

CAPÍTULO 1

1 EMISIONES GENERADAS DESDE UN INCINERADOR DE DESECHOS HOSPITALARIOS

La incineración es una de las técnicas más utilizadas en el manejo de desechos hospitalarios, gracias a que por medio de ésta se obtiene una considerable reducción en volumen, además de la destrucción de materia que puede convertirse en un peligro para la salud de las personas; desgraciadamente una de las desventajas que presenta la incineración de residuos sólidos es la potencial emisión de sustancias contaminantes al ambiente. Tales sustancias deben ser identificadas y cuantificadas, con la finalidad de establecer las medidas más adecuadas que deberían tomarse para el control de su emisión al ambiente.

La manera correcta de determinar las emisiones generadas desde una fuente específica es hacerlo utilizando los Métodos de Medición de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América), ó métodos equivalentes; sin embargo la ejecución del muestreo utilizando tales métodos no es fácil, dado que dicho organismo propone una serie

de métodos para diferentes tipos de medición, así por ejemplo la medición de las emisiones de material particulado deberá hacerse según el Método 5, de dioxinas y furanos según el Método 23, de cloruro de hidrógeno según el Método 26; esto sin mencionar los métodos para medir el contenido de humedad, o la ubicación de la sonda de medición, entre otros. Adicionalmente se debe tomar en cuenta la disponibilidad del equipo de medición y análisis de las muestras, y en algunos casos el costo que la actividad implica.

Ante la necesidad de conocer las sustancias contaminantes que van a ser generadas desde un incinerador de desechos hospitalarios, y la cantidad en que van a ser emitidas al ambiente; y dada la imposibilidad de aplicar métodos de medición al momento de la ejecución de éste trabajo, nos vemos precisados a recurrir a técnicas que permitan estimar, o predecir las emisiones que se pueden esperar en la descarga del incinerador.

El presente capítulo tiene por objetivo describir el proceso de incineración de los residuos hospitalarios y llegar a establecer las características de los gases de descarga del incinerador, de tal manera que se pueda obtener la información necesaria para ejecutar el diseño del sistema de remoción de contaminantes.

1.1 Incineración de desechos hospitalarios

De una manera generalizada, podemos definir a los desechos hospitalarios como aquellos residuos generados en un hospital por la actividad propia de éste, con excepción de cadáveres o partes anatómicas que normalmente deben estar destinadas para el entierro o cremación. Sin embargo, una definición mas acertada [8] parece ser aquella en la cual se califica como desechos médicos e infecciosos a los residuos generados en el diagnóstico, tratamiento, o inmunización de seres humanos o animales, en la investigación relacionada con ello, o en la producción o muestreo de materia biológica; ésta definición no incluye desechos peligrosos, cierto tipo de basura doméstica, ceniza producto de la incineración, cadáveres o partes destinadas a cremación o entierro, ni materia que se desecha por el alcantarillado.

Esta última definición de desechos médicos e infecciosos es muy importante, porque tanto los factores de emisión como los estándares de emisión que se presentan más adelante, están relacionados con tal definición, aunque cabe señalar en esta parte que nosotros nos referiremos a estos residuos como desechos hospitalarios.

El proceso de incineración de desechos hospitalarios involucra la quema de residuos producidos en hospitales; estos desechos incluyen tanto los infecciosos como los residuos de tipo doméstico no

infeccioso, de tal manera que al incinerador van a entrar objetos tales como gasas, vendas, sábanas, sondas, papeles, recipientes de vidrio o plástico, guantes, tejidos humanos, agujas, bisturís, sólo por mencionar unos cuantos; éstos a su vez podrían estar impregnados con sustancias químicas o materia orgánica proveniente de fluidos corporales. Existen varios tipos de incineradores para este tipo de residuos, pero el de más amplia utilización es el de tipo “aire controlado”; en éste la combustión de desechos ocurre en dos etapas, en la primera los desechos son alimentados y quemados en una cámara primaria en presencia de aire y combustible auxiliar, de tal manera que los desechos van a ser consumidos en dicha cámara generando gases producto de la combustión. En la segunda etapa, los gases van a pasar a una cámara secundaria, la cual está destinada a destruir aquellos compuestos contenidos en los gases, tales como productos de combustión incompleta y compuestos orgánicos procedentes de la cámara primaria.

Los principales objetivos de un incinerador de desechos hospitalarios son: reducir el peligro asociado con los desechos y reducir el volumen y masa de los mismos. Estos objetivos son consumados gracias a la exposición de los desechos hospitalarios a altas temperaturas durante un periodo de tiempo lo suficientemente largo para destruir organismos que pudieran ser una amenaza, y para

quemar la porción combustible de los desechos. El poder calorífico es obtenido de los mismos residuos y del combustible auxiliar, al ser quemados en presencia de aire; las desventajas de la incineración incluyen la necesidad de la disposición de cenizas y la potencial emisión de sustancias tóxicas y otros contaminantes.

El incinerador de desechos hospitalarios para el cual se diseñará el sistema de remoción de contaminantes del aire, es similar al de la figura siguiente



**Figura 1.1 Incinerador de desechos hospitalarios
con dos cámaras**

1.2 Emisiones generadas por el proceso de incineración

Un incinerador de desechos hospitalarios puede emitir una cantidad significativa de contaminantes a la atmósfera, el número de estas sustancias puede superar el centenar. Tales contaminantes incluyen:

- Material particulado (PM)
- Metales
- Gases ácidos
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Monóxido de carbono (CO)
- Compuestos Orgánicos
- Otros materiales presentes en desechos médicos

Material particulado

Es emitido como resultado de la combustión incompleta de orgánicos y el ingreso de materia no combustible en la corriente gaseosa de descarga. El material particulado puede salir como sólido o como aerosol, y en adición a las cenizas voladoras, éste puede contener metales pesados, ácidos y restos orgánicos. El ingreso de material particulado a la corriente gaseosa de descarga está relacionado con la turbulencia en la cámara primaria y con el tipo de incinerador, de tal manera que mientras un incinerador de cámara rotatoria emite

mucho material particulado, uno del tipo aire controlado en el cual los desechos están fijos, será el que emita menor cantidad de material particulado.

