manera:

$$Q_g = \frac{m'_{aire}}{\rho_{@600^\circ\text{C}}}$$

$$Q_G = \frac{1079.01 \text{ kg/h}}{0.4042 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q_G = 2669.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0.7415 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1571.15 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} = 11752.92 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

Por medio de la relación liquido-gas se puede determinar el flujo volumétrico del líquido necesario para el proceso de lavado.

$$\frac{Q_L}{Q_G} = 4 \frac{\text{lt}}{\text{m}^3}$$

$$Q_L = \frac{4}{1000} Q_G \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

$$Q_L = \frac{4}{1000} (0.7415 \frac{\text{m}^3}{\text{s}})$$

$$Q_L = 2.966 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 10.677889 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 6.28454 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} = 47.011 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

### **Dimensionamiento del lavador Venturi**

Como parte fundamental de este trabajo es utilizar los componentes estructurales existentes, es decir un Venturi de flujo rectangular (CONESUP), es por tal motivo que mediante mediciones se obtuvieron las dimensiones presentadas en la figura 9 correspondientes al equipo anteriormente mencionado, para luego determinar sus áreas

correspondientes. A partir de las áreas y sabiendo que la velocidad de ingreso del gas al Venturi es de  $8 \frac{m}{s}$ , mediante a un balance de flujo se obtiene la velocidad de salida del mismo que se muestra a continuación:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 = \frac{(0.32 \times 0.4)m}{(0.155 \times 0.21)m} (8 \frac{m}{s})$$

$$V_2 = 31.46 \frac{m}{s}, \text{ con un ancho de garganta } W_G = 21 \text{ cm}$$

Para la longitud de la sección divergente del Venturi que garantice una recuperación de presión adecuada esta generalmente es igual a 4 veces el ancho de la garganta siendo el siguiente su valor:

$$L_D = L_C = 4 W_G = 4 (21 \text{ cm}) = 84 \text{ cm} = 0.84 \text{ m}$$

$$L_t = 3W_G = 3(21\text{cm}) = 63\text{cm} = 0.63 \text{ m}$$

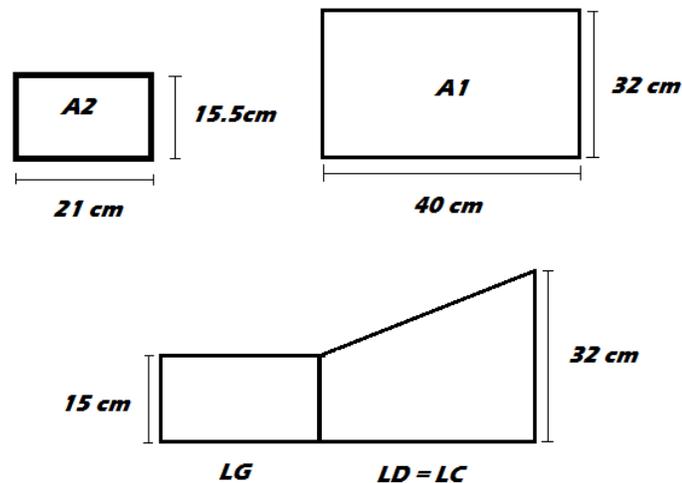


Figura 9. Dimensiones del lavador Venturi

## Determinación de la eficiencia global de remoción

Dadas las condiciones de entrada propias del incinerador referente al gas, se presentan las siguientes propiedades a una temperatura de 600°C que permitirán realizar los cálculos pertinentes a continuación: densidad de  $4.042 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ , viscosidad del gas  $\mu_G = 3.846 \times 10^{-4}$  poise y una carga de entrada al Venturi de 150 mg/scm (Delgado, 2006). También se considerara que será el agua responsable de realizar el lavado de los gases a una temperatura aproximada a la de saturación adiabática de 25°C, lo que corresponde a una densidad de  $1 \text{ g/cm}^3$ , una viscosidad de  $\mu_L = 8.91 \times 10^{-3}$  poise y una tensión superficial  $\sigma = 72.6 \text{ dinas/cm}$ . El sistema se asumirá como una atomización tipo gota, para luego calcular el diámetro de gota mediante la Ecuación 7 como sigue:

$$d_d = \frac{58600}{3150 \text{ cm/s}} \left( \frac{72.6 \text{ dinas/cm}}{1 \text{ g/cm}^3} \right)^{0.5} + 597 \left( \frac{8.91 \times 10^{-3} \text{ poise}}{(72.6 \text{ dinas/cm} \times 1 \text{ g/cm}^3)^{0.5}} \right)^{0.45} \left( 1000 \frac{2.966 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{0.7415 \text{ m}^3/\text{s}} \right)^{1.5}$$

$$d_d = 376.1795 \text{ } \mu\text{m}$$

Como se mencionó anteriormente se analizará los rangos de tamaños de partículas presentes en los gases cargados de material particulado, con la finalidad de establecer la eficiencia global, para ello recurriremos a la tabla 6 donde se detalla tanto los rangos de diámetros de partículas como los porcentajes de masas presente en su rango.

Rango( $\mu\text{m}$ )	Masa (%)
0-0.625	31.1
0.625-1	4.3
1-2.5	7.9
2.5-5	8.7
5-10	13
10-100	35

**Tabla 6. Distribución del tamaño de partícula emitida**

(H.E., 1979) (Vera, 2005) (W.T., 1998)

A partir de la Ecuación 6, se determina el parámetro de impacto utilizando como diámetro aerodinámico el valor promedio del rango, se empezara el análisis para el rango de 10 a 100  $\mu\text{m}$  cuyo diámetro aerodinámico es de 55  $\mu\text{m}$ , de manera similar se lo hará para el rango de 5 a 10  $\mu\text{m}$ , de manera que se pueda calcular el respectivo valor de penetración. Para partículas menores a 5  $\mu\text{m}$  no se realizara este cálculo de parámetro de impacto para obtener el valor de penetración, para dicho propósito usaremos la Ecuación 5.

$$K_p = \frac{(55 \times 10^{-4})^2 (3150 \text{ cm/s})}{9(3.846 \times 10^{-4} \text{ poise})(376.1795 \times 10^{-4} \text{ cm})}$$

$K_p = 732.93772$  , parámetro de impacto para rango de 10 a 100  $\mu\text{m}$

$$K_p = \frac{(7.5 \times 10^{-4})^2 (3150 \text{ cm/s})}{9(3.846 \times 10^{-4} \text{ poise})(376.1795 \times 10^{-4} \text{ cm})}$$

$K_p = 13.62901$  , parámetro de impacto para rango de 5 a 10  $\mu\text{m}$

$$P_T = EXP \left\{ \left( \frac{(2.966 \times 10^{-3})(3150 \text{ cm/s})(1 \text{ g/cm}^3)(376.1795 \times 10^{-4})}{55 \left(0.7415 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)(3.846 \times 10^{-4} \text{ poise})} \right)^{-0.7} \right. \\ \left. - (732.93772)(0.5) + 1.4LN \left( \frac{(732.93772)(0.5) + 0.7}{0.7} \right) \right. \\ \left. + \left( \frac{0.49}{0.7 + (732.93772)(0.5)} \right) \left( \frac{1}{732.93772} \right) \right\}$$

