

CEER E-075

CONFERENCIA
DESARROLLO INDUSTRIAL Y PROTECCION DEL AMBIENTE
TECNOLOGIA PARA EL CONTROL DE EMISIONES
Y SU ACEPTABILIDAD

POR

DR. JUAN A. BONNET



CENTER FOR ENERGY AND ENVIRONMENT RESEARCH
UNIVERSITY OF PUERTO RICO — U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

DESARROLLO INDUSTRIAL Y PROTECCION AMBIENTAL

TECNOLOGIA PARA EL CONTROL DE EMISIONES

Y SU ACEPTABILIDAD

Dr. Juan A. Bonnet, Jr.

DESARROLLO INDUSTRIAL Y PROTECCION AMBIENTAL:
TECNOLOGIA PARA EL CONTROL DE EMISIONES Y SU ACEPTABILIDAD

BOSQUEJO

- I. Introducción
 - II. Contaminantes
 - III. Reglamentación
 - 1. Estandares nacionales de calidad atmosférica
 - 2. Prevención de deterioro significativo
 - 3. Estandares operacionales de fuentes nuevas
 - IV. Fundamentos generales de la teoría de control de emisiones de contaminantes
 - V. Descripción de equipo de control de emisiones de contaminantes.
 - A. Contaminantes en forma de particulado
 - 1. ciclones
 - 2. torres de lavado
 - 3. filtros
 - 4. precipitadores electroestáticos
 - B. Contaminantes gaseosos y/o vapores
 - 1. Quemadores
 - 2. Adsorción
 - 3. Absorción
 - VI. Centrales generatrices de carbón
 - A. Técnicas de control de emisiones de azufre
 - 1. Utilizar carbón de bajo contenido de azufre
 - 2. Limpiar el carbón
 - 3. Combustión en lechos fluidizados
 - 4. Desulfurización de los gases de salida
 - VII. Conclusión
- Referencias
Tablas (5)
Gráficas de dibujos (22)

PRESENTACION

DESARROLLO INDUSTRIAL Y PROTECCION AMBIENTAL: TECNOLOGIA PARA EL CONTROL DE EMISIONES Y SU ACEPTABILIDAD

Por

Dr. Juan A. Bonnet, Jr., Director
Centro para Estudios Energéticos y Ambientales
Universidad de Puerto Rico

julio, 1980

I. Introducción

Es el propósito de esta presentación analizar los procesos fundamentales que se utilizan para el control de emisiones contaminantes de procesos industriales. Al discutir los procesos de control es necesario que entendamos su importancia. Es ampliamente reconocido y aceptado que si va a continuar el desarrollo industrial y a la vez mantener la salud de nuestros conciudadanos y un aire y agua limpia, tenemos que hacer ciertas concesiones y llegar a balances adecuados. O sea, es un requisito innegable mantener un mundo limpio, pero también es necesario alcanzar el desarrollo industrial que provea trabajos y economías a un país. La manera de poder lograr ambos objetivos es llevar a cabo el desarrollo industrial tomando como una de las condiciones primarias la protección ambiental. Para poder asegurar esa protección ambiental es necesario modificar los procesos industriales o insta-

lar equipo de control para disminuir las emisiones de los contaminantes. Por eso la discusión en el día de hoy sobre los diferentes equipos de control de emisión de particulados y los principios básicos que rigen la operación de éstos es de suma importancia. Esperamos que al terminar esta presentación ustedes se hayan familiarizado con las diferentes técnicas y estrategias que se pueden utilizar para controlar las acciones de los contaminantes de los procesos industriales. También conocerán los procesos fundamentales y equipos que se utilizan en cada caso en particular. Incluiremos en esta discusión la aceptabilidad, adaptabilidad, ventajas y limitaciones de cada uno de estos equipos.

