

CAPÍTULO 2

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los principales pasos en el diseño de sistemas de control de contaminación del aire son: la definición preliminar del problema, la definición final del problema y una serie de puntos de decisión asociados con las alternativas y sus respectivos subproblemas.

La definición preliminar del problema consiste en abordar el problema de una forma general, es decir, se trata de establecer qué es lo que motiva a hacer el diseño; en nuestro caso el problema preliminar es simplemente que el funcionamiento de un incinerador de desechos hospitalarios va a generar contaminación en el aire debido a sus gases de descarga y ésta debe ser controlada.

El paso siguiente es la definición final del problema, la cual consiste en establecer los principales parámetros de diseño del sistema, es decir, se trata de describir cuantitativamente y/o cualitativamente la situación a partir de la cual se va a hacer el diseño. Para ello se requiere hacer

mediciones, muestreos, análisis o cálculos que permitan obtener datos numéricos, fundamentalmente de la corriente gaseosa a ser tratada.

El tercer paso es el que va a arrojar la solución del problema; éste tiene que ver con una serie de decisiones que se deben tomar a través del proceso de diseño. La importancia de los puntos de decisión radica en que existen diversos mecanismos destinados a cumplir un mismo objetivo, pero cada uno de ellos tiene sus propias ventajas y limitaciones. Para elegir entre uno u otro equipo de control, se deberá tomar en cuenta aspectos tales como el tipo de contaminante a remover, sus características, el flujo de la descarga, su temperatura y presión, la capacidad de remoción requerida, el espacio disponible, entre otros; por lo tanto el criterio de decisión estará unido al conocimiento de los principios fundamentales de operación de cada uno de los equipos considerados como alternativas.

El presente capítulo está destinado a establecer la solución más adecuada para lograr nuestro objetivo de remover los contaminantes del aire, haciendo previamente un análisis del problema y basándonos en la información que tenemos disponible hasta este punto del presente trabajo. Antes de continuar, es necesario hacer la definición del problema, la cual exponemos a continuación.

Definición final del problema

Se tiene un incinerador de desechos hospitalarios, el cual va a generar una descarga gaseosa de aproximadamente 381.12 kg/h a una temperatura de 600 °C y una presión de 1 atm, la misma que consiste de gases producto del proceso de combustión y partículas como cenizas voladoras.

Se ha estimado la emisión de cada una de las sustancias reguladas por los límites permisibles de emisión establecidos por la EPA para éste tipo de aplicación. Estos valores, en conjunto con la eficiencia de remoción que debe tener el mecanismo de control para reducir las emisiones hasta el límite permisible, se presentan a continuación, tomando como base 1 hora de funcionamiento del incinerador.

TABLA 14
SUSTANCIAS QUE DEBEN SER REMOVIDAS

Sustancia	Emisión (mg/scm)	Eficiencia de remoción (%)
Material Particulado	148.9476	53.85
Monóxido de Carbono	94.6105	50.95
Dioxinas / Furanos	0.0006	80.67
Cloruro de Hidrogeno	946.4063	97.61
Dióxido de Azufre	374.4197	61.05
Óxidos de Nitrógeno	113.7883	bajo el límite
Plomo	0.5043	bajo el límite
Cadmio	0.0380	bajo el límite
Mercurio	0.7440	26.36

Dado que el incinerador procesa los desechos en una cámara (primaria y secundaria en serie) que permanece fija, el material particulado que se emite estará principalmente en el rango respirable (PM₁₀), por lo tanto la distribución de tamaño de partícula que caracteriza la emisión de estas se ha estimado que es la siguiente

TABLA 15
DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EMITIDAS

Rango	Diámetro de corte	Masa acumulada	Masa
(μm)	(μm)	(%)	(%)
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

Las partículas emitidas en la descarga serán principalmente “cenizas voladoras” las cuales a su vez podrían contener adheridas a su superficie otras sustancias tales como dioxinas, furanos y metales.