$P_T = 0.000017434$  , penetración para el rango de 10 a 100  $\mu\text{m}$

$$P_T = EXP \left\{ \left( \frac{(2.966 \times 10^{-3})(3150 \text{ cm/s})(1 \text{ g/cm}^3)(376.1795 \times 10^{-4})}{55 \left(0.7415 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)(3.846 \times 10^{-4} \text{ poise})} \right)^{-0.7} \right. \\ \left. - (13.62901)(0.5) + 1.4LN \left( \frac{(13.62901)(0.5) + 0.7}{0.7} \right) \right. \\ \left. + \left( \frac{0.49}{0.7 + (13.62901)(0.5)} \right) \left( \frac{1}{13.62901} \right) \right\}$$

$P_T = 0.001131506$  , penetración para el rango de 5 a 10  $\mu\text{m}$

$P_T = 3.47(\Delta p)^{-1.43}$  , penetración para valores menores a 5  $\mu\text{m}$

Para el cálculo de la penetración para valores de diámetro de partícula menores a 5  $\mu\text{m}$  , es necesario saber el valor de caída de presión correspondiente a este proceso y la longitud adimensional de la garganta, para ello se utilizara la Ecuación 8 y Ecuación 9 respectivamente y previo a estos cálculos el número de Reynolds, coeficiente de arrastre y la longitud optima de la garganta obtenidas con las ecuaciones Ecuación 10, 11 y 12.

$$R_{ed} = \frac{(4.042 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3)(3150 \text{ cm/s})(376.1795 \times 10^{-4} \text{ cm})}{(3.846 \times 10^{-4} \text{ poise})}$$

$$R_{ed} = 124.7299$$

$$C_D = \frac{24}{124.7299} + \frac{4}{(124.7299)^{1/3}}$$

$$C_D = 0.99299$$

$$X = \frac{3(63)(0.99299)(4.042 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3)}{16(376.1795 \times 10^{-4})(1 \text{ g/cm}^3)} + 1$$

$$X = 1.126$$

$$\Delta P = 2(1 \text{ g/cm}^3)(3150 \text{ cm/s})^2 \left( \frac{2.966 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.7415 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \right) (1 - (1.126)^2) + \sqrt{(1.126)^4 - (1.126)^2}$$

$$\Delta P = 24999.101 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} = 10.0366 \text{ in } H_2O = 2499.91 \text{ Pa}$$

Entonces:

$$P_T = 3.47(10.0366)^{-1.43}$$

$$P_T = 0.12825, \text{ penetración para valores menores a } 5 \mu\text{m}$$

Una vez obtenida los distintos valores de penetración mediante la Ecuación 3 obtendremos las eficiencias fraccionales de cada rango, para finalmente determinar la eficiencia global con la Ecuación 1 junto con la carga de partículas en los gases de salida del lavador.

$$\eta = 1 - (0.000017434)$$

$$\eta = 0.99998257$$

$$\eta_{frac} = (0.99998257)(35\%)$$

$\eta_{frac} = 34.99939$ , eficiencia fraccional para tamaño de partícula de 10 a 100  $\mu\text{m}$

$$\eta = 1 - (0.001131506)$$

$$\eta = 0.9988685$$

$$\eta_{frac} = (0.771342)(13\%)$$

$\eta_{frac} = 12.98529$ , eficiencia fraccional para tamaño de partícula de 5 a 10  $\mu\text{m}$

$$\eta = 1 - (0.12825)$$

$$\eta = 0.871749$$

$$\eta_{frac} = (0.871749)(31.1\%)$$

$\eta_{frac} = 27.11142$ , eficiencia fraccional para tamaño de partícula menores a 5  $\mu\text{m}$  con masa porcentual de 31.1%

$$\eta = 1 - (0.12825)$$

$$\eta = 0.871749$$

$$\eta_{frac} = (0.871749)(4.3\%)$$

$\eta_{frac} = 3.748524$ , eficiencia fraccional para tamaño de partícula menores a 5  $\mu\text{m}$  con masa porcentual de 4.3%

$$\eta = 1 - (0.12825)$$

$$\eta = 0.871749$$

$$\eta_{frac} = (0.871749)(7.9\%)$$

$\eta_{frac} = 6.8868$ , eficiencia fraccional para tamaño de partícula menores a 5  $\mu\text{m}$  con masa porcentual de 7.9%

$$\eta = 1 - (0.12825)$$

$$\eta = 0.871749$$

$$\eta_{frac} = (0.871749)(8.7\%)$$

$\eta_{frac} = 7.584224$ , eficiencia fraccional para tamaño de partícula menores a 5  $\mu\text{m}$  con masa porcentual de 8.7%

A continuación en la tabla 7 se presenta la tabla la distribución de tamaño de partícula y su eficiencia global

**Tabla 7. Eficiencia global del lavador Venturi.**

Rango ( $\mu\text{m}$ )	Masa (%)	Pt	N	Nfrac (%)
0-0.625	31.1	0.128250068	0.871749932	27.111423
0.625-1	4.3	0.128250068	0.871749932	3.7485247
1-2.5	7.9	0.128250068	0.871749932	6.8868245
2.5-5	8.7	0.128250068	0.871749932	7.5842244
5-10	13	0.001131506	0.998868494	12.98529
10-100	35	0.000017434	0.999982566	34.99939
<b>Efic global (%)</b>				<b>93.315677</b>

Obtenida nuestra eficiencia global del Venturi y la carga de entrada al mismo siendo  $m'_{aire} = 1079.01 \text{ kg/h}$  se determinara el flujo másico de la concentración de partículas a la salida del lavador mediante la Ecuación 2 de la siguiente forma:

$$m'_o = 1079.01 \text{ kg/h} (1 - 0.93315677)$$

$$m'_o = 72.1245 \text{ kg/h}$$

Como restricción de diseño se conoce que la concentración estimada es 150 mg/scm (Delgado, 2006) y su correspondiente concentración

admisible de para material particulado 69 mg/scm (EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1997), permitiendo a la vez con la relación anterior determinar la salida de contaminante del Venturi:

$$m_o = 150 \text{ mg/dscm}(1 - 0.93315677)$$

$$C_o = 150 \text{ mg/dscm} (1 - 0.93315677)$$

$m_o = 10.0235 \text{ mg/dscm}$  , valor obtenido se encuentra por debajo del límite permisible (Echeverri, 2006) (Huelva, s. f.).

Como parte adicional precedemos a validar los blower, quienes son los encargados no solo de movilizar los gases del incinerador al Venturi y posteriormente a la chimenea sino que son responsables de mantener las condiciones de temperatura apropiada para ingresar al sistema de depuración. Para esto se sabe que un lavador húmedo de baja energía opera con consumos de energía de entre 0.5 a 2 hp por cada  $1000 \frac{ft^3}{min}$  de gas con eficiencia de una 90%, para un Venturi consume energía en el rango de 3 a 10 hp por cada  $1000 \frac{ft^3}{min}$  de gas con una eficiencia del 98% (Vera, 2005), adicional a esto con el flujo de gas de  $1571.15 \frac{ft^3}{min}$  se podrá deducir que bombas son apropiadas para dicho caudal de gas la tabla 8 muestra según el valor dentro de rango de consumo de energía de los lavadores la que debería poseen los browser para mover el caudal de gas anteriormente mencionado.

**Tabla 8. Potencia de los blowers requeridas para mover el caudal de gas**

Equipo	Rango	Potencia usada del rango (HP)	Caudal en el rango (CFPM)	Caudal del gas (CFPM)	Potencia Requerida
Torre de Aspersión	0.5 – 2 HP	1	1000	1571.15	1.57115
Venturi	3 – 10 HP	3	1000	1571.15	4.71345
				<b>Total</b>	<b>6.2846</b>

El sistema actual opera con dos blowers que junto proveen una potencia de 6 hp, los cuales cumplirán satisfactoriamente con los requerimientos para mover el caudal de gas nuevo.