II. Contaminantes

Para poder determinar qué equipo de control de emisiones de contaminantes hay que utilizar en cada caso en particular hay que comenzar con la raíz del problema. La raíz del problema es identificar las fuentes de emisiones de contaminantes. O sea, es necesario llevar a cabo una evaluación del proceso industrial para determinar los desperdicios tanto gaseosos, líquidos como sólidos que se generan en el

proceso. Al llevar a cabo esta evaluación, es necesario identificar cada contaminante, la razón de la emisión y las variaciones en su concentración tanto en operación normal como en operaciones anómalas o en casos de emergencias. Es importantísimo llevar a cabo esta evaluación lo más detalladamente posible y cubrir todos los diferentes ciclos y operación del proceso. Solamente de esta manera se puede determinar y diseñar cuáles son los tipos de control más propicios para cada caso en particular. Es esencial conocer las leyes y reglamentaciones que aplican en cada caso. O sea, si las emisiones de los contaminantes exceden los límites permisibles establecidos por las leyes y reglamentos es necesario hacer ajustes en los procesos operacionales, cambiar el proceso, o instalar equipos de control. En muchos casos es necesario tomar medidas para minimizar el problema a corto plazo en lo que se implementan soluciones más permanentes a largo plazo.

Veamos ahora cuales son las reglamentaciones establecidas con las cuales hay que cumplir.

III. Reglamentaciones

En los casos de control de emisiones gaseosas, es necesario cumplir con:

Los estándares nacionales de calidad atmosférica;
Las leyes de prevención de deterioro significativo; y
Los estándares operaciones de fuentes nuevas.

1. Los estándares nacionales de calidad atmosférica

Estos estándares son promulgados por la ley de aire limpio según enmendada en 1970. Se han establecido estándares para bióxido de azufre, monóxido de nitrógeno y para particulado. Estos estándares se han establecido para concentraciones primarias donde envuelven la salud directa de los seres humanos y de concentraciones secundarias donde se envuelve el bienestar del público en general. En la Tabla 1 se presentan las concentraciones aceptables para concentraciones primarias y secundarias en los casos de (a) promedios anuales máximos; (b) concentraciones en 24 horas y (c) concentración máxima en un período de tres horas en un año dado. Los planes de los diferentes estados para implementar las normas de calidad de aire hacen necesario cumplir con estos estándares primarios.

2. La prevención de deterioro significativo.

Esta política se conoce también como la política de la burbuja, y básicamente dispone que alrededor de una

planta o complejo industrial la compañía o institución a cargo debe operar ésta de la manera más eficiente posible para controlar las emisiones de la planta a unos totales aceptables. Así, los estándares nacionales de calidad de aire quedan cumplidos. En adición, se pueden hacer cambios entre las cantidades que se emiten de uno de los procesos o industrias en esa misma región siempre y cuando estos cambios sean de contaminantes similares y no se violen las emisiones totales aceptables.

Bajo esta política no se puede relajar o disminuir el control de los contaminantes que son peligrosos cambiándolos por contaminantes que son menos peligrosos desde el punto de vista tóxico. Básicamente esta reglamentación ofrece flexibilidad a las industrias para determinar cuales contaminantes en particular se desean controlar o remover en sus procesos siempre y cuando no se aumente la contaminación total de emisiones a través de esa burbuja imaginaria que se establece alrededor del complejo industrial.

3. Los estándares operacionales de fuentes nuevas.

Bajo el acta de aire limpio, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos también estableció unos estándares de emisión de fuentes nuevas. Estos

estandares se conocen por sus siglas en inglés como NSPS: The New Source Performance Standards". La Tabla 2 nos resume estos estandares. Como ejemplo, en el caso del bióxido de azufre, las emisiones de una planta de carbón deben ser menores de 1.2 libras por millón de BTU. BTU significa "British Thermal Unit". Pero en adición a esta condición se requiere que los procesos de remoción de contaminantes que se instalen en una operación remuevan por lo menos un 85% de las emisiones del bióxido de azufre si el combustible que se quema tiene un porcentaje de azufre de más de 3%. En caso que el combustible tenga un porcentaje de menos de 0.6% no se exigen estos estandares. En forma similar existen estandares para el caso de bióxido de nitrógeno y de particulado. El propósito de estos estandares es requerir que toda fuente nueva o industrias nuevas que se establezcan usen la mejor tecnología disponible de control y que se utilicen los métodos mejores de remover estos contaminantes antes de emitirlos al ambiente para obtener unos porcentajes de reducción de ciertos contaminantes específicos tales como el bióxido de azufre, el bióxido de nitrógeno o el particulado.