Se considera que la emisión de sustancias como el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y el mercurio, se realiza en estado gaseoso; la emisión de cloruro de hidrógeno se realiza

en forma de un aerosol fino; las emisiones de cadmio y plomo se realizan en forma de partículas finas ó como sustancias adheridas a las cenizas voladoras; la emisión de dioxinas y furanos se realiza en estado gaseoso y como sustancias adheridas a las cenizas voladoras.

A partir de la información dada, se debe diseñar un sistema que permita reducir las emisiones contaminantes por debajo del límite permisible establecido, y que además resulte técnicamente adecuado para su aplicación.

2.1 Identificación de las necesidades

Es importante establecer las necesidades que debe satisfacer el sistema de remoción de contaminantes, pues de ello dependerá la elección de una u otra alternativa.

En primer lugar hay que considerar la temperatura de la descarga gaseosa, la cual alcanza un valor de 600 °C, habiendo pasado previamente por un sistema de recuperación de energía. Esto conduce a la necesidad de diseñar un sistema que permita soportar tales temperaturas, o bien, que incorpore un dispositivo que permita reducir la temperatura de los gases hasta un valor adecuado que no cause problemas en los equipos de remoción. Por otro lado, hay que considerar que, reducir la temperatura de los gases provocará

problemas de condensación y disminución en la flotabilidad de éstos, por ello el diseño deberá prever tal situación.

El sistema deberá manejar una descarga gaseosa que contiene el tipo de partículas y gases descritos en la definición final del problema; tales partículas tendrán principalmente un tamaño menor a 10 μm , lo cual no significa que no vayan a estar presentes partículas mucho más grandes. En el caso de los gases contaminantes, hay que considerar que algunos de ellos son de carácter ácido y por lo tanto están en capacidad de deteriorar los componentes del sistema.

Por otro lado hay que considerar que el incinerador de desechos hospitalarios, podría variar ligeramente sus condiciones de operación y por lo tanto variarían también las características de la descarga gaseosa, por ello sería conveniente que el diseño del sistema permita modificar la capacidad de remoción del mismo sin que esto implique grandes cambios en su estructura.

Se requiere también que el sistema a diseñarse ocupe un espacio razonable, es decir que no sea muy grande considerando que el incinerador es pequeño y procesa solamente 5 kg/h; esto implica también que el costo del aparato no debería ser demasiado alto.

Para garantizar el correcto funcionamiento del equipo, hemos identificado también la necesidad de evitar en lo posible la utilización

de partes que necesiten ser reemplazadas continuamente o que requieran constante mantenimiento; y de incluir tales partes, entonces el diseño deberá permitir las operaciones de mantenimiento. Evitar la complejidad del sistema permitirá reducir la posibilidad de que ocurran fallas en su funcionamiento.

Finalmente, hay que considerar la dificultad que puede ofrecer el sistema al movimiento de la corriente gaseosa a través del mismo; esto conduce a la necesidad de que el sistema no presente una caída de presión muy elevada, pues esto incrementaría la energía requerida para mover el flujo, y por lo tanto el costo de operación del sistema.

Si bien es cierto el diseño deberá satisfacer las necesidades aquí expuestas, podemos señalar que todas ellas convergen a obtener una solución técnicamente conveniente en lo que se refiere a su aplicación al incinerador de desechos hospitalarios.

2.2 Análisis del problema

A partir de la identificación de las necesidades podemos señalar que existen tres puntos principales que deben ser analizados para llegar a una solución; estos son:

- Enfriamiento y recalentamiento del gas

- Control de material particulado
- Control de contaminantes gaseosos

Para mantener una secuencia adecuada en esta tesis, las principales técnicas relacionadas a solucionar los tres aspectos mencionados se tratan en capítulos posteriores. En esta parte se analizará las ventajas y los inconvenientes de aplicar tales técnicas.

