



## Cálculo, Diseño y Verificación del Sistema de Manejo de Gases de Salida de un incinerador experimental de residuos y desechos hospitalarios

José Hidalgo Crespo<sup>(1)</sup>, Alfredo Barriga Rivera<sup>(2)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)<sup>(1)(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, [johidalg@espol.edu.ec](mailto:johidalg@espol.edu.ec)

<sup>(2)</sup> Ing. Mecánico, Profesor FIMCP-ESPOL, [abarriga@espol.edu.ec](mailto:abarriga@espol.edu.ec)  
Guayaquil – Ecuador<sup>(1)(2)</sup>

### Resumen

*En esta tesis se presenta el diseño y cálculo de un sistema para el tratamiento de los gases de salida de un incinerador de residuos y desechos hospitalarios que permite eliminar a la atmósfera gases limpios y a baja temperatura.*

*El sistema consta de 4 etapas: Combustión, Enfriamiento, Depuración y Salida. Los componentes del sistema que han sido diseñados son: Incinerador, Post-Combustor, Mezclador, Intercambiador de Calor de Flujo Cruzado, Cámaras de Rociado, Lavador Venturi, Ciclón, Torre de Absorción, Chimenea.*

*El diseño propone un procedimiento a seguir en este tipo de incineración, además de los cálculos principales que se deben realizar en cada etapa del sistema.*

**Palabras Claves:** *Combustión, desechos hospitalarios, incineración.*

### Abstract

*This thesis presents the design and calculation of a system for treatment of exhaust gases from a hospital waste incinerator exhausting into the atmosphere clean and low temperature gases.*

*The system consists of four stages: Combustion, Cooling, Purification and Output. The system's components that are designed are: Incinerator, Post-Combustor, Mixer, Heat Exchanger, Chamber Scrubber, Venturi Scrubber, cyclone, Absorption Tower, Fireplace.*

*The design proposes a procedure to follow at this kind of incineration as well as the respective calculations to be performed in each phase of the system.*

**Keywords:** *Combustion, hospital waste, incineration.*

### 1. Introducción

La utilización de incineradores como tratamiento de residuos produce una serie de emisiones gaseosas y de partículas, residuos sólidos (cenizas) y efluentes líquidos nada beneficiosos para el medio ambiente.

Se van a tener distintos tipos de plantas incineradoras según el tipo de residuo que se vaya a tratar en ellas ya sean residuos sólidos urbanos, hospitalarios o industriales. Pero el esquema inicial es el mismo en todos los casos, lo que varían, son los tratamientos posteriores de los efluentes gaseosos, los líquidos y las cenizas para eliminar los contaminantes tales como: Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), Dióxido de Azufre ( ), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono ( ), Partículas, Metales, Gases Ácidos, Dioxinas y Furanos, etc. (que varían en cada caso). El esquema básico es el siguiente:

1. Depósito donde se introducen los residuos que se van a tratar.
2. De aquí pasan al horno de combustión donde se introduce la cantidad necesaria de aire.
3. Las cenizas y escorias caen por debajo en un depósito.
4. Los gases van a una cámara de post-combustión de donde salen hacia unos equipos de control de contaminación de aire encargados de disminuir bruscamente la temperatura y lavar los gases.
5. De aquí salen los gases limpios y a baja temperatura hacia la atmósfera por la chimenea y las cenizas sólidas que se han formado, son arrastradas por agua hacia otro depósito para su posterior tratamiento.

### 2. Aspectos generales

#### 2.1 Incineración

Es una combustión controlada, con emisión de calor, en el cual los residuos patogénicos son convertidos en gases residuales y sólidos no combustibles con el objetivo de reducir su volumen y peso, pudiéndose aprovechar la energía generada para obtener vapor, agua caliente y/o electricidad.

Se debe tener en cuenta que, a la combustión, que es de por sí un proceso complejo, se le debe sumar el hecho de que en la incineración aplicada a residuos, este es precisamente el combustible, y que se trata de una mezcla heterogénea de sustancias con composiciones químicas diversas.