IV. Fundamentos generales de la teoría de control de emisiones de contaminantes. (referencias #1, 2 y 3)

Los métodos de control de emisiones de particulados se basan en procesos físicos o químicos. Entre los procesos físicos que se utilizan para remover contaminantes de un flujo de gases se encuentra el aplicar diferentes fuerzas a los componentes que se desean remover. Se puede aplicar fuerza gravitacional, centrífuga o electro-estáticas. Por ejemplo, si queremos remover unos contaminantes los cuales son unas partículas pesadas, instalamos una chimenea alta diseñada de tal manera que estas partículas no puedan salir por la chimenea debido a la fuerza de gravedad. Así, las partículas caen y se recogen abajo en la chimenea. O bien, se puede utilizar una centrífuga donde se pueden separar las partículas de diferente peso, ajustando el tamaño, velocidad y flujo a través de la centrífuga.

La fuerza electro-estática también se puede utilizar si cargamos eléctricamente partículas de un contaminante en particular al pasarlas a través de un aparato o equipo donde haya carga electro-estática. Estos contaminantes así cargados serán atraídos por los campos eléctricos alrededor de ciertas celdas o

electrodos donde quedan depositados y son recogidos más tarde.

La filtración es otro proceso que utiliza un medio físico para la separación. En la filtración se utilizan el impacto, la intersección y/o la difusión. Si una partícula es tan grande que no puede pasar a través de una red o maya, tiene un impacto con esa red y es interceptada. O si una partícula viene en una dirección dada y choca con una pared pierde su velocidad y cae. El caso de difusión incluye partículas pequeñas de menos de un micrón de tamaño, las cuales son tan pequeñas que no son afectadas por el movimiento de las moléculas que está ocurriendo en los gases donde ellas se difunden o mueven en una dirección dada. Este proceso no es tan usado como otros.

Otro medio físico que se utiliza en los equipos de control de procesos químicos o reacciones químicas es el siguiente:

Podemos convertir algunos contaminantes en estado gaseoso a su estado líquido o sólido donde es más fácil su remoción. A la inversa, utilizando procesos químicos podemos cambiar la característica de un contaminante dado y convertirlo en otro compuesto que es de más fácil remoción. Durante

la descripción de los diferentes equipos, discutiremos más en detalle los diferentes procesos físicos y químicos en que se fundamenta la operación de cada uno de éstos.

Entre los equipos que discutiremos están los ciclones, las torres de lavado, los filtros y los precipitadores electroestáticos. También hablaremos de los quemadores, calderas y procesos de absorción.

V. Descripción de equipo de control de emisiones de contaminantes.

Durante la presentación de estos equipos utilizaremos 22 gráficas de dibujos, los cuales simplifican la explicación de cada caso en particular.

A. Contaminantes en forma de particulados:

1. Ciclones - en los ciclones, el método de recoger el material contaminante particulado se basa en el principio de aceleración centrífuga de los gases. Debido a esta aceleración las partículas son tiradas en contra de las paredes del ciclón. La velocidad de los gases según éstos descienden a través del cuerpo cilíndrico hacia la sección cónica

del ciclón, va aumentando. Este aumento en velocidad causa un aumento en la fuerza centrífuga de tal manera que aun las partículas más pequeñas bajan sin velocidad al llegar a la zona de alta viscosidad que existe en las paredes del ciclón. En esta forma las partículas se van depositando sobre las paredes del ciclón y por la acción de la fuerza de la gravedad caen y se acumulan en el fondo donde se recogen. El movimiento en un ciclón se parece a un tornado.

Los ciclones tienen una eficiencia de remoción mayor para partículas mayores. El diámetro de corte se define como el diámetro en el cual el 50% de las partículas de ese tamaño son recojidas y el 50% no son recojidas. El diámetro de corte en los ciclones es de aproximadamente 10 micrones y su alcance cubre desde 5 a 15 micrones dependiendo del tipo, diámetro, largo, velocidad y materiales del ciclón. Los ciclones se pueden operar mojados o secos. En los ciclones mojados se añade agua a la entrada del ciclón, de esta manera el agua se dispersa como gotas sobre toda la

superficie de la unidad. Esto causa que algunas partículas se mojen y al depositarse en las paredes les sea más fácil para caer y recogerlas. Los ciclones se pueden operar en una serie de unidades en paralelo. Estas unidades pueden ser idénticas o de diferentes características. Los ciclones tienen la ventaja que no tienen partes movibles.