### 2.3 Diseño de la torre de aspersión ciclónica.

#### Cálculo de caudal de agua para la torre de aspersión ciclónica.

Para este cálculo es necesario saber el flujo másico de SO<sub>2</sub> que va a circular por el ciclón y la solubilidad del SO<sub>2</sub> en agua, con esto se puede hacer una relación de la cantidad de agua necesaria para disolver la masa de SO<sub>2</sub>.

El flujo másico del SO<sub>2</sub> es:

$$m_{SO_2} = 0.315280634 \frac{kg}{h} = 0.08757795 \frac{gSO_2}{s}$$

La solubilidad del SO<sub>2</sub> en agua a 25°C es:

$$\frac{9.4 gSO_2}{100 gH_2O}$$

Por lo tanto el flujo másico del agua será:

$$m_{H_2O} = 0.08757795 \frac{gSO_2}{s} * \frac{100 gH_2O}{9.4gSO_2} = 0.9316 \frac{gH_2O}{s}$$

Y el caudal Q será:

$$Q_L = 0.0147 GPM$$

#### Dimensionamiento de la torre de aspersión.

De manera similar al lavador Venturi se realiza la medición de dimensiones siendo para este caso el perímetro del tanque del ciclón del sistema de depuración actual igual a 253 cm, mismo que servirá de base

para construir la torre de aspersión ciclónica o lavador húmedo de baja energía correspondiente a este estudio, cuyas dimensiones estarán en función del diámetro correspondiente al perímetro medido  $D_o$ , la figura 10 presenta dichas dimensiones y su cálculo, se presenta a continuación:

$$P = 253 \text{ cm} = 2.53 \text{ m} = \pi D_o$$

$$D_o = 0.81 \text{ m}, \text{ diámetro de la zona cilíndrica del ciclón}$$

$$H_1 = 2D_o = 2(0.81 \text{ m})$$

$$H_1 = 1.62 \text{ m}, \text{ altura de la zona cilíndrica del ciclón}$$

$$H_2 = 2D_o = 1.62 \text{ m}, \text{ altura de la zona cónica del ciclón}$$

$$D_D = 0.25D_o = 0.25(0.81 \text{ m})$$

$$D_d = 0.2025 \text{ m}, \text{ diámetro de salida del conducto de desperdicios solidos}$$

$$D_e = 0.5D_o = 0.5(0.81 \text{ m})$$

$$D_e = 0.405 \text{ m}, \text{ diámetro de salida del conducto para aire limpio}$$

Para la caída de presión se utilizara usara el número de cabezas de velocidad NH, la densidad del gas a una temperatura de  $400^\circ \text{C}$  y la velocidad de entrada a la torres igual a  $31.46 \text{ m/s}$ , variables relacionada con la siguiente expresión:

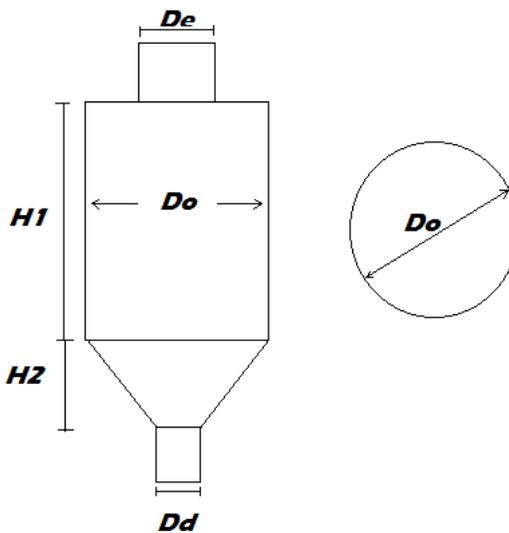
$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_1^2 NH = 0.5 \left(0.543 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (31.46 \text{ m/s}^2) \quad (8)$$

$$\Delta P = 2149.7 \text{ Pa} = 8.6306 \text{ in } H_2O$$

**Tabla 9. Características de un ciclón convencional**

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón			
		Lapple	Swift	Peterson-Whitby	Zenz
Diámetro del ciclón	$D_c/D_c$	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	$a/D_c$	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	$b/D_c$	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	$s/D_c$	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	$D_s/D_c$	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura parte cilíndrica	$h/D_c$	2.0	1.75	1.333	2.0
Altura parte cónica	$z/D_c$	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	$H/D_c$	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro salida partículas	$B/D_c$	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.88	381.79	342.29	425.41
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	8.0	7.76	8.0
Número de vórtices	N	8.0	5.5	3.9	8.0

(Echeverri, 2006)



**Figura 10. Dimensiones de las torres de aspersión ciclónica**

La torre de aspersión ciclónica utiliza el mecanismo de absorción de contaminantes mediante un líquido que entra en contacto con los gases, su diseño y el tipo de solución líquida utilizada determina en gran medida la eficiencia de eliminación de contaminantes, si el líquido es agua la eficiencia de eliminación de gases ácidos es del orden del 70% para el cloruro de hidrógeno y 30% para el dióxido de azufre, al añadir una

solución alcalina al proceso para neutralizar el efecto de estos ácidos, se obtienen un eficiencia de 96% (EFIG, 2005).

Debido a que previamente se calculó la cantidad de agua necesaria para disolver el dióxido de azufre en el ciclón, tanto sus efectos corrosivos sobre la estructura como su emisión al ambiente serán disminuidas con esta consideración para estimar esto se sabe que la masa presente de azufre en los desechos hospitalarios de 0.20312151 kg en peso seco mezclado con el combustible, también el peso total en base seca mezclado con el combustible de 68.6914 kg de los desechos (Delgado, 2006) y un factor de emisión de  $1.04 \frac{\text{kg contaminante}}{\text{Mg desechos}}$  cuando se utiliza un lavador húmedo de baja energía (EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1997), luego se utilizara la siguiente relación para estimar la salida de Dióxido de azufre en el gas:

$$\text{Emision de } SO_{2LES} = (\text{Factor emisión} \left[ \frac{\text{kg contaminante}}{\text{Mg desecho}} \right]) (\text{Mg Desechos})$$

$$\text{Emision de } SO_{2LES} = (1.04)(0.0686914)$$

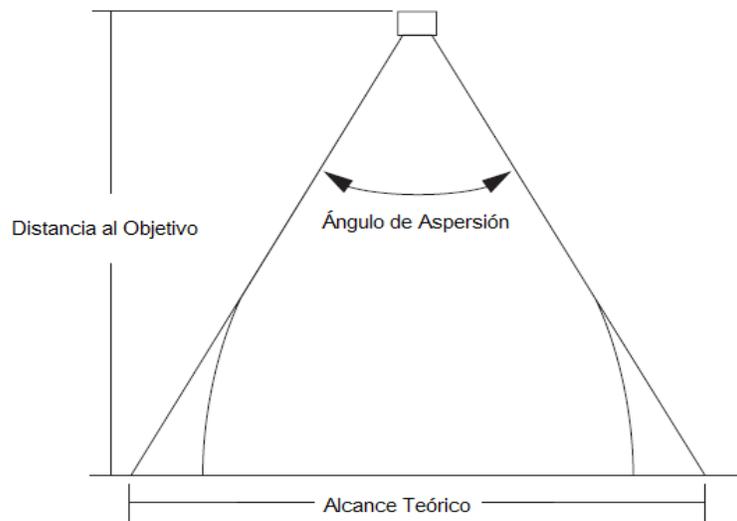
$$\text{Emision de } SO_{2LES} = 0.071439056 \text{ kg de } SO_2$$