Figura 1 – Incinerador de dos cámaras

El conocimiento de la composición, cantidad y propiedades físico-químicas de los desechos a incinerar es una parte fundamental y necesaria para el correcto diseño del proceso. A partir de la caracterización es posible calcular la estequiometría de la combustión, la selección de la tecnología, tipo y capacidad del quemador, e incluso prever el sistema de depuración de gases.

En un estudio realizado en Ecuador bajo el nombre de “Proyecto de Asesoría Técnica en Incineradores de Desechos Hospitalarios”, auspiciado por la red Panamericana de manejo de residuos y el Ministerio de Salud Pública en 1998 se pudieron obtener los siguientes datos que se muestran a continuación

Tabla 1 – Caracterización de los desechos hospitalarios

Componente	Peso (%)	Contenido de humedad típica (%)
Papel	23.00	6.00
Plásticos	35.30	2.00
Textiles	13.00	10.00
Metal	2.00	3.00
Madera	0.30	20.00
Vidrio	11.00	2.00
Fluidos	9.00	41.00
Inertes	0.40	8.00
Orgánicos	6.00	78.29
<b>Total</b>	<b>100.00</b>	

Datos de la composición química de los elementos presentes en los residuos hospitalarios se obtienen del [www.ecn.phyllies.com](http://www.ecn.phyllies.com).

En la incineración existen un número de cálculos básicos de ingeniería que pueden ser realizados fácilmente, basados en el balance de masas y termodinámica. Estos cálculos se centran en la conversión total del combustible que ocurre y en el rendimiento térmico. Dado que el incinerador y post-combustor se encuentran uno después del otro, se encuentra el flujo másico de combustible necesario para producir una buena combustión trabajando con los rangos de temperaturas previamente establecidos.

Los parámetros importantes son, por ejemplo:

- Análisis del combustible
- Análisis de la carga
- Pérdidas de calor en las paredes
- Ecuación termodinámica
- Flujo másico de los gases de salida
- Condiciones de entrada
- Condiciones de salida

El flujo másico de combustible es calculado en las siguientes condiciones:

- No se está quemando carga alguna
- Se quema carga y el aire no es precalentado
- Se quema carga y el aire está precalentado a 423 K

**Tabla 2 – Datos de diseño del quemador**

	—	—	—
<b>1</b>	0.000729982	2.627933730	0.710345783
<b>2</b>	0.009924600	35.72873700	9.657685696
<b>3</b>	0.007957223	28.64600219	7.743181124

Así como varía el flujo másico de combustible también varía el flujo másico de aire y humos.

**Tabla 3 – Flujo de los gases de combustión**

	—	—
<b>1</b>	0.014361785	51.702426
<b>2</b>	0.484705600	1744.94030
<b>3</b>	0.445998152	1605.593348

## 2.2 Post-Combustión

Tiene por objetivo garantizar la completa oxidación de los productos gaseosos que provienen de la primera cámara, por esto está considerada como el primer tratamiento de los gases.

Los parámetros de funcionamiento (las 3T) deben ser:

- Turbulencia elevada velocidad de ingreso 10 m / s
- Tiempo de residencia mayor a 2 segundos
- Temperaturas 850° - 1200° C
- Oxígeno en exceso 3 % v / v ( 6 % v / v)

**La turbulencia** garantiza el correcto mezclado de los gases de combustión que provienen de la primera cámara con el aire comburente, presente en exceso respecto del valor estequiométrico (el necesario para la completa combustión teórica). Este valor se encuentra garantizado, ya que la velocidad media de los gases en la sección de ingreso a la segunda cámara debe ser superior a 10 m/s.

**El tiempo** de residencia (que es el tiempo que permanecen los humos en la segunda cámara) debe ser mayor a 2 segundos (valor fijado por las leyes), medidos a la temperatura de trabajo de esta cámara y a la máxima potencialidad del sistema, en las peores condiciones del sistema.