El principio de los ciclones se parece al principio de las cámaras de deposición. En las cámaras de deposición solamente se utiliza la fuerza de gravedad. O sea, una cámara de deposición es como una chimenea donde los gases entran en la parte de abajo y según estos suben las partículas de mayor peso, debido a la acción de la fuerza de gravedad van perdiendo velocidad, caen y se recojen en la parte de abajo de la chimenea. En la Tabla 3 se describen algunas características de estas cámaras de deposición y de los ciclones. En esta tabla podemos ver los tamaños óptimos de operación, las concentraciones, las limitaciones de temperatura y velocidad, la caída en presión y el porcentaje

de eficiencia que se espera en diferentes unidades. También esta tabla nos da una breve descripción de los contaminantes para los cuales se puede usar este equipo, en qué casos se pueden utilizar y algunas de sus limitaciones.

2. Torres de lavado (wet scrubber)- En las torres de lavado el método principal para recoger los particulados es un líquido que se introduce en la unidad y se convierte en gotas. Esta conversión del líquido en un aerosol provee una superficie grande para recoger los contaminantes solubles y los particulados que estén presentes en el gas. Es importante que las partículas en estos casos lleven una velocidad alta para aumentar la probabilidad de recogerlas. O sea, podemos visualizar estos equipos como unas duchas de líquidos que absorben las partículas y otros contaminantes solubles (hidroscópicos). Hay varias clases de las torres de lavado, incluyendo torres empacadas, torres de platos, torres de duchas, venturis y torres de flujos cruzados. El tamaño de las partículas que se pueden recoger con estos

equipos varía desde 1 a 20 micrones. Por supuesto los diseños tienen que variar. Por ejemplo, para las partículas más pequeñas de un micrón se necesitan equipos de alta velocidad como torres de lavado venturís. En estos casos la caída en presión a través del equipo puede ser del orden de 60 a 80 pulgadas. Es importante que estos equipos se diseñen de tal manera que se evite la salida de los líquidos o humedad cuando salgan los gases limpios. También tienen que haber buenos métodos para recoger los líquidos, extraer de éstos los contaminantes y disponer de los mismos. La Tabla 3 incluye una descripción de diferentes tipos de torres de lavado y da las características de estas unidades.

3. Filtros - los filtros consisten de estructuras porosas como fibras sintéticas o naturales en los cuales según el gas pasa se quedan por retención las partículas contaminantes. Se utilizan también filtros de otros materiales incluyendo de metales. La caída de presión a través de los filtros depende del flujo, los particulados, las características del filtro,

y la frecuencia y efectividad de los procesos de limpieza del filtro. Como ejemplo de los filtros tenemos los filtros que utilizamos en los aires acondicionados. En la Tabla 3 también se dan detalles sobre diferentes filtros industriales y en las láminas también podemos ver diferentes tipos de filtros. Entre los diferentes tipos de filtros tenemos los filtros tipo saco los cuales aparecen en algunas de las figuras presentadas.

4. Precipitadores electroestáticos - son unas unidades en las cuales se forman iones (partículas cargadas) en los gases por medio de descargas eléctricas de alta densidad. Al formarse estos iones, las partículas se cargan eléctricamente cuando pasan los gases. Cuando las partículas cargadas eléctricamente pasan a través de un campo electroestático, éste causa que las partículas migren a los electrodos. Al llegar estas partículas a los electrodos la carga de la partícula se neutraliza y la partícula se adhiere a los electrodos. Estas partículas se remueven de los electrodos y se recogen. De esta manera es importante

remover las partículas según llegan a los electrodos en una forma continua para evitar que el electrodo se tape con partículas y baje la eficiencia de recolección. En muchas ocasiones lo que se hace es que se vibra o se sacude el electrodo periodicamente para que caigan las partículas. En la Table 3 podemos apreciar las características de las unidades de precipitación electroestáticas.