Mediante una diferencia entre el valor total de dióxido de azufre en base seca mezclado con el combustible y la emisión estimada del mismo se determina la reducción porcentual o la eficiencia del equipo removiendo este contaminante mostrado a continuación:

$$\frac{(0.20312151) - (0.071439056)}{(0.20312151)} \times 100 = 64.83\% \text{ de } SO_2 \text{ removido}$$

## 2.4 Selección de boquillas para los equipos seleccionados

Para la selección de las boquillas de aspersión de los sistemas Venturi y Torre Ciclónica, se usaron como criterios de selección la distancia al objetivo y el alcance teórico. Estas boquillas se seleccionaron del catálogo de la compañía Spraying Systems (hidraulica); los que nos indican qué ángulo de aspersión se necesita a partir de los parámetros antes seleccionados, la figura 11 muestra el esquema que corresponde a los parámetros anteriormente mencionados.



**Figura 11. Criterios para selección de boquillas**  
(hidraulica)

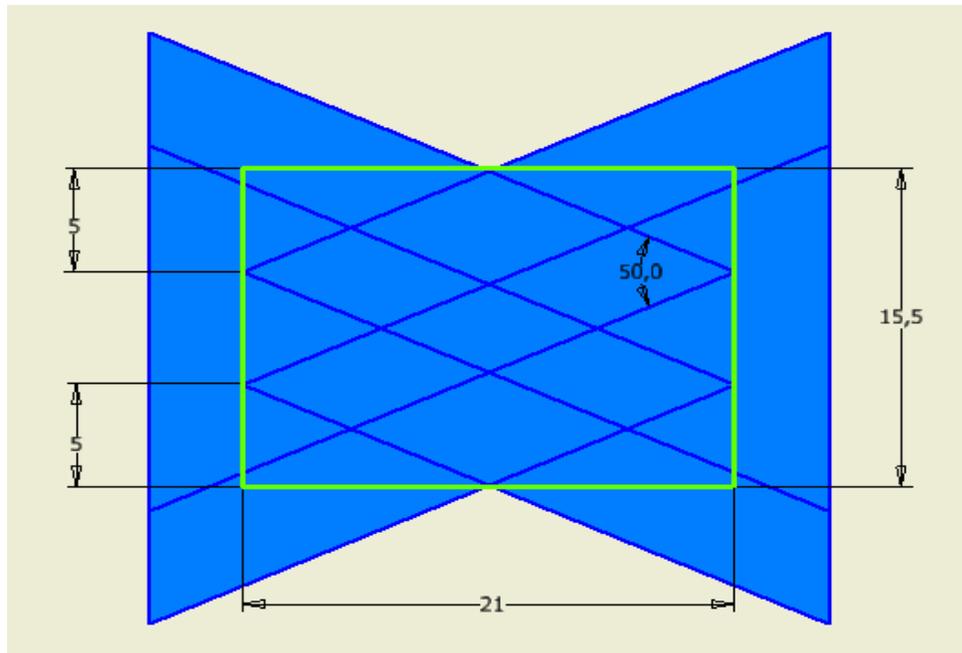
Spray Angle	2 in.	5 cm	4 in.	10 cm	6 in.	15 cm	8 in.	20 cm	10 in.	25 cm	12 in.	30 cm	15 in.	40 cm	18 in.	50 cm	24 in.	60 cm	30 in.	70 cm	36 in.	80 cm	48 in.	100 cm
5°	.2	.4	.4	.9	.5	1.3	.7	1.8	.9	2.2	1.1	2.6	1.3	3.5	1.6	4.4	2.1	5.2	2.6	6.1	3.1	7.0	4.2	8.7
10°	.4	.9	.7	1.8	1.1	2.6	1.4	3.5	1.8	4.4	2.1	5.3	2.6	7.0	3.1	8.8	4.2	10.5	5.2	12.3	6.3	14.0	8.4	17.5
15°	.5	1.3	1.1	2.6	1.6	4.0	2.1	5.3	2.6	6.6	3.2	7.9	3.9	10.5	4.7	13.2	6.3	15.8	7.9	18.4	9.5	21.1	12.6	26.3
20°	.7	1.8	1.4	3.5	2.1	5.3	2.8	7.1	3.5	8.8	4.2	10.6	5.3	14.1	6.4	17.6	8.5	21.2	10.6	24.7	12.7	28.2	16.9	35.3
25°	.9	2.2	1.8	4.4	2.7	6.7	3.5	8.9	4.4	11.1	5.3	13.3	6.6	17.7	8.0	22.2	10.6	26.6	13.3	31.0	15.9	35.5	21.2	44.3
30°	1.1	2.7	2.1	5.4	3.2	8.0	4.3	10.7	5.4	13.4	6.4	16.1	8.1	21.4	9.7	26.8	12.8	32.2	16.1	37.5	19.3	42.9	25.7	53.6
35°	1.3	3.2	2.5	6.3	3.8	9.5	5.0	12.6	6.3	15.8	7.6	18.9	9.5	25.2	11.3	31.5	15.5	37.8	18.9	44.1	22.7	50.5	30.3	63.1
40°	1.5	3.6	2.9	7.3	4.4	10.9	5.8	14.6	7.3	18.2	8.7	21.8	10.9	29.1	13.1	36.4	17.5	43.7	21.8	51.0	26.2	58.2	34.9	72.8
45°	1.7	4.1	3.3	8.3	5.0	12.4	6.6	16.6	8.3	20.7	9.9	24.9	12.4	33.1	14.9	41.4	19.9	49.7	24.8	58.0	29.8	66.3	39.7	82.8
50°	1.9	4.7	3.7	9.3	5.6	14.0	7.5	18.7	9.3	23.3	11.2	28.0	14.0	37.3	16.8	46.6	22.4	56.0	28.0	65.3	33.6	74.6	44.8	93.3
55°	2.1	5.2	4.2	10.4	6.3	15.6	8.3	20.8	10.3	26.0	12.5	31.2	15.6	41.7	18.7	52.1	25.0	62.5	31.2	72.9	37.5	83.3	50.0	104
60°	2.3	5.8	4.6	11.6	6.9	17.3	9.2	23.1	11.5	28.9	13.8	34.6	17.3	46.2	20.6	57.7	27.7	69.3	34.6	80.8	41.6	92.4	55.4	115
65°	2.5	6.4	5.1	12.7	7.6	19.1	10.2	25.5	12.7	31.9	15.3	38.2	19.2	51.0	22.9	63.7	30.5	76.5	38.2	89.2	45.8	102	61.2	127
70°	2.8	7.0	5.6	14.0	8.4	21.0	11.2	28.0	14.0	35.0	16.8	42.0	21.0	56.0	25.2	70.0	33.6	84.0	42.0	98.0	50.4	112	67.2	140
75°	3.1	7.7	6.1	15.4	9.2	23.0	12.3	30.7	15.3	38.4	18.4	46.0	23.0	61.4	27.6	76.7	36.8	92.1	46.0	107	55.2	123	73.6	153
80°	3.4	8.4	6.7	16.8	10.1	25.2	13.4	33.6	16.8	42.0	20.2	50.4	25.2	67.1	30.3	83.9	40.3	101	50.4	118	60.4	134	80.6	168
85°	3.7	9.2	7.3	18.3	11.0	27.5	14.7	36.7	18.3	45.8	22.0	55.0	27.5	73.3	33.0	91.6	44.0	110	55.0	128	66.0	147	88.0	183
90°	4.0	10.0	8.0	20.0	12.0	30.0	16.0	40.0	20.0	50.0	24.0	60.0	30.0	80.0	36.0	100	48.0	120	60.0	140	72.0	160	96.0	200
95°	4.4	10.9	8.7	21.8	13.1	32.7	17.5	43.7	21.8	54.6	26.2	65.5	32.8	87.3	39.3	109	52.4	131	65.5	153	78.6	175	105	218
100°	4.8	11.9	9.5	23.8	14.3	35.8	19.1	47.7	23.8	59.6	28.6	71.5	35.8	95.3	43.0	119	57.2	143	71.6	167	85.9	191	114	238
110°	5.7	14.3	11.4	28.6	17.1	42.9	22.8	57.1	28.5	71.4	34.3	85.7	42.8	114	51.4	143	68.5	171	85.6	200	103	229	-	286
120°	6.9	17.3	13.9	34.6	20.8	52.0	27.7	69.3	34.6	86.6	41.6	104	52.0	139	62.4	173	83.2	208	104	243	-	-	-	-
130°	8.6	21.5	17.2	42.9	25.7	64.3	34.3	85.8	42.9	107	51.5	129	64.4	172	77.3	215	103	257	-	-	-	-	-	-
140°	10.9	27.5	21.9	55.0	32.9	82.4	43.8	110	54.8	137	65.7	165	82.2	220	98.6	275	-	-	-	-	-	-	-	-
150°	14.9	37.3	29.8	74.6	44.7	112	59.6	149	74.5	187	89.5	224	112	299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160°	22.7	56.7	45.4	113	68.0	170	90.6	227	113	284	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
170°	45.8	114	91.6	229	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Figura 12. Tabla de selección de boquillas**  
(hidraulica)