Por lo general, el tamaño de las partículas generadas desde un incinerador de desechos hospitalarios, está principalmente en el rango inhalable, es decir material particulado menor a 10 μm (PM_{10}). Las buenas condiciones de combustión serán de mucha ayuda para reducir la cantidad de partículas así como también el tamaño de las mismas.

Metales

La cantidad y tipo de metales que se emiten en la descarga, están en función del contenido de compuestos orgánico-metálicos e inorgánicos presentes en los desechos hospitalarios, los cuales pueden ser volatilizados y oxidados bajo las condiciones favorables de alta temperatura y oxidación en el incinerador. Los compuestos orgánico-metálicos volatilizados, tienden a condensarse sobre la superficie de las partículas, de tal manera que las más pequeñas van a tener una alta concentración de estos compuestos; los metales también pueden ser emitidos como materia en partículas.

Objetos como bisturís de cirugía, baterías y aparatos de medición son fuentes de restos de metales; plásticos como el policloruro de vinilo

(PVC) contienen Cadmio, el cual junto con el Cromo, Mercurio y Plomo son los metales de mayor inquietud para la salud pública.

El control de emisión de metales a la atmósfera incluye la minimización de la vaporización de metales presentes en los desechos y la maximización de la captación de partículas pequeñas. Por lo general, el sistema de control de emisión de partículas servirá también para el control de metales, incluyendo el mercurio si se provee un enfriamiento adecuado de los gases.

Gases ácidos

La combustión de desechos hospitalarios puede producir emisiones gaseosas en las formas de cloruro de hidrógeno (HCl) y dióxido de azufre (SO₂), además de cantidades más pequeñas de otros compuestos, como el fluoruro de hidrógeno (HF). El HCl se forma a partir del cloro contenido en los residuos a incinerarse, el cual a su vez puede encontrarse en plásticos (como el PVC, polietileno y poliestireno) o en ciertos productos químicos. Así mismo, el SO₂ se forma según el contenido de azufre en los desechos y el combustible auxiliar.

Las técnicas de control para los gases ácidos incluyen la depuración húmeda y la depuración seca; la idea fundamental es neutralizar el ácido y/o colectar los constituyentes ácidos en soluciones acuosas o

en adsorbentes secos. Otro método de control consiste en separar los componentes de los residuos que contienen grandes cantidades de cloro y azufre, de manera que se obtendrá una reducción en los niveles de emisión de HCl y SO₂.

Óxidos de nitrógeno

Representan una mezcla constituida principalmente de monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Éstos a su vez son formados en la combustión como NO_x térmico y NO_x combustible, el primero es producto de la reacción a alta temperatura entre el nitrógeno y el oxígeno del aire de combustión, mientras que el segundo se forma mediante reacciones entre el oxígeno y nitrógeno orgánico del combustible.

El control de emisiones de NO_x incluye, por un lado, la separación en el origen de desechos que pueden aportar con nitrógeno orgánico, para el caso del NO_x combustible, y por otro lado, los controles de combustión y el tratamiento de los gases de combustión por medio de métodos como la reducción catalítica selectiva y la reducción catalítica no selectiva, para el caso del NO_x térmico.

Monóxido de carbono

Se presenta como un producto de combustión incompleta (PIC) de materiales que contienen carbono; la emisión de éste contaminante se debe principalmente a tiempos de residencia muy cortos en el incinerador, bajas temperaturas y condiciones de mezclado inferiores a las requeridas. Cuando la combustión no es completa se formará CO en lugar de CO₂ (dióxido de carbono), por lo tanto como método de control bastará con aplicar buenas prácticas de combustión.

Compuestos orgánicos

Este tipo de compuestos se presentan en la descarga del incinerador debido a fallas en el proceso de combustión, de tal manera que se obtendrán productos de combustión que reaccionaron parcialmente o compuestos que no reaccionaron, es decir se obtendrán productos de combustión incompleta. Tales productos pueden ir desde hidrocarburos de bajo peso molecular hasta compuestos clorados de alto peso molecular como son las policlorodibenzo-p-dioxinas y los policlorodibenzofuranos (PCDD y PCDF), conocidos simplemente como dioxinas y furanos; la importancia de estos compuestos radica en que algunos isómeros de estas familias se encuentran entre las sustancias más tóxicas que existen.

Para el control de compuestos orgánicos se recomiendan las buenas prácticas de combustión; las cuales incluyen la alimentación uniforme de los desechos, buena distribución del aire, y, temperatura, tiempo de residencia y turbulencia suficientes; la aplicación de éstas reducirá su emisión. Adicionalmente se puede utilizar el CO como sustituto para supervisar las emisiones de dioxinas y furanos, debido a que el CO también depende de las buenas prácticas de combustión.

El tema de las PCDD y los PCDF es complejo, controversial y relativamente nuevo, por lo que aún se discuten aspectos sobre sus mecanismos de formación, sus efectos sobre el ser humano, entre otros. Según información actualizada [3], el control de partículas es importante para reducir las emisiones de dioxinas y furanos, y además existe evidencia de que los depuradores húmedos pueden capturar estos compuestos si se mantienen por debajo de los 140 °C; sin embargo los controles de combustión siguen siendo la principal estrategia de control.

Otros contaminantes en los desechos hospitalarios

Entre estos podemos encontrar químicos citotóxicos usados en quimioterapia, los cuales son capaces de dañar, afectar o matar células; también podemos encontrar especies radioactivas utilizadas en estudios de diagnósticos in vitro. Los primeros pueden ser

destruidos con temperaturas superiores a los 1095 °C; por otro lado, la incineración se recomienda como un excelente método para el manejo de desechos de baja radioactividad.

En los residuos hospitalarios se pueden encontrar objetos (como sábanas y vendas) o instrumentos que estuvieron en contacto con materiales infecciosos como sangre, fluidos corporales y partes anatómicas. Tanto bacterias como patógenos serán destruidos fácilmente en el incinerador siempre y cuando se aseguren las condiciones que maximizan la destrucción de compuestos orgánicos, es decir, las buenas prácticas de combustión.

1.3 Estimación de las emisiones contaminantes

El objetivo en esta parte del trabajo es obtener los parámetros básicos que se requieren para el diseño del sistema de control de emisión de contaminantes, es decir vamos a determinar cuáles sustancias serán emitidas, en qué cantidad van a ser generadas y cuanto debe removerse de éstas para reducir su emisión hasta un nivel aceptable. Estos valores se determinarán a partir de la información obtenida del diseño del incinerador, la cual se expone en las siguientes líneas.