Enfriamiento y recalentamiento del gas

Siendo un incinerador de desechos hospitalarios el que genera la descarga gaseosa, entonces podrían esperarse temperaturas tan altas como 1200 °C; afortunadamente, en nuestro caso un sistema de recuperación de energía permitirá que la temperatura a manejarse sea solo de 600 °C.

Esta temperatura es todavía muy alta como para procesar el gas en la mayoría de sistemas de control de contaminación del aire que se podrían emplear, razón por la cual se debe reducir.

A 600 °C, el gas todavía tiene cierta cantidad de energía que podría recuperarse para ser utilizada en necesidades externas al sistema, o mejor aún, en el sistema mismo. Por lo tanto vemos conveniente utilizar parte de esa energía en el recalentamiento del gas una vez

que haya sido depurado a baja temperatura en el sistema de remoción de contaminantes.

De las técnicas disponibles para el enfriamiento del gas, que son dilución con aire, inyección de agua, e intercambio de calor, la única que permite recuperar energía, es la tercera, o sea la utilización de un intercambiador de calor. Por otro lado, inyectar agua de manera directa en el gas, permite reducir su temperatura, de forma efectiva, a un bajo costo, pero con un incremento en la humedad; debido a que la temperatura del gas es alta, resultaría conveniente utilizar esta técnica en lugar del intercambio de calor, pues la utilización de ésta última implica el uso de un área muy grande para la transferencia de calor y por ende un alto costo.

No podemos dejar de mencionar la conveniencia de utilizar la dilución con aire para el enfriamiento de gases, pues el aire está siempre disponible y sin costo alguno, sin embargo la utilización de esta técnica cuando el gas está a temperaturas muy elevadas resulta desfavorable desde todo punto de vista, pues el volumen final de la descarga gaseosa es demasiado grande.

Por medio de la tabla siguiente podemos exponer los criterios de decisión que tomamos en consideración para comparar un sistema de enfriamiento de gases respecto a otro y calificarlos como bueno, regular y malo.

TABLA 16
COMPARACIÓN ENTRE LAS OPCIONES
APLICABLES AL ENFRIAMIENTO

	Dilución con aire	Inyección de agua	Intercambio de calor
Eficiencia	√	√√√	√√
Recuperación de energía	√	√	√√√
Costo	√√√	√√	√
Volumen final de la descarga	√	√√	√√√

√√√ bueno √√ regular √ malo

La calificación que le hemos otorgado a cada técnica, está en función de la aplicación que se les va a dar, en nuestro caso el enfriamiento de gases de descarga provenientes de un incinerador. En otro tipo de aplicación, los criterios de decisión y su respectiva calificación sería diferente.

Control de material particulado

Se ha determinado que el incinerador de desechos hospitalarios generará partículas en forma de cenizas voladoras, principalmente

del tipo PM_{10} , aunque no se descarta la emisión de partículas mucho mas grandes. Adicionalmente, anticipamos en este punto del trabajo que el método de enfriamiento a utilizarse implica el humedecimiento del gas, por lo cual la técnica con la cual se lleve a cabo la remoción de partículas, deberá permitir manejar el gas en tales condiciones.

Las principales técnicas aplicables a la remoción de partículas son: separación mecánica, lavado, precipitación electrostática y filtración.

La separación mecánica que comúnmente es llevada a cabo en ciclones, no es adecuada cuando se quiere remover partículas muy finas, pues la eficiencia de colección desciende rápidamente a medida que las partículas se hacen más pequeñas. En nuestro caso, el tamaño de partícula conduciría a obtener un diseño con una alta caída de presión y con una eficiencia de colección baja para los rangos más pequeños; sin embargo, no se puede descartar esta opción, debido a las grandes ventajas que presenta un ciclón frente a las demás alternativas.