### SELECCIÓN DE BOQUILLAS PARA LAVADOR VENTURI

En el caso del Lavador Venturi, las boquilla estarán ubicadas a los lados de la garganta, por lo tanto la distancia al objetivo será la distancia a la pared contraria, es decir el ancho de garganta; esta distancia es de 21cm. El alcance teórico será el alto de garganta, esto es 15.5cm.

Basados en la tabla de la figura 12, podemos obtener el ángulo de aspersion, entonces para una distancia al objetivo de 25cm, ya que no hay de 21cm y 20cm no alcanza a cubrir toda la garganta, y un alcance teórico de 15.8cm, el ángulo de aspersion debería ser 35°; sin embargo esto no alcanza a cubrir toda el área seccional de la garganta, por lo que se aumentó el ángulo hasta que cubriera toda el área, esto resulto en un ángulo de 50° y tendrá un alcance teórico de 23.3cm.



**Figura 13. Sección de la garganta cubierta por las boquillas seleccionadas**

En la figura 13, se puede apreciar el área seccional de la garganta (en líneas verdes) y el perfil del flujo de agua (en líneas azules). Se puede apreciar como toda la sección está cubierta de agua. Se utilizarán 4 boquillas para cubrir toda el área.

Las boquillas seleccionadas según el catálogo son las H3/8U-SS50120 con una capacidad de 12 gpm cada una, de manera que con cuatro de ellas se satisface el flujo mínimo necesario de 47 gpm.

### **SELECCIÓN DE BOQUILLAS PARA TORRE CICLÓNICA DE ASPERSIÓN.**

Para este sistema las boquillas estarán ubicadas en el centro del ciclón, su distancia al objetivo será el radio del ciclón que es 41cm y su alcance teórico es de 15.5cm, que es la altura de la entrada. En teoría el ángulo

de aspersión debería ser de  $35^\circ$ , sin embargo esto no cubre toda el área, por lo que se aumentó el ángulo hasta llegar a  $50^\circ$ . El caudal mínimo necesario es de 0.012 gpm, y no existen boquillas de esta capacidad para un ángulo de aspersión de  $50^\circ$  por lo que se tomó del siguiente ángulo para el cual si hay disponibles, esto es  $65^\circ$ . Para  $65^\circ$  hay un caudal de 0.7 gpm más que suficiente para el caso.

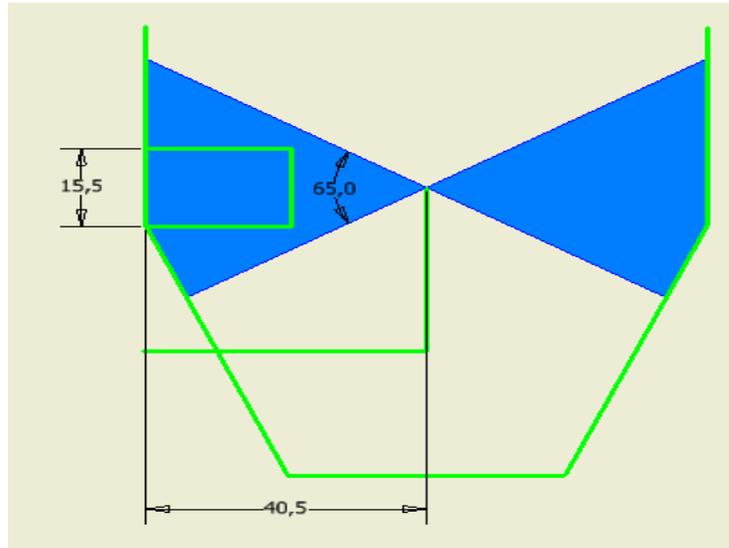


Figura 14. Sección del ciclón cubierto por las boquillas seleccionadas

Se puede decir que, con que la carga pase una vez a través del flujo debería bastar, sin embargo se harán dos pasadas para asegurar la eficiencia del proceso; por esta razón se usarán dos boquillas.

En la figura 14, se puede apreciar el área que cubrirá la aspersión. Las boquillas a utilizarse serán las H1/4DT-SS6501

## 2.5. Selección de Bombas

### Para Lavador Venturi

Para evitar cavitación se debe escoger una velocidad para el fluido entre 1 y 3 m/s; nosotros escogeremos 2 m/s, esta será nuestra *velocidad teórica*.

Para obtener el *diámetro teórico* de tubería utilizaremos la fórmula:

$$Q = A * V = \pi \frac{D^2}{4} * V \quad \text{(Ecuación 12)}$$

$$D_{teórico}^2 = \frac{4Q}{\pi V_{teórica}} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

Donde  $Q = 48GPM = 10.8 \text{ m}^3/h = 3 * 10^{-3} \text{ m}^3/s$ ; entonces:

$$D_{teórico}^2 = \frac{4(3 * 10^{-3})}{\pi(2)} = 1.9 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_{teórico} = 0.0437 \text{ m} = 43.7 \text{ mm} = 1.72 \text{ pulg}$$

Basados en este diámetro, se busca una tubería en diferentes catálogos y se encuentra que hay tuberías de 1.9 pulg con un espesor de pared de 0.145 pulg, por lo tanto el *diámetro real* será:

$$D_{real} = 1.9 - 2 * 0.145 = 1.61 \text{ pulg} = 0.0408 \text{ m}$$

De esto se obtiene la velocidad real del fluido:

$$V_{real} = \frac{4Q}{\pi D_{real}^2} = \frac{4(3 * 10^{-3})}{\pi(0.0408)^2} = 2.3 \text{ m/s}$$

Para el cálculo de la potencia de la bomba, se usará la ecuación:

$$Pot = \frac{Tdh[ft]*Q[GPM]}{3960*n} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Donde n es la eficiencia de la bomba, para ser conservadores se usará una eficiencia de 50% y donde Tdh estará en pies y Q en GPM. Para Tdh se utilizará la fórmula:

$$Tdh = P + H_{f_{total}} + h_d - h_T \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Donde todos los términos deben estar en pies. Para calcular las pérdidas totales por fricción se usará la ecuación de Hazel-William:

$$H_f = \left( \frac{10.679}{C^{1.852}} \right) \times \left( \frac{L}{D^{4.87}} \right) \times Q^{1.852} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

$H_f$  = Pérdida de carga (m).