Podemos considerar que el aparato tiene las cámaras primaria y secundaria conectadas en serie como una sola cámara cuyas

paredes están cubiertas por material refractario de 22 cm de espesor, quedando finalmente las dimensiones de 37 cm de diámetro interno por 300 cm de longitud, para dicha cámara. En la cámara primaria se alcanzará una temperatura de 800 °C, mientras que en la cámara secundaria se espera alcanzar 1200 °C.

El diseño térmico del incinerador de desechos hospitalarios fue realizado haciendo un análisis de la distribución de temperaturas en las paredes del aparato y considerando el tiempo de residencia de los gases en su interior; tal análisis fue hecho para las primeras 5 horas de operación del incinerador.

El aparato fue diseñado considerando como la situación más crítica aquella en la que el incinerador trabaja sin carga de desechos hospitalarios, por lo que el flujo másico de combustible obtenido en los cálculos representa el máximo valor que se necesitaría para obtener en su interior la temperatura deseada; además se consideró para dichos cálculos que el flujo másico de los gases de combustión era 20 veces el del combustible.

Hemos extraído parte de la información del diseño térmico del incinerador y la presentamos en la siguiente tabla

TABLA 1
DATOS DEL DISEÑO DEL INCINERADOR

Hora	Consumo de diesel		Flujo de los gases de combustión (kg/h)	Temperatura de los gases de combustión (°C)
	(gal/h)	(kg/h)		
1	8.22	30.41	608.2	922.46
2	4.29	15.88	317.6	1006.48
3	3.33	12.34	246.8	1047.74
4	2.76	10.20	204.0	1073.1
5	2.34	8.65	173.0	1090.8

Como podemos ver, el mayor consumo de combustible se da en la primera hora, ya que durante ésta se deberá alcanzar la temperatura deseada, que se ha establecido en 1200 °C para la cámara secundaria, partiendo desde la temperatura ambiente. Durante las siguientes horas, el consumo de combustible desciende gradualmente junto con el flujo másico de los gases de combustión, notándose cierta tendencia a la estabilización a medida que transcurre el tiempo.

Además de esto, se conoce que el combustible a utilizarse es Diesel producido en Ecuador y que el diseño incorpora un sistema de recuperación de energía a partir de los gases calientes de descarga, mediante la utilización de un intercambiador de calor, por esta razón aunque la temperatura alcanzada en el interior del incinerador será de 1200 °C, su valor a la salida del intercambiador de calor ha sido establecido en 600 °C; éste valor corresponde a la temperatura a la

cual se reciben los gases para ser tratados, los cuales se asume que salen a 1 atm. de presión.

Para nuestros cálculos en el presente trabajo, nos vemos precisados a escoger los datos correspondientes a una hora determinada de funcionamiento del incinerador. Partiendo del hecho de que la primera hora de operación del aparato servirá en parte para calentar su interior, consideramos que tomar los datos de la primera hora de funcionamiento sería erróneo y daría como resultado un sobredimensionamiento del sistema de remoción de contaminantes. Tampoco sería correcto tomar los valores correspondientes a la cuarta o quinta hora de funcionamiento, ya que no podemos despreciar el hecho de que estamos tratando con períodos de 1 hora de operación, es decir no se puede pasar por alto la operación durante las primeras horas ya que de todas maneras se va a generar contaminación por periodos de tiempo considerables. Por lo tanto hemos llegado a la conclusión de que los valores presentados en la segunda hora de funcionamiento serán los más adecuados para su utilización en nuestros cálculos.

Adicionalmente es necesario modificar ligeramente el flujo másico de los gases de combustión para tomar en consideración el aire adicional requerido al incluir los desechos a incinerarse, puesto que en los cálculos realizados para llegar a los resultados presentados en

el diseño térmico del incinerador, no se consideró la presencia de los desechos. Por ello, vamos a tomar un 20% adicional al valor presentado como flujo másico de los gases de combustión, en la segunda hora, es decir: $G = 1.2 \cdot 317.6 = 381.12 \text{ kg/h}$

Este flujo, junto a los demás datos con los cuales vamos a trabajar de aquí en adelante, y que son de gran importancia para la realización de esta tesis se presentan en resumen en la tabla siguiente

TABLA 2
VALORES SELECCIONADOS PARA EL DISEÑO
DEL SISTEMA DE REMOCIÓN

Parámetro	Valor
Cantidad de desechos a incinerarse	5 kg/h
Tipo de combustible auxiliar	Diesel 2
Flujo de combustible auxiliar	15.88 kg/h
Flujo de los gases de combustión	381.12 kg/h
Temperatura de salida de los gases	600 °C

1.3.1 Descripción del procedimiento empleado

Para llevar a cabo el proceso de estimación de emisiones contaminantes generadas por el incinerador de desechos

hospitalarios, vamos a hacer uso de dos técnicas; cada una va a generar resultados diferentes, sin embargo finalmente podremos combinar ambos resultados con la finalidad de obtener valores representativos de las emisiones reales que se generarán.

La primera técnica que vamos a utilizar para lograr nuestro objetivo, es la ejecución de un balance de masa sobre el incinerador, para lo cual se va a considerar como masa de ingreso el conjunto formado por los desechos, el combustible y el aire de combustión, mientras que como masa de salida se considerarán los gases producto de la combustión y la ceniza generada en la combustión; las sustancias que se generan en el proceso de incineración de residuos hospitalarios son muy numerosas, resultaría imposible predecir todas las sustancias que se van a generar, por lo tanto vamos a considerar solo las principales en el balance de masa partiendo de ciertas asunciones que se hacen más adelante.

El balance de masa consistirá en hallar una fórmula aproximada de la mezcla combustible total (desechos hospitalarios + combustible líquido), para luego haciendo uso de dicha fórmula, balancear una reacción química de combustión y de esta forma obtener los productos de combustión. Esto a su vez permitirá

establecer, por medio del número de moles de los productos gaseosos, el volumen de los gases de descarga a la salida del incinerador.

La segunda técnica consiste en la utilización de los factores de emisión publicados por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) en el documento “Compilation of Air Pollutant Emission Factors” [7] mejor conocido como AP – 42. Entre los usos que se les da a tales factores de emisión, está el de estimación de emisiones desde una fuente específica, en nuestro caso el incinerador de desechos hospitalarios. Los factores de emisión requeridos se encuentran en la sección 2.3 del mencionado documento.