**La temperatura** debe ser superior a 850 °C (si el contenido de sustancias orgánicas halogenadas expresadas en Cloro no supera el 1 %, y debe ser superior a 1100 °C, si el contenido supera el 1%).

**La cantidad de oxígeno** en exceso a la salida de la cámara secundaria y que debe ser superior a 3 % o 6 % v/v medido como exceso de Oxígeno, según USA o la CEE.

### La composición de los humos

La reacción de combustión balanceada y expresada en función de la fracción molar, ha sido tomada de un texto que trata el tema de incineración de desechos sólidos. Dicha ecuación ha sido desarrollada en base a la composición de la carga y combustible:



# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

## CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



considerado como mediano si su capacidad de carga es mayor que 200 libras por hora; éste último corresponde a nuestro caso.

Los valores que se presentan como límites de emisión están en base seca y corregidos al 7% de O<sub>2</sub>; además se establece que las condiciones estándar a las que se hace referencia en ese documento han sido tomadas como 20 y 101.3 kilopascales.

### Estimación de Emisiones

La EPA en su documento actualizado Compilation of Air Pollutant Emission Factors que se conoce como AP-42 presenta los factores de emisión para fuentes puntuales, estacionarias y de área.

Además el documento AP-42, sección 2.3 contiene tablas en las que constan los factores de emisión para varias sustancias contaminantes.

Para hallar el número de moles en los gases de descarga, se utilizan los datos obtenidos previamente en el balance de masa, de donde se obtiene lo siguiente:

**Tabla 4 – Moles de la descarga gaseosa**

Gases de Descarga	Moles/h
	6272,9741
	6240,0092
<b>HCl</b>	0,0494
	1,3224
<b>NO</b>	16,6292
	53369,9254
	5734,5430
<b>Total</b>	<b>71635,4526</b>

Los estándares de emisión respecto a los cuales se va a comparar la concentración de las sustancias contaminantes, han sido desarrollados tomando como condiciones estándar 20 de temperatura 101.3 kPa de presión atmosférica. De manera que el volumen en condiciones estándar es calculado como:

**Tabla 5 – Límites de la descarga gaseosa**

SUSTANCIA	Límite permisible NSPS 40 CFR 60 7% O <sub>2</sub> - Base Seca
<b>Material Particulado</b>	69 mg/dscm
<b>Monóxido de Carbono</b>	40 ppmv
<b>Dioxinas/Furanos</b>	125 ng/dscm
<b>Cloruro de Hidrógeno</b>	27 ppmv
<b>Dióxido de Azufre</b>	55 ppmv
<b>Óxidos de Nitrógeno</b>	250 ppmv
<b>Plomo</b>	1,2 mg/dscm
<b>Cadmio</b>	0,16 mg/dscm
<b>Mercurio</b>	0,55 mg/dscm

Las emisiones de la descarga gaseosa de este incinerador se muestran a continuación:

**Tabla 6 – Concentraciones de la descarga gaseosa**

SUSTANCIA	En base seca al 7% O <sub>2</sub>	Unidades
Material Particulado	628.0681128	mg/scm
Monóxido de Carbono	87.07906913	ppmv
Dioxinas/Furanos	3185.626471	ng/scm
Cloruro de Hidrógeno	759.3147614	ppmv
Dióxido de azufre	28.05799398	ppmv
Óxidos de Nitrógeno	97.74821634	ppmv
Plomo	2.4936947	mg/scm
Cadmio	0.187712183	mg/scm
Mercurio	3.678884763	mg/scm

La tabla 1 de la subparte Ec presenta los límites permisibles de emisión para incineradores de tamaño pequeño, mediano y grande. En el texto del documento se establece que un incinerador es

Para remover cada una de las sustancias contaminantes para que la concentración de las mismas se reduzca hasta su límite permisible se



introduce el concepto de Eficiencia de Remoción (ER):

\_\_\_\_\_

La eficiencia de remoción requerida para limpiar los gases de la carga es:

**Tabla 7 – Eficiencias de Remoción**

Sustancia	Eficiencia de Remoción Requerida (%)
Material Particulado	89.0139304
Monóxido de Carbono	54.06473634
Dioxinas/Furanos	96.07612502
Cloruro de Hidrógeno	98.02453465
Dióxido de Azufre	Bajo el límite
Óxidos de Nitrógeno	Bajo el límite
Plomo	51.87863213
Cadmio	14.76312456
Mercurio	85.04981712

### 2.3 Mezclador

El propósito del mezclador es disminuir la temperatura de los humos añadiéndole aire frío a 300K, para de esta forma lograr una reducción brusca de la temperatura, la concentración volumétrica de los gases también varía.

El proceso para encontrar el flujo másico de aire necesario es el siguiente:

\_\_\_\_\_

### 2.4 Intercambiado de Calor

El humo proveniente del mezclador va a ser enfriado a través de un intercambiador de calor tipo banco de tubos de flujo cruzado. El humo se desplazará dentro de los tubos, mientras que por la parte externa circulará aire ambiente a 300K. El

procedimiento para el diseño se detalla a continuación:

Las variables a ser calculadas dentro del IC son:

- Temperatura media logarítmica
- Coeficiente de transferencia de calor interno
- Coeficiente de transferencia de calor externo
- Coeficiente Global de transferencia de calor
- Área de transferencia de Calor
- Longitud del tubo
- Pérdidas de presión dentro de las tuberías
- Pérdidas de presión fuera de las tuberías

\_\_\_\_\_

—

—

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### 2.5 Cámaras de Rociado

La forma más conveniente de lograr el enfriamiento de gases calientes por contacto directo con agua, es utilizar una cámara rociadora diseñada para operar según el proceso de saturación adiabática.

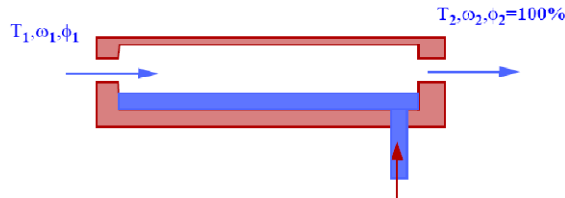
En esta tesis el enfriamiento se realiza en dos cámaras de rociado: Una horizontal con una pequeña inclinación seguida de una vertical. El objetivo de los cálculos es encontrar el largo necesario de la cámara horizontal de rociado y el alto requerido en la cámara vertical de rociado.

El proceso de enfriamiento y humidificación adiabática puede ser interpretado fácilmente en una carta psicrométrica de alta temperatura siguiendo el trayecto de la línea de saturación adiabática que pasa por las condiciones de entrada del gas. En el caso de la presente tesis se asume que el gas puede llevar todo el vapor de agua necesario para alcanzar las



condiciones de temperatura necesarias sin llegar a la saturación.

El agua necesaria para producir el enfriamiento evaporativo se calcula mediante:



**Figura 2 – Saturador Adiabático**

El largo y la altura necesarios de contacto se calculan mediante:

$$\frac{L}{H} = \frac{c_p (T_2 - T_1) + \omega_2 - \omega_1}{\omega_1 - \omega_2}$$

Donde:

- : Calor húmedo promedio
- : Flujo másico del gas por unidad de área
- : Flujo másico del líquido por unidad de área
- : Flujo másico del gas seco por unidad de área
- : Temperatura de saturación adiabática
- : Calor específico del gas
- : Calor específico del vapor
- : Temperatura de entrada a la cámara de rocío
- : Temperatura de salida de la cámara de rocío

**2.6 Lavador Venturi**

Los mecanismos de colección que intervienen en un lavador de partículas, cualquiera sea su tipo, son: Impacto inercial, Intercepción y Difusión. De éstos, el principal mecanismo de remoción es el impacto inercial, el cual se lleva a cabo cuando las partículas tienen la inercia suficiente para abandonar la trayectoria de flujo del gas que las transporta, de manera que mientras el gas se desvía alrededor de las gotas del líquido, las partículas impactan contra la superficie de las gotas; partículas con diámetro mayor

a 10 µm son colectadas comúnmente por este mecanismo.