$L$  = Longitud equivalente de tubería (m).

$D$  = Diámetro interno (m).

$Q$  = Caudal ( $m^3/s$ ).

$C$  = Coeficiente según material. Para acero usar 150.

En la longitud equivalente están incluidos las pérdidas por accesorios, que son 3 tees y 4 codos, todo esto suman 3.67 m.

$$H_f = \left( \frac{10.679}{(150)^{1.852}} \right) \times \left( \frac{3.67}{(0.0408)^{4.87}} \right) \times (3 * 10^{-3})^{1.852}$$

$$H_f = 0.4535 \text{ m} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 1.49 \text{ ft}$$

$P$  es la presión de salida:

$$P = 40 \text{ psi} * \frac{2.31 \text{ ft}}{\text{psi}} = 92.4 \text{ ft}$$

$h_d$  es la altura a la que están ubicadas las boquillas:

$$h_d = 1.5 \text{ m} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 4.92 \text{ ft}$$

$h_t$  es la altura máxima del reservorio:

$$h_t = 1 \text{ m} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 3.28 \text{ ft}$$

$$Tdh = 92.4 + 1.49 + 4.92 - 3.28 = 95.53 \text{ ft}$$

$$Pot = \frac{95.53 * 48}{3960 * 0.5} = 2.32 \text{ HP}$$

Sin embargo no hay bombas de 2.33 HP, pero sí de 3 HP. La escogeremos del catálogo de bombas multi-etapas Goulds.

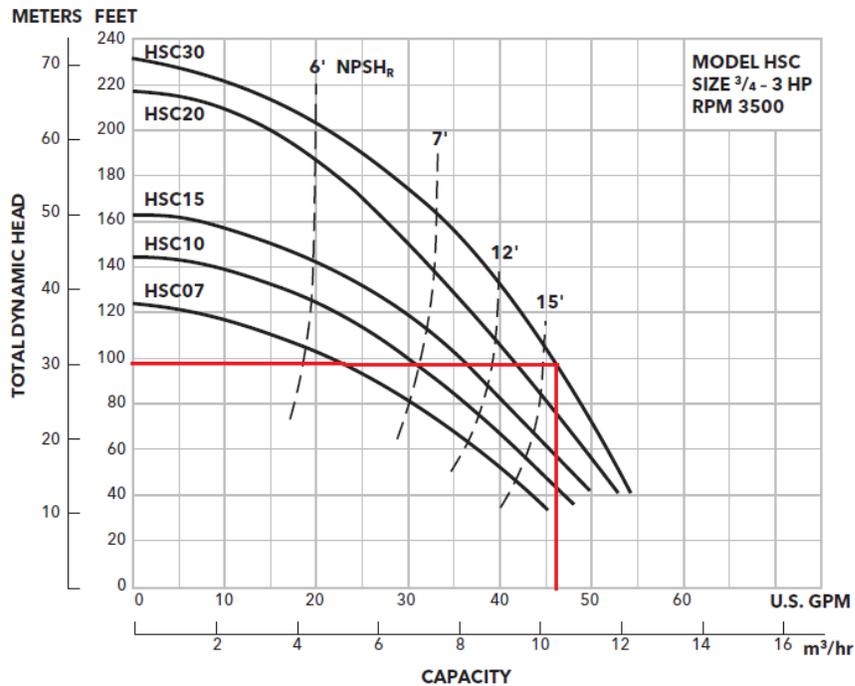


Figura 15. Curva de selección de bomba para lavador Venturi  
(Technology, 2012)

Se usan el cabezal Tdh y el caudal Q para seleccionar la bomba, la cual será HSC30.

### Para Torre de Aspersión Ciclónica.

De la misma forma, para evitar cavitación se debe escoger una velocidad para el fluido entre 1 y 3 m/s y se volverá a escoger 2 m/s como *velocidad teórica*.

Para obtener el *diámetro teórico* de tubería utilizaremos la fórmula:

$$Q = A * V = \pi \frac{D^2}{4} * V$$

$$D_{teórico}^2 = \frac{4Q}{\pi V_{teórica}}$$

En este caso, tan solo se necesita un caudal de 1.7 GPM.

Donde  $Q = 1.7 \text{ GPM} = 0.39 \text{ m}^3/\text{h} = 0.11 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ; entonces:

$$D_{teórico}^2 = \frac{4(0.11 * 10^{-3})}{\pi(2)} = 0.07 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_{teórico} = 0.0084 \text{ m} = 8.4 \text{ mm} = 0.33 \text{ pulg}$$

Basados en este diámetro, se busca una tubería en los catálogos y se encuentran tuberías de 0.5 pulg con un espesor de pared de 0.06 pulg, por lo tanto el *diámetro real* será:

$$D_{real} = 0.5 - 2 * 0.06 = 0.38 \text{ pulg} = 9.65 * 10^{-3} \text{ m}$$

Para el cálculo de la potencia de la bomba, se usará nuevamente la ecuación:

$$Pot = \frac{Tdh[ft] * Q[GPM]}{3960 * n}$$

Donde n es la eficiencia de la bomba, para ser conservadores se usará una eficiencia de 50% y donde Tdh estará en pies y Q en GPM. Para Tdh se utilizará la fórmula:

$$Tdh = P + H_{f_{total}} + h_d - h_r$$

Donde todos los términos deben estar en pies. Para calcular las pérdidas totales por fricción se usará la ecuación de Hazen-William:

$$Hf = \left( \frac{10.679}{C^{1.852}} \right) \times \left( \frac{L}{D^{4.87}} \right) \times Q^{1.852}$$

Hf = Pérdida de carga (m)

L = Longitud equivalente de tubería (m)

D = Diámetro interno (m)

Q = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

C = Coeficiente según material. Para plástico usar 150.

En la longitud equivalente están incluidos las pérdidas por accesorios, que son 1 tee y 3 codos, todo esto suman 4.43 m.

$$Hf = \left( \frac{10.679}{(150)^{1.852}} \right) \times \left( \frac{4.43}{(0.0408)^{4.87}} \right) \times (0.11 * 10^{-3})^{1.852}$$

$$Hf = 1.2 * 10^{-3} m * \frac{3.28 ft}{1 m} = 3.94 * 10^{-3} ft$$

P es la presión de salida:

$$P = 20 psi * \frac{2.31 ft}{psi} = 46.2 ft$$

$h_d$  es la altura a la que están ubicadas las boquillas:

$$h_d = 1.5 \text{ m} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 4.92 \text{ ft}$$

$h_t$  es la altura máxima del reservorio:

$$h_t = 1 \text{ m} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 3.28 \text{ ft}$$

$$Tdh = 46.2 + 3.94 * 10^{-3} + 4.92 - 3.28 = 47.85 \text{ ft}$$

$$Pot = \frac{47.85 * 1.7}{3960 * 0.5} = 0.04 \text{ HP}$$

No hay bombas de 0.04 HP, por lo que se usará una de 1 HP. La escogeremos del catálogo de bombas multi-etapas Goulds.