1.3.2 Caracterización de materiales a incinerarse

Para poder ejecutar el balance de masa, es necesario conocer la composición química de los desechos a incinerarse; debido a que tal composición varía con el tipo de material, sería muy útil conocer cuáles materiales y en qué cantidad van a ser incinerados.

Por esta razón vamos a recurrir a la información obtenida en un estudio realizado en Ecuador bajo el nombre de “Proyecto de Asesoría Técnica en Incineradores de Desechos Hospitalarios”

[15], auspiciado por la Red Panamericana de Manejo de Residuos y el Ministerio de Salud Pública; en ese estudio se presenta, gráficamente, la composición aproximada de los desechos hospitalarios en base a información obtenida en hospitales de las principales ciudades del país. El objetivo principal de ese estudio realizado en 1998 fue examinar el estado de la incineración de desechos hospitalarios en Ecuador, por medio del monitoreo de las emisiones gaseosas, de las variables del proceso termo-químico y de las condiciones de operación; entre los aspectos que fueron estudiados, estuvieron la caracterización de los desechos hospitalarios, la caracterización de los gases de descarga, el análisis de las escorias, entre otros.

Se destaca en los resultados que los residuos hospitalarios estaban constituidos, en una proporción mayor al 70%, por papeles, plásticos y textiles, lo cual era evidencia de que en los desechos existían materiales que deberían haber sido manejados como residuos comunes, es decir no debían entrar al incinerador.

A continuación mostramos la composición aproximada de los desechos hospitalarios a incinerarse, en porcentaje de masa, la cual ha sido extraída del estudio mencionado anteriormente.

Adicionalmente se calcula el peso en base seca de los mismos de acuerdo al contenido de humedad típico (apéndice A) que presentan los residuos sólidos, siendo 5 kilogramos por hora la cantidad a incinerarse.

TABLA 3
CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS
HOSPITALARIOS

Componente	Peso*	Peso húmedo	Contenido de humedad típico	Peso seco
	(%)	(kg)	(%)	(kg)
PAPEL	23	1.150	6	1.081
PLÁSTICOS	35.3	1.765	2	1.730
TEXTILES	13	0.650	10	0.585
METAL	2	0.100	3	0.097
MADERA	0.3	0.015	20	0.012
VIDRIO	11	0.550	2	0.539
FLUIDOS	9	0.450	41	0.266
INERTES	0.4	0.020	8	0.018
ORGÁNICOS	6	0.300	78.29	0.065
TOTAL	100	5		4.393

*Distribución aproximada de desechos hospitalarios en Ecuador

1.3.3 Estimación por balance de masa

El objetivo en esta parte del problema es obtener una reacción química con sus reactivos y productos debidamente balanceados. Pero antes es necesario hallar una fórmula aproximada del material combustible, que en nuestro caso es la

mezcla de los desechos hospitalarios con el combustible (5 kg/h de desechos + 15.88 kg/h de diesel); para ello es necesario caracterizar la composición química de la mezcla combustible, es decir el contenido de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, y demás elementos que fuera posible. Esto último se puede hacer conociendo el análisis elemental de los componentes de residuos sólidos, que no es más que el contenido promedio de los elementos químicos que se encuentran en residuos comunes como papel, metales, plásticos, etc. De manera similar se debe proceder con el contenido del combustible líquido.

En el apéndice B se muestra una tabla con la distribución de los elementos químicos, tanto para los desechos hospitalarios como para el combustible auxiliar (Diesel 2); los valores entre paréntesis son porcentajes de masa.

Para hallar la distribución de los elementos químicos contenidos en los desechos hospitalarios, se utilizaron tablas (apéndice C) que muestran la composición del diesel, producido en Ecuador, y datos típicos sobre el análisis elemental de residuos sólidos en porcentaje del peso en base seca.

De los resultados obtenidos en la última fila de la tabla del apéndice B, podemos conocer la distribución de cada uno de

los elementos contenidos en la mezcla, en base seca y en base húmeda. Para obtener el peso en base húmeda, simplemente se debe añadir la humedad (la diferencia entre el peso seco y el peso húmedo), descompuesta en hidrógeno y oxígeno, a la composición en base seca. El resultado obtenido es el siguiente

TABLA 4
COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA COMBUSTIBLE

Componente	Peso (kg)	
	Sin agua	Con agua
CARBONO	15.786	15.786
HIDRÓGENO	2.396	2.464
OXÍGENO	0.899	1.443
COLORO	0.292	0.292
AZUFRE	0.059	0.059
NITRÓGENO	0.056	0.056
CENIZA	0.781	0.781
Total	20.269	20.880

El siguiente paso consiste en expresar los resultados obtenidos en moles, para luego hallar la fracción molar de cada elemento en la mezcla. Este último valor representa el subíndice de cada elemento en la fórmula química aproximada del combustible libre de cenizas, es decir, los subíndices de:



Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 5

TABLA 5
FRACCIÓN MOLAR DE LOS ELEMENTOS

Componente	Peso atómico	Moles		Fracción molar		
	(g/mol)	Sin Agua	Con Agua	Sin Agua	Con Agua	
CARBONO	12	1315.469	1315.469	0.3479	0.3387	z
HIDRÓGENO	1	2395.875	2463.773	0.6336	0.6344	y
OXÍGENO	16	56.218	90.167	0.0149	0.0232	x
CLORO	35.45	8.233	8.233	0.0022	0.0021	w
AZUFRE	32	1.855	1.855	0.0005	0.0005	v
NITRÓGENO	14	4.009	4.009	0.0011	0.0010	u