B. Contaminantes gaseosos y/o vapores

1. Quemadores - una de las maneras de remover contaminantes gaseosos y/o vapores es por la combustión de éstos. Sencillemente los contaminantes se queman con el oxígeno del aire. Un ejemplo de esto lo vemos cuando pasamos por la cercanías de las refinerías donde hay una llama encendida continuamente. Allí en esa llama lo que se está haciendo es quemando algunos de los contaminantes para evitar que se escapen a la atmósfera. Se pueden utilizar tres tipos diferentes de combustión. Estos son las antorchas, los quemadores secundarios o los oxidadores catalíticos. La eficiencia de estos procesos depende del tiempo de resi-

dencia, la temperatura de combustión y la turbulencia. El caso de la llama (flairing) es una oxidación directa y descubierta con tiempo de residencia corto. Algunas de estas llamas se mantienen en combustión continuamente quemando los contaminantes. Otras veces las llamas requieren que se les supla combustible suplementario para mantener la combustión. Los quemadores secundarios (after burner) operan de 1,500 a 2,000°F. La cantidad necesaria de combustible suplementario es mínima debido al alto tiempo de residencia. Normalmente estos quemadores secundarios se instalan en unas cámaras refractorias donde ocurre la combustión.

La oxidación catalítica opera a temperaturas de alrededor de 1,200°F. La función del agente catalítico es aumentar la rapidez de oxidación a temperaturas bajas. En muchos casos el agente catalítico es platino o iridio. Hay que tener cuidado que estos agentes catalíticos no se envenenen (o sea se tornen inefectivos) debido a la acción descontaminante como son los compuestos clorinados. Estos procesos

de combustión son efectivos pero por otro lado hay que utilizar energía o quemar combustibles en algunos casos para mantenerlos. En la Tabla 3 se describen algunos de estos procesos.

2. Adsorción - Los procesos de adsorción ocurren entre un sólido y un gas donde los contaminantes se adsorben en la superficie o poros del sólido. Un ejemplo es el agente de adsorción carbón activado muy efectivo para el caso de hidrocarburos. También se puede considerar sílice o compuestos sintéticos como los zeolitos. El proceso de adsorción lo controlan dos fenómenos. El primero es la captura y el segundo envuelve la retención. La mayoría de los procesos de adsorción son exotérmicos o sea que generan calor. Si el proceso de adsorción es estrictamente físico es fácil regenerar el material sólido aplicándole calor a temperaturas moderadas. Si por el contrario envuelve procesos químicos se requiere calor y una atmósfera inerte u otras condiciones para la regeneración. La Tabla 3 nos da algunas características de las unidades de adsorción.

3. Absorción - El proceso de absorción es un proceso de difusión controlada entre una masa gaseosa y otra líquida. O sea, ocurre un proceso de transferencia o transportación de masa. La eficiencia de este proceso depende de la facilidad con la cual el agente contaminante se puede transferir del gas a la fase líquida. La absorción aumenta cuando existen razones de difusión alta, solubilidades altas, áreas de superficie grande y turbulencia.

La Tabla 3 nos describe algunas unidades de absorción. En este momento debemos mencionar que todas estas unidades o equipos de control que hemos descrito son diseñadas por diferentes fabricantes de diferentes maneras. La idea de presentarles a ustedes estas unidades, es describirles el proceso y algunas de las características generales. Esperamos que adquieran unos conocimientos básicos de cada uno de estos equipos de control.

Para continuar queremos ahora concentrar nuestra explicación en una industria en particular y utilizando ésta como ejemplo ver los diferentes procesos de control de emisiones de particulados y gaseosos que se utilizan en casos particulares. Vamos a hablar

específicamente de las centrales generatrices de carbón. Hemos escogido las centrales de carbón ya que son éstas una de las que más se están utilizando en los Estados Unidos para producir electricidad y en el nuevo plan de energía de esa nación se le está dando alta prioridad. En adición, en Puerto Rico se van a construir tres unidades para producir electricidad quemando carbón de aproximadamente 300,000 kilovatios eléctricos cada una.