Se podría pensar que un mayor diámetro en las gotas del líquido de lavado sería beneficioso para el desempeño de un lavador de gases; sin embargo a mayor tamaño de las gotas, menor es el área superficial disponible para la captación de partículas. Por otro lado, un tamaño muy reducido provocaría que la corriente gaseosa acelere rápidamente las gotas a la velocidad del gas, reduciendo de esta forma la velocidad relativa, e inclusive arrastrando el líquido de lavado fuera de la cámara. Por ello el diámetro adecuado de las gotas del líquido fluctúa entre 500 µm y 1000 µm.

**Determinación de la Eficiencia de Remoción**

Para hallar la eficiencia de colección global del lavador de partículas es necesario hacer el análisis para cada rango de tamaño de partícula:

**Tabla 8 – Distribución del tamaño de las partículas**

Rango (um)	Diámetro de corte (um)	Masa acumulada (%)	Masa (%)
0-0.625	0.625	31.1	31.1
0.625-1	1	35.4	4.3
1-2.5	2.5	43.3	7.9
2.5-5	5	52	8,7
5-10	10	65	13
10-100	100	100	35

Por lo cual la carga de partículas en los gases a la salida del lavador será:

Por lo tanto el lavador Tipo Venturi es más que eficiente en la recolección de partículas.

**2.7 Ciclones**

Es común que en un lavador tipo Venturi las gotas del líquido de lavado sean arrastradas junto con la corriente gaseosa que se quiere limpiar. Esto produce una disminución en la eficiencia de remoción calculada, pues las gotas que viajen junto con el gas



# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



estarán cargadas con el material particulado que se quería remover. Para solucionar este problema usualmente se debe diseñar, junto con el lavador Venturi, una cámara de separación del líquido de lavado

## Cálculo de la eficiencia de colección

- : Factor de configuración
- : Tiempo de relajación, s
- : Caudal del gas,
- : Diámetro del ciclón, m
- : Exponente del vórtice del ciclón

Dado que las partículas se encuentran viajando dentro de las gotas de agua y se había mencionado anteriormente que el diámetro de estas gotas es de , se puede utilizar cualquiera de los diseños de las 3 familias de ciclones, pero para maximizar la recolección se decide por los ciclones de Alta Eficiencia, del que se selecciona un ciclón Stairmand.

Como se había mencionado el rango de velocidades varía en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. Para este caso selecciono una velocidad de entrada de 22 m/s.

## 2.8 Torres de Absorción

Sobre el relleno se deberá verter una solución de hidróxido de sodio (NaOH) en agua. La utilización de ésta solución alcalina hace posible asumir la condición de transferencia de masa limitada por la fase gaseosa para realizar el diseño, además de que se puede conseguir una alta eficiencia de remoción, tanto del SO<sub>2</sub> como del HCl, sin que se produzcan problemas significativos de incrustaciones en el material de relleno, pues la reacción química producirá sales que no van a tender a precipitarse, sino a permanecer en estado acuoso.

Para el diseño, se consideran las siguientes reacciones químicas de los gases con el líquido de absorción.

Se espera eliminar por lo menos un 98 % de HCl, el dióxido de azufre está bajo el límite pero es común

diseñar los equipos para que estos provean una eficiencia superior. Es por esto que se establece una torre de absorción que remueva el 100 % de HCl y un 50 % de .

Se puede asumir que finalmente en la torre de absorción el líquido ha alcanzado la temperatura de saturación que se dijo anteriormente era de . Además el líquido es recirculado por lo que se asume que alcanza el equilibrio térmico y también se encuentra en la misma temperatura del gas.

Entonces la cantidad total de NaOH requerida es:

El hidróxido de sodio reaccionará también con otras sustancias presentes en los gases de descarga, y su combinación con un ácido formará una sal y agua y dado que la cantidad de hidróxido de sodio es ínfima se decide usar \_\_\_\_\_. Esta es la cantidad de hidróxido de sodio que deberá tener disuelta la solución.