Donde los moles de cada componente han sido obtenidos por la relación: $n = m / MW$, siendo:

m = peso del componente, g

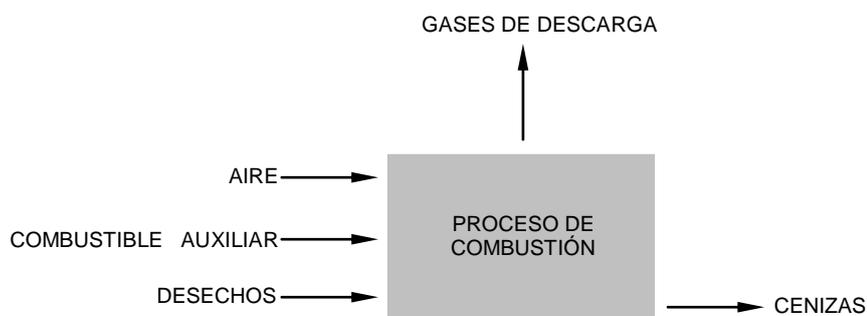
MW = peso molecular del elemento, g/mol

La fracción molar es simplemente la relación del número de moles del componente para el número de moles total, por lo tanto la fórmula aproximada del combustible es la siguiente:



Finalmente podemos proceder a desarrollar y balancear la reacción química que describe el proceso de combustión, partiendo del balance de masa sobre el incinerador, el cual se muestra esquemáticamente en la figura 1.2

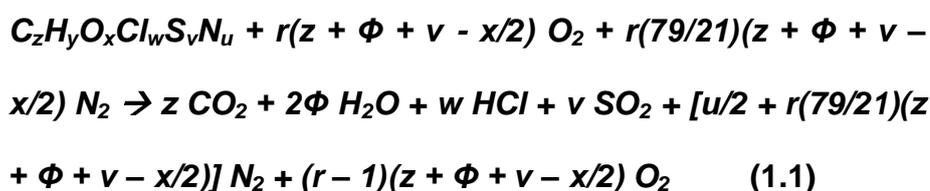
FIGURA 1.2
BALANCE DE MASA DEL INCINERADOR



La reacción de combustión balanceada y expresada en función de la fracción molar de los elementos presentes en la mezcla combustible, ha sido tomada de un texto que trata el tema de incineración de desechos sólidos [3]. Dicha ecuación ha sido desarrollada en base a la composición de la mezcla combustible libre de ceniza y asumiendo que:

- Se desprecia la formación de Cl_2 , SO_3 y NO_x
- El oxígeno en la mezcla desechos + combustible está disponible químicamente como un oxidante (y no por ejemplo, ligado como un óxido inorgánico)
- La composición del aire es 79% de Nitrógeno y 21% de Oxígeno
- La combustión es completa

Basándose en estas condiciones, la ecuación puede ser escrita como:



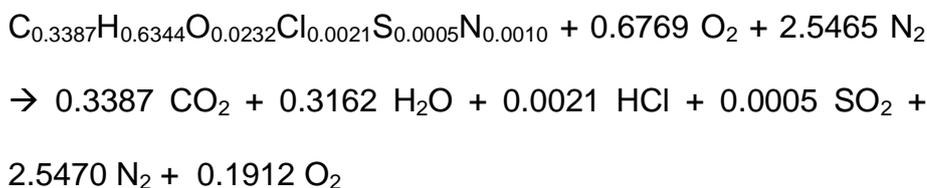
donde,

$$\Phi = (y - w) / 4 ; y > w$$

$$\Phi = 0 ; y \leq w$$

El término r-1 representa el exceso de aire que es utilizado, de tal manera que si $r = 1$, entonces la combustión es estequiométrica; en nuestro caso el exceso de aire que permite obtener 381.12 kg/h de gases de combustión es 39.37 %, por lo tanto $r = 1.3937$.

Sustituyendo los valores de los subíndices, z, y, x, w, v, u por los valores hallados en la tabla 5, la ecuación queda expresada como



Esta ecuación química representa la combustión de 1 mol de la mezcla desechos + combustible, libre de ceniza, que equivale a 5.1756 g. De manera similar se puede obtener la masa de los otros reactivos y productos, multiplicando el número de moles por el respectivo peso molecular de cada uno de los compuestos. Pero la cantidad real que se quema no es 1 mol, sino que viene dada en función de la masa de desechos y combustible libres de ceniza que ingresa al incinerador, o sea:

$$m = m_{\text{desechos + combustible}} - m_{\text{ceniza}}$$

$$m = 20.88 \text{ kg} - 0.781 \text{ kg}$$

$$m = 20.099 \text{ kg}$$

la cual expresada en moles resulta ser

$$n = m / MW$$

$$n = 20.099 \text{ g} / (5.1756 \text{ g/mol})$$

$$n = 3883.506 \text{ moles}$$

Con este último valor y con las relaciones molares de la ecuación de combustión balanceada, podemos hallar el número de moles reales que intervienen en el proceso de combustión y por lo tanto la masa correspondiente a cada compuesto.

TABLA 6
ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR BALANCE DE MASA

		Para 1 mol de mezcla		Valores estimados		Masa total (kg)
		Moles	Masa (g)	Moles	Masa (kg)	
REACTIVOS	Desechos + Combustible	1.0000	5.1756	3883.506	20.099	381.120
	O₂	0.6769	21.6611	2628.787	84.121	
	N₂	2.5465	71.3013	9889.247	276.899	
PRODUCTOS	CO₂	0.3387	14.9042	1315.469	57.881	381.120
	H₂O	0.3162	5.6907	1227.770	22.100	
	HCl	0.0021	0.0773	8.233	0.300	
	SO₂	0.0005	0.0306	1.855	0.119	
	N₂	2.5470	71.3157	9891.252	276.955	
	O₂	0.1912	6.1195	742.662	23.765	
	Total de cenizas*	-	-	-	0.781	0.7806

*Corresponde a las cenizas de fondo y a las cenizas voladoras

Las columnas que se presentan en la tabla 6 como “valores estimados” corresponden a las cantidades reales que intervienen en la combustión, por lo tanto el valor de los productos que se presentan en tales columnas, corresponde a la emisión estimada de cada uno de ellos, en moles y en kilogramos, para 1 hora de funcionamiento del incinerador. En la última columna se puede apreciar la igualdad de masa entre reactivos y productos, lo cual demuestra que el proceso ha sido desarrollado correctamente.

La parte que corresponde a las cenizas, está presente tanto en los reactivos como en los productos, pues las cenizas no reaccionan para formar ningún compuesto, ya que constituyen la parte no combustible de los desechos. Sin embargo, el valor obtenido representa tanto las cenizas de fondo como las cenizas voladoras; las primeras son el residuo no quemado de los desechos hospitalarios, constituidas principalmente por vidrio y metales, mientras que las cenizas voladoras son partículas finas generadas por el proceso de combustión y arrastradas por la corriente gaseosa.