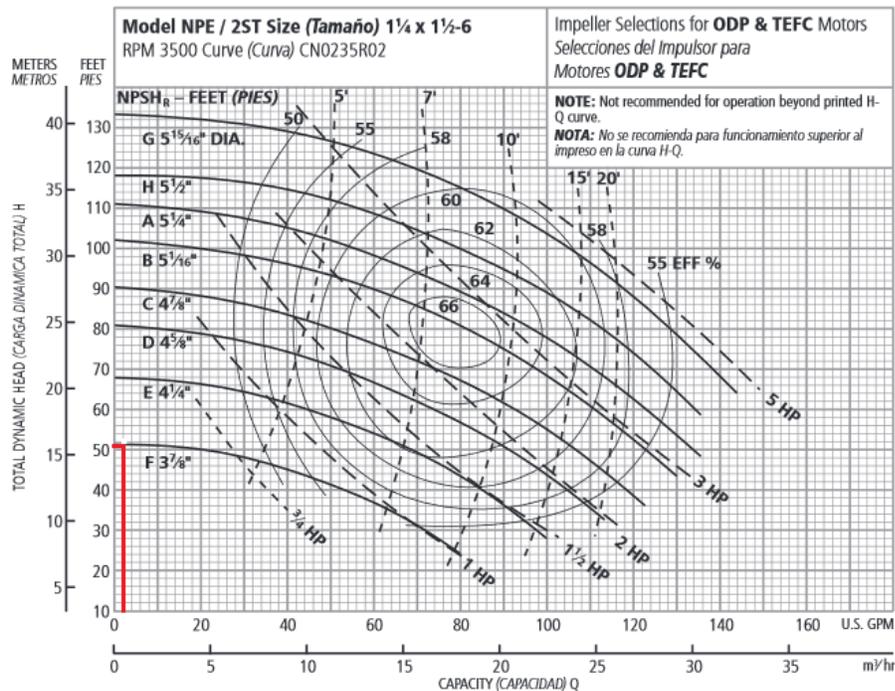


Figura 16. Curva de selección de bomba para Torre de aspersión ciclónica (NPE, 2012)

Se usan el cabezal Tdh y el caudal Q para seleccionar la bomba, la cual será modelo NPE, código 2ST2E1E4

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

Luego de seguir la metodología de diseño mencionada en detalle en el capítulo anterior cuya finalidad consistía en seleccionar los equipos para la depuración de gases así como las respectivas especificaciones de los equipos involucrados, se determinó que la configuración más apropiada para dicho propósito consistirá en un lavador de alta energía o lavador Venturi para la remoción de material particulado, junto con un lavador de baja energía o una torre de aspersion ciclónica que se encargara de los gases ácidos presentes en los contaminantes.

Se determinó la cantidad de líquido necesario para el proceso de lavado, conociendo el caudal de gas a la entrada del Venturi igual a  $1571.15 \frac{ft^3}{min}$ , dato correspondiente a las condiciones de salida del incinerador luego de ser previamente enfriado por los blowers a una temperatura de  $600^{\circ}C$  y una relación liquido-gas de  $30 \frac{gal}{1000ft^3}$  o  $4 \frac{lt}{m^3}$  dando como resultado un caudal de líquido igual a  $6.2845 \frac{ft^3}{min}$  o 47 Gpm, se destacó el hecho de que la velocidad de entrada al lavador húmedo es de 8 m/s valor con el cual se determinó la velocidad de garganta de 31.46 m/s, junto con otras propiedades físicas del líquido y el gas a condiciones de temperatura pertinentes, se definieron las distintas variables previo al cálculo de la eficiencia global y la caída de presión del equipo, tales como el diámetro de gota igual  $376.1795 \mu m$  y los parámetros de impacto por cada rango de tamaño de partícula y las masas correspondientes a los mismos, junto con la penetración se obtuvo una eficiencia global de 93.32% con una caída de presión de  $10 in H_2O$  con este porcentaje se estimó la salida del contaminante que corresponde a un valor de 10 mg/dscm valor que

comparado con los límites permisibles de contaminantes se encuentra por debajo del mismo.

Debido a que se presentaron restricciones de diseño relacionado a las dimensiones, economía y propósitos del equipo se tomaron mediciones de longitudes básicas que fueron conservadas tales como el ancho de la garganta de 21 cm, la altura a la entrada de 32 cm y la altura de salida del Venturi de 15.5 cm, a partir del ancho de la garganta se determinó las longitudes divergente y de garganta de 84 cm y 63 cm, todo esto debido a que el Venturi es de sección rectangular (CONESUP).

Para la torre de aspersion ciclónica de manera similar al Venturi se conservó el diámetro de ciclón existente de 81 cm de manera que la única modificación sean las alturas que se definieron en este estudio tales como; la longitud de la zona cilíndrica y la longitud de la zona cónica ambas de 162 cm, el diámetro de salida de desechos igual a 20.25 cm y el diámetro de salida de aire limpio de 40.5 cm, también se determinó la caída de presión de este equipo igual a  $8.63 \text{ in } H_2O$ , siendo todos estos parámetros hallados mediante formula propuestas estudios previos (Huelva, s.f.). Adicionalmente se determinó mediante estimaciones el porcentaje de dióxido de azufre removido por el sistema igual a 64.8 % valor que fue alentador al compararlo con el valor teórico de 30%, evidenciando que la selección propuesta para remoción de gases ácidos es apropiada.

Ambos equipo utilizaran boquillas de aspersion para el caso del Venturi utilizara 4 boquillas H3/8U-SS50120 y la torre de aspersion ciclónica usara dos boquillas H1/4DT-SS6501 (hidraulica).

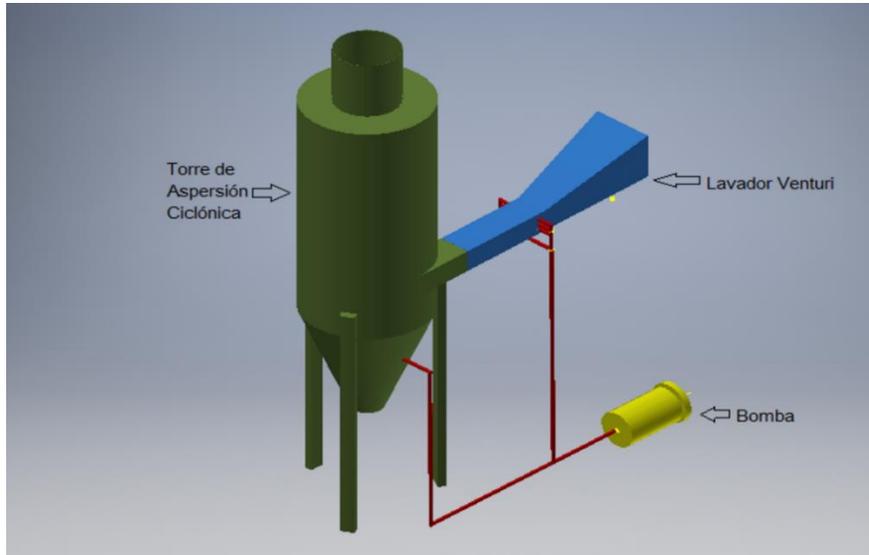


Figura 17. Diagrama de forma del Sistema de depuración de gases de combustión seleccionado