VI. Centrales generatrices de carbón

Se ha estimado que anualmente se descarga contaminantes de óxido de azufre del orden de 65 millones de toneladas a la atmósfera. La gran mayoría de este azufre proviene de la combustión del carbón. El azufre en su mayoría se encuentra en la fórmula del bióxido de azufre (SO_2). También se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4) cuando el bióxido de azufre se mezcla con la humedad de la atmósfera. Esto se conoce como la lluvia ácida. Los límites de emisión de azufre están descritos en las tablas 1 y 2. La mayoría de este azufre proviene de las plantas que queman carbón. En los Estados Unidos el 70% del bióxido de azufre que

se emite a la atmósfera proviene de plantas generatrices de carbón. Se espera que se construyan aproximadamente 300 nuevas plantas generatrices de carbón en los próximos 10 años. Una unidad generatriz de 450,000kw_e quema aproximadamente de 3 a 5 toneladas de carbón por minuto. El valor calorífico del carbón es de 8,000 a 13,000 BTU/lb y las unidades generatrices tienen una proporción de calor (heat rate) de 10,000 BTU/kwhr.

Durante el 1965 se quemaron 405 millones de toneladas de carbón. En el 1995 se vaticina que se quemen de 800 a 1,300 millones de toneladas de carbón. Se espera que ésto cause que las emisiones de bióxido de azufre aumenten de 18.6 millones de toneladas en el año 1975 a 20.6 millones por tonelada en el 1995. Estas emisiones resultaran aun instalándose equipos de control para remover una gran cantidad del azufre que será emitido en la combustión del carbón.

Para controlar las emisiones de bióxido de azufre es necesario (1) utilizar combustible conteniendo bajo contenido de azufre, (2) remover el azufre del carbón antes del proceso de combustión, (3) remover el azufre durante la combustión, (4) remover el azufre después de la combustión, o sea, en los gases de salida de las calderas, ó (5) una combinación de cualquiera de estas técnicas.

Vamos a proceder ahora a discutir en detalle las técnicas de control viables al presente:

A. Técnicas de control de emisiones de azufre

1. Utilizar carbón de bajo contenido de azufre

De acuerdo a la reglamentación existente, podemos notar de la Tabla 2 que si se quema un combustible menor de 0.6% de azufre es posible operar las calderas de carbón sin tener que instalar equipo de control. La Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico ha anunciado públicamente que sus planes son utilizar este combustible de bajo contenido de azufre. De poder conseguir este combustible continuamente no es necesario de acuerdo a la reglamentación ambiental instalar equipo de control de emisiones.

2. Limpiar el carbón

Existen métodos físicos y químicos para limpiar el carbón antes de la combustión. Los métodos físicos se fundamentan en utilizar las diferencias en el peso específico o en ciertas propiedades de la superficie. Es posible remover de un 20% a un 80% del azufre libre en el carbón. Los métodos químicos

incluyen procesos más complicados como son el proceso de la TRW-Meyers y otros. El azufre libre es azufre inórganico. El azufre en forma orgánico en el carbón no puede ser removido del carbón por medio físico. Los métodos de limpiar el carbón antes de la combustión están limitados en la cantidad de azufre total que se puede remover.

3. Combustión en lechos fluidizados (flue bed combustion)

Quemar el carbón en lechos fluidizados de, (fluidized bed), piedra caliza, (limestone), o dolomita para formar sulfato de calcio seco a temperatura de 1,450 a 1,650°F es un método eficiente de remover el azufre. Esta combustión se lleva a cabo en una vasija cerrada que tiene unos platos porosos donde se mantiene el carbón pulverizado y el absorbente (piedra caliza o dolomita). Se fuerza aire a través del plato lo que fluidiza el lecho de carbón y el absorbente. Según el carbón se quema el bióxido de azufre es absorbido por la reacción con la piedra caliza. Se suple carbón y absorbente continuamente al

lecho y se va removiendo continuamente el absorbente y las cenizas. Hay dos tipos de estos procesos. Uno es la combustión atmosférica en lecho fluidizado y la otra es combustión a presión en lecho fluidizado. El primero opera a presiones cerca de la presión atmosférica y el segundo opera a presiones de 6 a 16 mayor que la presión atmosférica. Al presente hay una unidad de 30 mil kilovatios eléctricos operando en Riversville, West Virginia que usa el proceso de lecho de combustión fluidizado a presión atmosférica. La Compañía Tennessee Valley Authority ha diseñado una de estas unidades de demostración de un tamaño de 200,000 kilovatios. El proceso a presión atmosférica está más avanzado que el proceso a presiones altas. Con este proceso se consiguen eficiencias de remoción del bióxido de azufre del orden de 80% a 90%.