La principal desventaja que presenta un lavador de gases, es la generación de líquido contaminado, pero tratándose de una descarga gaseosa relativamente pequeña como la que se genera en el incinerador, podemos prever que la cantidad de líquido requerido no es muy alta y por lo tanto no constituye un problema. Además, esta técnica es la única que permite obtener enfriamiento adicional

de los gases, el cual sería beneficioso para nuestros propósitos. La eficiencia de remoción al utilizar esta técnica puede ser lo suficientemente alta para el control de partículas finas, aunque ésta dependerá del diseño.

Por otro lado, la utilización de precipitadores electrostáticos en la remoción de partículas finas es una de las técnicas más eficientes y permite el manejo de gases húmedos, por lo cual se puede considerar esta técnica como una de las más adecuadas para su aplicación en nuestro sistema, sin embargo se debe tomar en cuenta las desventajas que presenta su utilización, principalmente en lo que se refiere a costos y espacio.

Finalmente, podemos señalar que debido a que el gas a tratarse presenta un alto contenido de humedad, la utilización de la filtración como medio de remoción no es conveniente, pues el filtro se obstruiría con una masa húmeda para la cual no está diseñado.

A continuación mostramos los principales parámetros que se consideran para comparar una técnica respecto a otra; adicionalmente se asigna una calificación a cada uno de ellos según su implementación resulte conveniente o no en nuestro sistema.

TABLA 17
COMPARACIÓN ENTRE LAS OPCIONES
PARA EL CONTROL DE PARTÍCULAS

	Separación mecánica	Lavado	Precipitación electrostática	Filtración
Eficiencia de remoción	√	√√	√√√	√√√
Operación con gas húmedo	√√√	√√√	√√√	√
Costo inicial	√√√	√√	√	√
Espacio requerido	√√	√√	√	√√
Enfriamiento del gas	√	√√√	√	√
Costo de operación y mantenimiento	√√√	√	√√	√

√√√ bueno √√ regular √ malo

Control de gases contaminantes

Aunque el incinerador de desechos hospitalarios va a generar una amplia gama de sustancias en estado gaseoso, solo algunas de ellas constan en los límites permisibles de emisión, por lo que se limita el análisis a tales sustancias.

La emisión de compuestos como monóxido de carbono, dioxinas y furanos depende en gran parte de las buenas condiciones de combustión del incinerador, por ello éstas últimas son la mejor alternativa de control; sin embargo la técnica a emplearse en la remoción de gases, así como también en la remoción de partículas, deberá contribuir hasta donde sea posible en el control de tales sustancias.

Así mismo, el control de sustancias metálicas, está relacionado con el control de material particulado, pues se espera que la reducción en la temperatura de los gases promueva la condensación de vapores metálicos, principalmente sobre las partículas finas.

De esta forma deducimos que las principales sustancias de nuestro interés son solamente el Dióxido de Azufre y el Cloruro de Hidrógeno, por lo cual el análisis se reduce al control de estas dos sustancias, con la condición de que se contribuya en parte a la remoción de las otras sustancias mencionadas.

Las técnicas aplicables al control de gases y vapores son: condensación, adsorción, absorción, procesos de oxidación térmica, procesos de reducción térmica, desulfurización en gases de descarga, procesos biológicos y oxidación ultravioleta en ozono.

Antes de analizar la aplicabilidad de estas técnicas a nuestra situación particular, debemos descartar algunas opciones. Los

procesos de oxidación térmica, biológicos y de oxidación ultravioleta en ozono, son técnicas aplicadas principalmente en la destrucción o control de compuestos orgánicos volátiles (VOC's), por lo cual descartamos su uso como solución a nuestro problema.

El método de condensación, resulta adecuado cuando se quiere remover un vapor que se encuentra en condiciones tales que un cambio pequeño en la temperatura y/o presión de su entorno provocaría su cambio de fase; este no es el caso del SO_2 ni del HCl, por lo cual se descarta su utilización como medio de remoción.