### Análisis de costos

Para los equipos de depuración de gases se requerirán de ciertos accesorios y materiales para garantizar el correcto transporte de los fluidos involucrados, que para este caso corresponden a aquellos que servirán para optimizar la estructura existente, los cuales se mostraran a continuación junto a sus precios de venta al público:

### Lavador Venturi

MATERIAL	COSTO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO PARCIAL (\$)
Plancha AISI 304; 1,22 X2,44 m; e=1mm	114,05 \$/plancha	1 plancha	\$ 114,05
Tubo PVC de 1/2"	1,35 \$/m	2,55 m	\$ 3,45
Codos	4,63 \$/codo	4 codos	\$ 18,52
Tees	0,55 \$/tee	3 tees	\$ 1,65
		Total	\$ 137,67

### Torre de aspersión ciclónica

MATERIAL	COSTO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO PARCIAL
Plancha AISI 304; 1,22X2,44 m; e=2mm	330,35 \$/plancha	2 plancha	\$ 660,70
Tubo PVC de 1/2"	1,35 \$/m	2,79 m	\$ 5,12
Codos	4,63 \$/codo	2 codos	\$ 9,26
Tees	0,55 \$/tee	1 tee	\$ 0,55
		Total	\$ 675,63

### Bombas:

- Goulds HSC30 \$940.00
- Goulds NPE 2ST2E1E4F \$400

**Costo Total= \$2154**

# CAPÍTULO 4

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Es importante destacar que este proyecto podrá servir de guía para otras actividades relacionadas al sistema de depuración actual , dando un punto de inicio a futuros estudios que podrían culminar en la puesta en marcha del sistema de depuración propuesto en este estudio o inclusive más eficientes y con aplicaciones tecnológicas más sofisticadas con la finalidad de permitir a los estudiantes conocer más sobre el proceso de incineración de desechos, así como la depuración de los gases contaminantes debido a la combustión, para los equipos involucrados inclusive se puede formular un banco de prueba con el propósito de que se realicen más practicas relacionadas a este tema.

Uno de los objetivos de este proyecto era ajustarse a las restricciones de diseño, la primera de ellas el espacio físico definido, el propósito de los equipos es decir que tengan finalidad didáctica lo que implica que el factor económico es un criterio importante de selección y a su vez los materiales debido a las modificaciones propuestas para mejorar la eficiencia del sistema de depuración.

Fue de vital importancia y quizás uno de los pilares fundamentales de este estudio la elaboración de la matriz de decisión para las diferentes alternativas de diseño, junto con la estructura del proceso de diseño empleado, ya que en conjunto permitieron escoger la configuración de equipos apropiada siendo la del Venturi con la torre de aspersion ciclónica útiles para remoción de material particulado y gases ácidos presentes en los contaminantes.

Los resultados obtenidos son puramente teóricos; en el caso del Venturi se usó información de estudios previos, mientras que la torre de aspersion, a falta de información más concreta, se lo modeló como lavador húmedo y recolector inercial.

La eficiencia global se puede mejorar reemplazando la torre de aspersion por una torre de empaquetamiento y reemplazando el agua por una sustancia alcalina para una mejor disolucion de los gases ácidos. Otra forma es utilizando un precipitador electrostático, que tiene una eficiencia del 99.99%.

#### **4.1. Conclusiones:**

- La eficiencia en el Venturi supera las expectativas debido a que se consideraron en el diseño, rangos del tamaño de partícula mayor a los 10 $\mu$ m.
- El costo de diseño del proyecto experimental fue bajo, seleccionando materiales locales y trabajando como fluido de limpieza, agua.
- Aplicando las normativas EPA (AP 42), se logra un diseño que cumple con las normativas aplicadas en el Ecuador.
- Se confirma mediante cálculos, que una configuración de un lavador de alta energía junto con uno de baja energía, es efectivo para la remoción de material particulado y gases ácidos.
- La concentración estimada para desechos es de 150 mg/dscf y con límite permisible 69 mg/dscf según la norma EPA, se obtuvo con la configuración seleccionada 10 mg/dscf debajo del límite.

## **4.2. Recomendaciones**

Es necesario realizar un estudio relacionado a la disposición de desechos de estos sistemas, como tratar los lodos originados y analizar el impacto de ellos al ambiente.

Para la implementación de estos equipos con fines académicos es necesario establecer un procedimiento de uso de los mismos y su banco de prueba, de manera que las lecturas entregadas sean las correctas, la instrumentación involucrada en las mediciones deben cubrir en la medida de lo posible todos los parámetros necesarios en la entrega de resultados, sean estos datos de temperatura, velocidades de entrada a los equipos, sus velocidades de salida, concentraciones de emisión, entre otros.

Los resultados obtenidos pueden ser usados como base de datos para estudios posteriores relacionados a la disposición de desechos hospitalarios y las tecnologías aplicadas a la depuración de los gases producto de la combustión de los mismos, siendo este un tema de interés en la actualidad no solo por su impacto industrial sino también ambiental.

## Bibliografía

1. Ally, C. D.-F. (2011). Air Pollution Control: a design approach. Estados Unidos.
2. CONESUP, P. C. (s.f.). Informe de Actividades. Ecuador.
3. Delgado, I. E. (s.f.). Dimensionamiento de un Horno para la Eliminación de Desechos Hospitalarios en Zonas Rurales con Minimización de Contaminantes en la.
4. Echeverri, C. A. (23 de febrero de 2006). mailxmail. Obtenido de mailxmail.com: <http://www.mailxmail.com/curso-ciclones/estimativa-caidapresion>
5. FIG. (2005). AP-42, Vol. 1, CH2.3:Medical Waste Incineration. Estados Unidos.
6. Elías, X. (s.f.). Emisiones a la Atmósfera y Correcciones. Tipos de Hornos.
7. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), A. -4. (1997). Chapter 2 : Solid Waste Disposal, Section 2.3: Medical Waste Incineration. Estados Unidos.
8. EPA. (s.f.). Air Pollution Control Cost Manual (sixth ed.).
9. H.E., H. . (1979). Air Pollution Control. Estados Unidos: Ann Arbor Science Publishers.
10. Hidraulica, S. S. (s.f.). spray. Obtenido de spraying system Co: <http://www.spray.com/cat75/hydraulic/files/71.html>
11. Huelva, U. d. (s.f.). Uhu. Obtenido de uhu.es: <http://uhu.es/sevirtual/ocw/politecnico/tecnicas-tratamiento-contaminacion/material/010.pdf>
12. Inche, J. L. (2004). Gestion de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones. Lima.
13. Nerea Martin Estevez-Monica Melon Vega-Pili Sanchez Alviz. (16 de mayo de 2000). Depuracion de Emisiones Atmosfericas Industriales. Obtenido de <http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-13a.pdf>
14. NPE, G. P. (2012). Goulds Stainless Pumps Curves Sizing. Estados Unidos: Gou121.
15. Technology, G. W. (2012). HSC Multi Stage Centrifugal Pump Tech Brochure. Estados Unidos: HSC12.
16. Theodore, L. (2008). Air pollution control equipment calculation. Canada: John Wiley and sons, inc publication.

17. Vera, J. P. (2005). Diseño de un Sistema de Remoción de Contaminantes del Aire Generados desde un Incinerador de Desechos Hospitalarios. Guayaquil-Ecuador.
18. W.T., W. K.-W.-D. (1998). Air Pollution its origin and control. Estados Unidos: Addison Wesley longman Inc.