4. Desulfurización de los gases de salidas (flue gas desulfurization)

Este proceso es el más común hoy en día. Se fundamenta en remover el bióxido de azufre de los gases de salidas de las calderas por

medio de una reacción química con un absorbente diluido en agua o en disolver el bióxido de azufre en una torre de absorción (scrubber). Por esta razón estos procesos en algunos casos se conocen como torres de lavado de las chimeneas. Estos procesos se han venido utilizando en la Gran Bretaña desde el 1930. Hay varios sistemas. La eficiencia de remoción del bióxido de azufre de estos procesos es del orden de 90% pero se espera que puedan exceder en un futuro cercano el 95%. Para el 1978 existían 29 unidades en operación y 51 otras unidades se estaban diseñando o construyendo. Más de 25 millones de kilovatios eléctricos de capacidad de estas unidades están ya instalados o en construcción.

Se pueden clasificar estos sistemas en dos tipos generales: no regenerativos o regenerativos. En el primero se dispone del material de azufre a través de procesos de absorción o como un lodo o producto de deshecho. En el segundo método el material de azufre se puede recobrar como azufre elemental o ácido sulfúrico o bióxido de azufre líquido y venderse.

En adición el agente usado para recobrar el azufre se regenera y se vuelve a utilizar.

El 90% de los sistemas en operación hoy en día o en construcción son del tipo no regenerativos. Como ejemplo una unidad generatriz que quema 962,000 toneladas de carbón por año con 2.7% de azufre contiene 26,000 toneladas de azufre. Al remover cada tonelada de azufre se producen 9 toneladas de lodo. Por lo tanto, en una central generatriz de 450,000 kW_e se producen aproximadamente 234,000 toneladas al año de lodo. Para acomodar este lodo hace falta cada año, un espacio de 30 pies de altura en un área de superficie de 4.8 acres. Por lo tanto, es importante buscar métodos alternos de disposición o utilización de estos lodos.

De los procesos no regenerativos, los dos más importantes son:

- (1) las torres de lavado utilizando piedra caliza (limestone) o cal (lime). Ambos de estos sistemas están disponibles comercialmente.

Las reacciones en cada caso son las siguientes:

VII. Conclusión

En conclusión debemos reconocer que para continuar el desarrollo industrial de un país en armonía con la protección ambiental es necesario diseñar los procesos industriales de tal manera que se minimizan las descargas al ambiente de agentes contaminantes. Para tales fines es importante incluir en todo desarrollo industrial la tecnología y equipo necesario para el control de sus emisiones contaminantes. Estos equipos tienen que ser de tal manera que su funcionamiento sea confiable y aceptable para así poderse cumplir en todo momento con las reglamentaciones ambientales existentes.

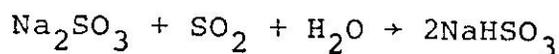
Hemos descrito en este trabajo los procesos que gobiernan la operación de los equipos de control de emisiones de contaminantes incluyendo su aplicabilidad, aceptación y limitaciones en cada caso. Esperamos que teniendo unos conocimientos generales de estos equipos y su función sea más fácil entender la relación estrecha que tiene que existir entre la industria y el ambiente.

Muchas gracias

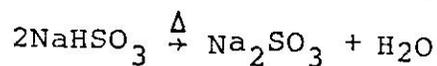
atmósfera de calcio y se recobra



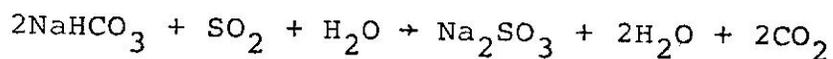
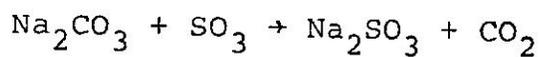
(b) Wellman Lord



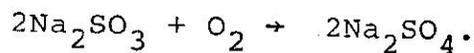
Se añade calor para regenerar:



(c) Ceniza de soda (Soda Ash)



Se regenera oxidando:



La Tabla 4 nos detalla el estado actual de cada uno de estos procesos desde el punto de vista de su desarrollo investigativo a escala de demostración comercial. La tabla 5 nos describe las ventajas y desventajas, viabilidad económica y productos de deshecho que se producen en cada uno de estos procesos.