Los procesos de reducción térmica y desulfurización están dirigidos exclusivamente al control de NO_x y SO_2 respectivamente. Estas técnicas sí son aplicables a nuestra situación, aunque con desventajas en cuanto al tipo de contaminante que se puede remover. En primer lugar, las emisiones de NO_x están por debajo del límite permisible, por lo cual no se requiere el control de esta sustancia y se desecha esta opción. Por otro lado, el uso de la desulfurización resultaría conveniente desde el punto de vista de la baja concentración de SO_2 , sin embargo éste no es el único compuesto que se desea remover, por lo cual sería necesario determinar si otras sustancias pueden ser removidas también.

Una de las técnicas mas empleadas en la remoción de gases es la absorción , que a diferencia de la desulfurización, emplea

comúnmente una torre con relleno, la misma que provee el área suficiente para el buen contacto y difusión de las sustancias contaminantes hacia el líquido absorbente, razón por la cual se puede esperar que su utilización contribuya a la remoción de toda sustancia que tenga la capacidad de difundirse en el líquido empleado, inclusive las partículas más pequeñas.

TABLA 18
COMPARACIÓN ENTRE LAS OPCIONES PARA LA REMOCIÓN
DE CONTAMINANTES GASEOSOS

	Absorción	Adsorción	Desulfurización de gases
Remoción simultánea de diferentes gases	√√√	√√√	√√
Costo inicial	√	√	√
Manejo de gases con partículas	√√√	√	√√√
Costo de operación y mantenimiento	√√	√	√√
Generación de contaminantes secundarios	√	√	√
Retención de partículas	√√√	√√√	√√

√√√ bueno √√ regular √ malo

Por último, la adsorción es un método que aunque puede manejar gases, su funcionamiento se ve complicado ante la posible presencia de partículas en la corriente gaseosa. Además de esto, su implementación está mas bien dirigida a la recuperación de compuestos valiosos que se encuentran en bajas concentraciones en un gas; esto determina que no sería una buena opción para remover el tipo de gases de nuestro interés.

La tabla 18 muestra las opciones que hemos considerado aplicables a la remoción de los contaminantes gaseosos en conjunto con los criterios que se utilizan para su comparación

2.3 Planteamiento de la solución

El análisis del problema indica que el mejor método para el enfriamiento de gases es el intercambio de calor. Sin embargo debido a que se requiere una considerable reducción de temperatura (desde 600 °C hasta menos de 100 °C), el área requerida para la transferencia de calor resultaría muy grande, por lo cual vemos conveniente utilizar una combinación con el método de inyección de agua, el cual también es un método adecuado.

Debido a que se necesita recalentar los gases una vez que estos han sido depurados en el sistema, consideramos que la energía para llevar a cabo esta operación debe ser tomada de los mismos

gases calientes. Esto se puede lograr utilizando un intercambiador de calor que opere con el gas fluyendo tanto en el lado frío como el caliente del aparato, de manera que el gas contaminado a alta temperatura transfiera la energía necesaria al gas depurado, para devolverle parte de su temperatura original.

Por ello concluimos que el enfriamiento del gas se realizará en dos fases; la primera en un intercambiador de calor y la segunda en una cámara destinada al contacto directo con agua, a la cual llamaremos cámara de enfriamiento.

Ésta última, en virtud de su alta eficiencia para el enfriamiento de gases, permitirá terminar de reducir su temperatura todavía alta, por lo cual la función principal del intercambiador de calor será la de recalentamiento, mas no la de enfriamiento.

Una vez que la descarga gaseosa ha sido enfriada, esta será dirigida al equipo destinado a la remoción de contaminantes. Por razones técnicas, el gas deberá pasar primero por el colector de partículas y luego por el depurador de gases.