Para predecir la cantidad de cenizas que serán arrastradas en la descarga del incinerador, se recurre a la técnica expuesta en la siguiente sección.

1.3.4 Estimación por factores de emisión

Desde 1970 la EPA ha publicado y ha venido mejorando y actualizando el documento *Compilation of Air Pollutant Emission Factors* que se conoce popularmente como AP-42. Un factor de emisión relaciona la cantidad (en peso) de un contaminante emitido para una unidad de actividad de la fuente, en nuestro caso kg de contaminante por Mg (Megagramos) de desechos hospitalarios incinerados; tales factores pueden ser utilizados para estimar las emisiones desde una determinada fuente.

Cabe indicar que estos factores de emisión han sido desarrollados, en Estados Unidos, a partir de información obtenida por medio de pruebas realizadas a incineradores de varios establecimientos de ese país; y que además tienen un rango de confiabilidad, desde A (muy confiable), hasta E (poco confiable). Por otro lado la composición de los desechos hospitalarios puede variar de un hospital a otro por diversas causas, tales como el tipo de actividades que se realizan o el reciclaje de ciertos materiales.

Es evidente entonces que los resultados obtenidos al aplicar factores de emisión, por ningún motivo podrán ser considerados como exactos; sin embargo su utilidad radica en que los valores

numéricos obtenidos van a representar un rango en el cual se está emitiendo determinada sustancia, de tal manera que estos resultados servirán para establecer el grado de importancia que tiene un contaminante y por lo tanto el tipo de control que debería utilizarse para reducir su emisión.

Partiendo del hecho de que los materiales que se encuentran normalmente en los desechos hospitalarios son similares de un establecimiento a otro, vamos a utilizar los factores para hacer la estimación de emisiones, teniendo en mente que es preferible confiar en la información obtenida del balance de masa hasta donde sea posible.

El Volumen I del documento *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, en su Quinta Edición de Enero de 1995, presenta los factores de emisión para fuentes puntuales estacionarias y de área. El capítulo 2 del mencionado documento está relacionado con la disposición de desechos sólidos, del cual, la sección 2.3 está dirigida a la incineración de desechos hospitalarios y contiene los factores de emisión para dicha aplicación. Esta información puede ser obtenida accediendo a la Technology Transfer Network del sitio web de la EPA [7]. La tabla 7 ha sido extraída del mencionado documento, y muestra la distribución de tamaño de partícula en

los gases de descarga de un incinerador de desechos hospitalarios del tipo aire controlado. El grado de confiabilidad de dichos valores es E (poco confiable), sin embargo éstos se encuentran en el rango que señalaba la teoría, es decir el rango respirable ó PM₁₀.

TABLA 7
DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA

Diámetro de corte (μm)	Porcentaje de masa acumulada menor que el tamaño establecido – fuente no controlada (%)	Porcentaje de masa acumulada menor que el tamaño establecido – usando lavador (%)
0.625	31.1	0.1
1.0	35.4	0.2
2.5	43.3	2.7
5.0	52	28.1
10.0	65	71.9

Además, el documento AP – 42, Sección 2.3 contiene tablas en las que constan los factores de emisión para varias sustancias contaminantes; estos factores vienen dados en kg de contaminante por Mg (Megagramos) de desechos. Un manual para la estimación de emisiones citado como referencia [19] establece que para realizar los cálculos utilizando los factores de emisión debería tomarse la masa seca de los desechos hospitalarios, y que en el caso de sustancias como monóxido de carbono, fluoruro de hidrógeno, óxidos de nitrógeno, material particulado, dióxido de azufre, cloruro de hidrógeno y

compuestos orgánicos volátiles totales, debería utilizarse la masa seca de la mezcla desechos + combustible auxiliar. Esto último tiene mucho sentido, por cuanto la emisión de la mayoría de las sustancias citadas está directamente relacionada con la composición del combustible auxiliar.

TABLA 8
ESTIMACIÓN DE EMISIONES UTILIZANDO FACTORES DE
EMISIÓN – 1

Sustancia de emisión estimada	Factor de emisión (AP-42) (kg de contaminante / Mg de alimentación)	Confiabilidad	Emisión estimada del contaminante	
			(kg)	(g)
Monóxido de Carbono	1.48	A	0.0300	29.998
Fluoruro de Hidrógeno	0.0743	D	0.0015	1.506
Óxidos de Nitrógeno	1.78	A	0.0361	36.079
Material Particulado Total	2.33	B	0.0472	47.227
Dióxido de Azufre	1.09	B	0.0221	22.093
Cloruro de Hidrógeno	16.8	C	0.3405	340.518
Compuestos Orgánicos Totales	0.15	B	0.0030	3.040

Las tablas 8 y 9, presentan los factores de emisión para cada una de las sustancias junto al grado de confiabilidad de cada uno; adicionalmente se presenta el valor estimado de la emisión de cada sustancia, el cual ha sido calculado multiplicando la masa correspondiente (en Megagramos) por el respectivo

factor; los valores obtenidos son para 1 hora de funcionamiento del incinerador.

TABLA 9
ESTIMACIÓN DE EMISIONES UTILIZANDO FACTORES DE
EMISIÓN – 2

Sustancia de emisión estimada	Factor de emisión (AP-42) (kg de contaminante / Mg de desechos)	Confiablez	Emisión estimada del contaminante	
			(kg)	(mg)
Plomo	0.0364	B	1.629E-04	162.875
Bifenilos Policlorados (PCB's)	0.0000233	E	1.043E-07	0.104
Aluminio	0.00524	E	2.345E-05	23.447
Antimonio	0.00639	D	2.859E-05	28.593
Arsénico	0.000121	B	5.414E-07	0.541
Bario	0.00162	D	7.249E-06	7.249
Berilio	0.00000312	D	1.396E-08	0.014
Cadmio	0.00274	B	1.226E-05	12.260
Cromo	0.000388	B	1.736E-06	1.736
Cobre	0.00624	E	2.792E-05	27.922
Hierro	0.00722	C	3.231E-05	32.307
Manganeso	0.000284	C	1.271E-06	1.271
Mercurio	0.0537	C	2.403E-04	240.286
Niquel	0.000295	B	1.320E-06	1.320
Plata	0.000113	D	5.056E-07	0.506
Talio	0.000551	D	2.466E-06	2.466
Bromuro de Hidrógeno	0.0216	D	9.665E-05	96.651
Cloro	0.0523	E	2.340E-04	234.022
Dibenzo-P-Dioxinas Cloradas	0.0000107	B	4.788E-08	0.048
Dibenzofuranos Clorados	0.0000358	B	1.602E-07	0.160

Los resultados se han presentado también en gramos y miligramos, para tener una idea más clara de la relación existente entre la emisión de cada sustancia. En la tabla 8 se ha hecho el cálculo considerando la masa seca de la mezcla de desechos y combustible auxiliar, la cual fue determinada en la sección anterior (apéndice B) como 20.269 kg, mientras que en la tabla 9 se utiliza solamente la masa en base seca de los desechos a incinerarse, es decir 4.393 kg.