El área transversal que debe tener la torre de absorción es:

## Altura de la torre de absorción

Las constantes críticas requeridas para evaluar la difusividad del en la fase gaseosa, se han obtenido del Manual del Ingeniero Químico de Perry, estas son:

Para el : = 123 cm<sup>3</sup>/mol, Tcr1 = 430.75 K

Para el aire: = 92 cm<sup>3</sup>/mol, Tcr2 = 132.45 K

El proceso se llevará a cabo a T = 338 K (65°C) y P = 1 atm, entonces la difusividad del en aire es:



las pérdidas de carga de los humos dentro de los aparatos en los que se generan ( $\Delta P_1$ ), como en la propia chimenea ( $\Delta P_2$ ) y proporcionarles la energía cinética para su salida por la coronación de la chimenea a la velocidad  $V$ .

La pérdida de carga  $\Delta P_2$  en la chimenea puede expresarse como un factor de la energía cinética de los humos y de su altura relativa  $H/D$ :

La diferencia de presión que proporciona la chimenea es más que suficiente para contrarrestar las pérdidas a lo largo del sistema, por lo que se concluye que no es necesario inducir ni forzar el tiro.

## 2.9 Chimenea

Además de la necesidad de enfriar la descarga gaseosa, surge otro problema asociado precisamente a la reducción de temperatura del gas: al enfriar la descarga gaseosa ésta pierde su flotabilidad y por lo tanto no va a fluir correctamente en la chimenea, además de que la temperatura relativamente baja va a brindar las condiciones para que se produzca condensación en su interior. Aún cuando la descarga gaseosa haya sido depurada, van a quedar ciertas cantidades de gases de naturaleza ácida contenidos en el flujo gaseoso; esto, unido al hecho de que los gases salen casi saturados del sistema de remoción, va a constituir un problema de corrosión principalmente en la chimenea si se produjera condensación en el interior de ésta. Por ello va a ser necesario calentar el gas hasta una temperatura superior al punto de rocío de los gases ácidos, el cual es típicamente alrededor de .

Es por esto que para reducir la humedad se aprovecha parte del aire caliente que sale del intercambiador de calor de flujo cruzado que no es necesario para el incinerador y se lo mezcla con los gases de salida antes del ingreso a la chimenea.

### Depresión Mínima

Además de dispersar los humos en la atmósfera, corrientemente las chimeneas tienen por objeto la creación, en su base, de una depresión o aspiración, que permite la circulación de estos humos desde su origen (hogar, horno, caldera, etc.) hasta su salida a la atmósfera libre, a unas velocidades determinadas.

Esto exige la creación, dentro del circuito completo, de un **diferencial de presiones** que compense tanto

## 3. Bibliografía

- [1]BARRIGA RIVERA ALFREDO PH.D, "Seminario de combustión Industrial Aplicada y control de Contaminantes." 34-38, Guayaquil, Ecuador, junio, 2007.
- [2]INCOPERA FRANK, DeWITT DAVID, *Fundamentos de transferencia de calor*, Cuarta Edición, Prentice Hall, 839, México DF, México, 1999.
- [3]GILES RANALD V. Mecánica de los Fluidos e Hidráulica, Editorial Mc. Graw Hill
- [4]ECN. "Phyllis: database on composition of biomass and waste". [www.ecn.nl/phyllis](http://www.ecn.nl/phyllis). September, 2008.
- [5]PANELACONVAPOR "Características de las calderas." [www.panelaconvapor.com/caracteristicas](http://www.panelaconvapor.com/caracteristicas), Febrero, 2009.
- [6]Vera, Juan. Tesis de Grado: "Diseño de un Sistema de Remoción de Contaminantes del Aire Generados desde un Incinerador de Desechos Hospitalarios". ESPOL, 2005
- [7]Toscano, Luis. Tesis de Grado: "Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de biomasa". ESPOL, 2009