Del análisis del problema, se puede determinar que el método de remoción de partículas más adecuado para su implementación en este trabajo es el lavado de gases. Los dispositivos por medio de los cuales se lleva a cabo este método reciben el nombre de lavadores de aire y se clasifican de acuerdo a la energía requerida

para mover el flujo a través de ellos, de manera que se tienen los de baja, media y alta energía. A su vez, la eficiencia de remoción es función del consumo de energía, por lo que para partículas finas, el más adecuado es el lavador de alta energía.

Por ello seleccionamos un lavador de aire tipo Venturi para la remoción de partículas; éste es el nombre con el que se conoce a un lavador de alta energía, pues básicamente es un ducto convergente-divergente en el cual se inyecta un líquido que captará las partículas. En cuanto al método para la remoción de gases, es necesario señalar que aunque se consideró la desulfurización de gases de descarga como una opción, ésta es en realidad un proceso de absorción aumentado por reacción química, de ahí la similitud que existe en los beneficios que se pueden obtener entre la desulfurización y la absorción.

El método que vamos a seleccionar para la remoción de los contaminantes gaseosos generados por el incinerador, será la absorción. Esta operación puede llevarse a cabo en una simple torre tipo spray, sin embargo las dimensiones de un equipo de este tipo serían muy grandes debido al escaso contacto entre los fluidos. Por ello, de entre los diferentes dispositivos destinados a la absorción, seleccionamos una torre de absorción con relleno, la cual constituye el equipo más adecuado para este tipo de aplicación, no

solo porque el relleno proveerá mayor área de contacto para la transferencia de masa, sino también porque las dimensiones resultantes serán menores que para cualquier otro tipo de dispositivo que opere como absorbedor.

Finalmente, la solución planteada al problema de remoción de contaminantes del aire, consta de los siguientes componentes

Para el enfriamiento y recalentamiento del gas:

Intercambiador de calor seguido de una cámara de enfriamiento por inyección de agua

Para el control de partículas:

Lavador de aire tipo Venturi

Para el control de gases:

Torre de absorción con relleno

El funcionamiento del sistema de remoción de contaminantes del aire (partículas y gases contaminantes) puede expresarse por medio del siguiente esquema

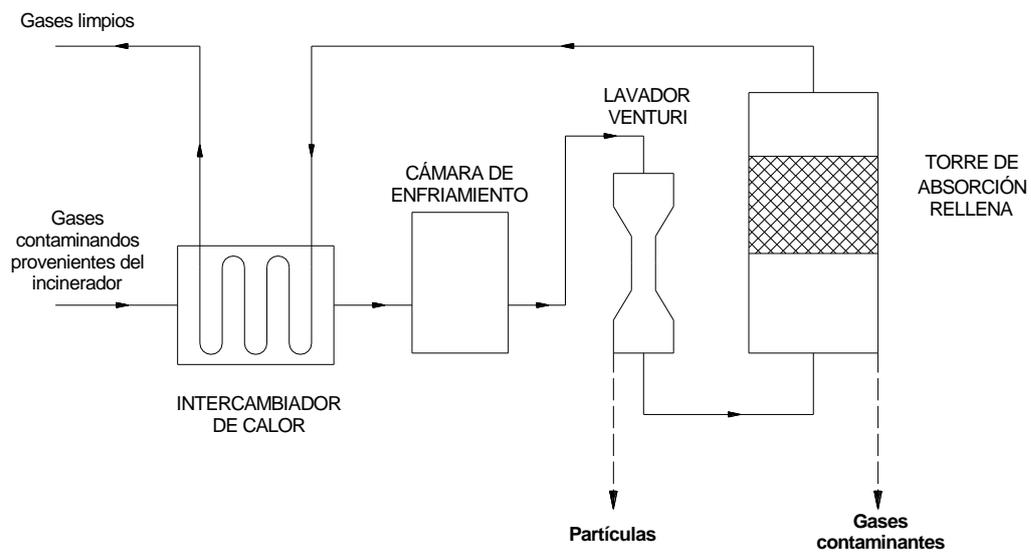


Figura 2.1 Esquema de la solución planteada