1.4 Eficiencia requerida para la remoción de contaminantes

Para hallar la eficiencia de remoción requerida será necesario expresar las emisiones en unidades consistentes y compararlas con un estándar. Existen estándares de emisión especiales para incineradores de desechos hospitalarios nuevos, los mismos que han sido establecidos por la EPA en el Código de Regulaciones Federales (40 CFR 60) como Estándares de Desempeño para Fuentes Nuevas.

La información obtenida en las secciones anteriores, especialmente los resultados del balance de masa, serán de gran utilidad en el desarrollo de esta parte del trabajo.

1.4.1 Regulaciones aplicables a incineradores de desechos hospitalarios

En Ecuador, las políticas medioambientales están establecidas en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria; y aunque el Anexo 3 del Libro VI del mencionado texto muestra límites permisibles de emisión para fuentes fijas de combustión, no se establecen dichos límites para el caso específico de incineradores de desechos hospitalarios.

Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) es un organismo reconocido internacionalmente en la investigación y desarrollo de diversas áreas relacionadas con el medio ambiente, razón por la cual, la información que esta entidad provee es tomada como referencia en muchos países, y el nuestro no es la excepción. Por tal motivo vamos a recurrir a parte de esa información para establecer los límites permisibles de emisión que debemos adoptar en esta aplicación.

En Septiembre de 1997, la EPA publicó estándares de desempeño para fuentes nuevas y normas de emisión para fuentes existentes, aplicables a Incineración de Desechos Hospitalarios. Esta información aparece en el Registro Federal

de los Estados Unidos de América (Volumen 62, comenzando por la página 48347) y se encuentra disponible accediendo al sitio web de la EPA [8].

El título 40 del Código de Regulaciones Federales, Parte 60 (40 CFR 60), establece Estándares de Desempeño para Fuentes Estacionarias Nuevas (New Source Performance Standards ó NSPS) y Normas de Emisión para Fuentes Existentes, aplicables a Incineradores de Desechos Hospitalarios, Médicos e Infecciosos. La subparte Ce del 40 CFR 60 está dirigida a incineradores existentes, considerados como tales si fueron construidos antes del 20 de Junio de 1996, para los cuales se establecen Normas de Emisión.

Aquellos incineradores construidos después del 20 de Junio de 1996 no están sujetos a las normas de la subparte Ce; éstos son considerados Fuentes Nuevas y como tales están sujetos a los NSPS de la subparte Ec.

La tabla 1 de la subparte Ec (apéndice D), 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 considerado como pequeño si su capacidad de carga es menor o igual 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 O₂; además se establece que las condiciones estándar a las que se hace referencia en ese documento han sido tomadas como 20°C y 101.3 kilopascales.

1.4.2 Determinación de la eficiencia de remoción requerida

Una de las formas más utilizadas para expresar la concentración de un contaminante es en unidades de masa por volumen; esto conduce a la necesidad de hallar el volumen de la descarga gaseosa. Para ello, vamos a utilizar el número total de moles de los gases de escape, en combinación con la Ley de los Gases Ideales:

$$P \cdot V_o = n \cdot R_u \cdot T \quad (1.2)$$

donde

P = presión. Pa

V_o = volumen, m³

n = número de moles

R_u = constante universal de los gases, 8.314 m³-Pa/gmol-K

T = temperatura, K

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

TABLA 10
MOLES DE LA DESCARGA GASEOSA

Gases de descarga	Moles
CO ₂	1315.469
H ₂ O	1227.770
HCl	8.233
SO ₂	1.855
N ₂	9891.252
O ₂	742.662
Total	13187.2403

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

$$V_0 = \frac{n \cdot R_u \cdot T}{P}$$

$$V_0 = \frac{13187.240 \text{ gmol} \cdot 8.314 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}}{\text{gmol} \cdot \text{K}} \cdot 293 \text{ K}}{101300 \text{ Pa}}$$

$$V_0 = 317.06 \text{ m}^3 = 317.06 \text{ scm}$$

Para expresar las emisiones en términos de concentración utilizamos la siguiente relación

$$C = m / V_o$$

donde

C = concentración del contaminante, mg/scm

m = masa estimada del compuesto, mg

V_o = volumen estándar de la descarga, scm

Algunos estándares respecto a los cuales vamos a comparar, vienen dados en partes por millón volumétricas (ppmv); para llevar las unidades de mg/scm a ppmv, se utilizará la relación

$$ppmv = \frac{C \cdot R_u \cdot T}{1000 \cdot P \cdot MW} \quad (1.3)$$

donde

C = concentración del contaminante, mg/scm

R_u = constante universal de los gases, 8.314 m³-Pa/gmol-K

T = temperatura estándar, K

P = presión estándar, Pa

MW = peso molecular de la sustancia contaminante, g/gmol

La concentración obtenida para las 9 sustancias reguladas por los estándares de emisión se presentan en la tabla 11; los resultados han sido obtenidos utilizando las relaciones descritas

anteriormente y están expresados en mg/scm, y luego, si fuera el caso, transformados a unidades equivalentes que permitirán comparar con el estándar.

TABLA 11
CONCENTRACIÓN DE LAS SUSTANCIAS
CONTAMINANTES

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN	
	en (mg/scm)	en unidades comparables con estándar
Material Particulado	148.9476	148.9476 mg/scm
Monóxido de carbono	94.6105	81.2420 ppmv
Dioxinas / Furanos	0.0006	644.2203 ng/scm
Cloruro de Hidrogeno	946.4063	624.2797 ppmv
Dióxido de Azufre	374.4197	140.6624 ppmv
Óxidos de Nitrógeno	113.7883	59.4756 ppmv
Plomo	0.5043	0.5043 mg/scm
Cadmio	0.0380	0.0380 mg/scm
Mercurio	0.7440	0.7440 mg/scm

Existen también ciertas correcciones que deben hacerse a los valores de concentración para poder compararlos con un estándar. Una de las razones para hacer tales correcciones es la de prevenir los efectos de dilución que pueden aparecer en los resultados y que por lo tanto conducirían a obtener concentraciones mas bajas.

Los límites de emisión que aparecen en la subparte Ec del 40 CFR 60 vienen dados en base seca y al 7% de O₂; esto significa que ambas correcciones deben hacerse.

Para expresar la concentración en base seca (mg/dscm), se deberá hallar primero el contenido de agua en los gases de descarga expresado en fracción de volumen; o en fracción molar que es lo mismo. Por lo tanto hallamos dicho valor como

$$y_{H_2O} = \frac{\text{moles de H}_2\text{O}}{\text{moles totales}}$$

$$y_{H_2O} = \frac{1227.770}{13187.240}$$

$$y_{H_2O} = 0.093$$

Con este valor se procederá a expresar la concentración en base seca utilizando la relación

$$C_{db} = \frac{C}{1 - y_{H_2O}} \quad (1.4)$$

donde

C_{db} = concentración en base seca, mg/dscm ó ppmv

C = concentración condiciones estándar, mg/scm ó ppmv

y_{H_2O} = fracción molar de agua en los gases

De manera similar procedemos a hacer la corrección al 7% de O₂, para lo cual debemos hallar primero el porcentaje molar del oxígeno contenido en los gases de descarga, por lo tanto calculamos dicho valor como

$$\%O_2 = \frac{\text{moles de } O_2}{\text{moles totales}} \times 100$$

$$\%O_2 = \frac{742.662}{13187.240} \times 100$$

$$\%O_2 = 5.631\%$$

Con el porcentaje de oxígeno calculado, y utilizando la concentración en base seca, se procede a hacer la corrección al 7% de O₂, utilizando la siguiente relación

$$C_{db,7\%O_2} = \frac{C_{db} \cdot (20.9\% - 7\%)}{(20.9\% - \%O_2)} \quad (1.5)$$

donde

$C_{db, 7\% O_2}$ = concentración corregida a base seca y al 7%

de oxígeno, mg/dscm ó ppmv

$\%O_2$ = contenido de oxígeno en los gases, % en volumen

La siguiente tabla muestra la concentración corregida a base seca y al 7% de oxígeno.

TABLA 12
CORRECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN	
	en base seca	en base seca, al 7% de O ₂
Material Particulado	164.239 mg/dscm	149.520 mg/dscm
Monóxido de carbono	89.582 ppmv	81.554 ppmv
Dioxinas / Furanos	710.357 ng/dscm	646.695 ng/dscm
Cloruro de Hidrogeno	688.369 ppmv	626.678 ppmv
Dióxido de Azufre	155.103 ppmv	141.203 ppmv
Óxidos de Nitrógeno	65.581 ppmv	59.704 ppmv
Plomo	0.556 mg/dscm	0.506 mg/dscm
Cadmio	0.042 mg/dscm	0.038 mg/dscm
Mercurio	0.820 mg/dscm	0.747 mg/dscm

Finalmente vamos a calcular la eficiencia que debería tener el equipo o el mecanismo de control de emisiones, para remover cada una de las sustancias contaminantes, de tal manera que la concentración de éstas se reduzca hasta su límite permisible de emisión. Esto se hace determinando la variación porcentual de la concentración entre la entrada y la salida del sistema de remoción, respecto a su valor de entrada. En nuestro caso la concentración a la entrada será igual al valor de concentración estimado de emisión corregido a base seca, al 7% de O₂ y en condiciones estándar, mientras que el valor a la salida será igual al límite permisible de emisión (NSPS subparte Ec del 40 CFR 60), esto es

$$ER = \frac{\text{Emisión estimada} - \text{Estándar de Emisión}}{\text{Emisión estimada}} \cdot 100 \quad (1.6)$$

donde ER es la eficiencia de remoción en %, y los valores de emisión estimada y estándar de emisión están expresados en unidades de concentración. En la tabla 13 se presenta el cálculo de la eficiencia de remoción para cada una de las sustancias reguladas; de esta manera hemos obtenido los datos necesarios para proceder al diseño del sistema de control de emisiones contaminantes del aire.

TABLA 13
EFICIENCIA DE REMOCIÓN REQUERIDA POR EL MECANISMO
DE CONTROL

SUSTANCIA	Emisión estimada	Límite permisible NSPS 40 CFR 60	Eficiencia de remoción requerida
	7% de O ₂ -Base seca	7% de O ₂ -Base seca	(%)
Material Particulado	149.52 mg/dscm	69 mg/dscm	53.85
Monóxido de carbono	81.55 ppmv	40 ppmv	50.95
Dioxinas / Furanos	646.70 ng/dscm	125 ng/dscm	80.67
Cloruro de Hidrogeno	626.68 ppmv	15 ppmv	97.61
Dióxido de Azufre	141.20 ppmv	55 ppmv	61.05
Óxidos de Nitrógeno	59.70 ppmv	250 ppmv	<i>bajo el límite</i>
Plomo	0.51 mg/dscm	1.2 mg/dscm	<i>bajo el límite</i>
Cadmio	0.04 mg/dscm	0.16 mg/dscm	<i>bajo el límite</i>
Mercurio	0.75 mg/dscm	0.55 mg/dscm	26.36

Como conclusión podemos anotar que los valores obtenidos en este capítulo, especialmente los del balance de masa y los de la última tabla, proporcionarán información muy importante para el diseño de los equipos de remoción de contaminantes. Si bien es cierto, el balance de masa no incluye todas las sustancias que se generan en los gases, cabe señalar que los resultados obtenidos para el dióxido de azufre y el cloruro de hidrógeno, representan los valores máximos posibles, pues no se consideró la formación de otras sustancias derivadas del azufre o el cloro. Esto, unido al hecho de que tampoco se consideró el reciclaje de algún material de los desechos, proporciona cierto grado de confiabilidad a la utilización de los resultados en el proceso de diseño.