Para controlar las emisiones de partículas de las centrales generatrices de carbón se utilizan los equipos mencionados anteriormente como son los precipitadores electroestáticos, filtros, torres de lavado o ciclones.

REFERENCIAS

Para

LECTURAS SUPLEMENTARIAS

1. Industrial Air Pollution Handbook - Editor: Albert Parker 1978 - McGraw Hill Book Company. (Chapter 7 to 10).
2. Air Pollution Control Equipment for Particulate Matter by Howard Dey et. al. - 1975 - California Environmental Protection Commission.
3. Control Equipment for Gases and Vapors by Howard F. Dey et. al. - 1975 - California Environmental Protection Commission.
4. Energy / Environment III - EPA Decision Series. October 1978 (Chapter 5).
5. Energy / Environment IV - EPA Decision Series. Oct. 1979 (Chapter 5).
6. Sulfur Emission: Control Technology & Waste Management- EPA Decision Series. May 1979.
7. Control of Industrial Air Pollution by Robert M. Bethea 1977 Pollution Engineering Year Book.

TABLA 1

Estandares nacionales de la calidad de aire, SO₂

	Primario	Secundario
Promedio anual	80 µg/m ³ (0.03 ppm)	--
Concentración máxima en 24 horas*	365 µg/m ³ (0.14 ppm)	--
Concentración máxima en 3 horas*		1,300 µg/m ³ (0.5 ppm)

* No puede excederse más de una vez al año.

Referencia número 04

TABLA 1

Estandares nacionales de la calidad de aire, SO₂

	Primario	Secundario
Promedio anual	80 µg/m ³ (0.03 ppm)	--
Concentración máxima en 24 horas*	365 µg/m ³ (0.14 ppm)	--
Concentración máxima en 3 horas*		1,300 µg/m ³ (0.5 ppm)

* No puede excederse más de una vez al año.

Referencia número 04

Continuación Tabla 1

Estandares de calidad de aire para particulados

	Primario	Secundario
Promedio Anual	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Concentración máxima en 24 horas	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Estandares operacionales para nuevas fuentes para
particulados

Actual	0.1 lb/10 ⁶ BTU
Nuevo	0.03 lb/10 ⁶ BTU

TABLA 2

Estandares de emisiones de bióxido de azufre de calderas de carbón

Situación	Por ciento de reducción del azufre	Limités de emisión lb SO ₂ /10 ⁶ BTU
Calderas existentes	----	0.2.8.0
NSPS actual para calderas de vapor	----	1.2
NSPS revisado para calderas generatrices de carbón	85 (+) . (‡)	1.2 max. 0.2 ó 0.5 pisos

(+) = Reducción mínima de 85% en promedio de 24 horas

(‡) = Se aceptará reducción de sólo 75% y exención del 1.2 lb SO₂/10⁶ BTU en un total de no más de 3 días por mes.

NSPS = Estandares operacionales de fuentes nuevas.

Referencia número 05.

TABLE 3

Methods and equipment for air pollution control

Name of Device		Description	Air Contaminants	Optimum Size Particles-- Micron	Optimum Concentration g/cu ft	Temperature Limitations F	Utility Requirements HP, Water, KW, BTU	Face Velocity		
General	Specific Type							FPM	Location	
Industrial Filters	Cloth bag	Bags made of synthetic or natural fiber fabrics	Dust, Fumes, Smoke, Mist	> 0.3	> 0.1	0-180-500		1-30	Fabric	
	Cloth envelope	Envelopes made of natural or synthetic fibers, fabrics over screen cages		> 0.3	> 0.1	0-180-500		1-30	Fabric	
Electrostatic Precipitators (High Voltage)	Single stage (plate)	Ionizing (-) wires between parallel collecting (+) plates	Dust, Fumes, Smoke, Mist	> 0.3	> 0.1	0-850		180-600	Plates	
	Single stage (pipe)	Ionizing (-) wires inside concentric collecting (-) pipes		> 0.3	> 0.1	0-1200		0.2-0.8kw/1000 cfm	180-600	Pipes
Dry Inertial Collectors	Settling chamber	Straight chamber expansion (without baffles)	Dust, Fumes, Smoke, Mist	> 50	> 5	0-700		60-600	Chamber	
	Baffle chamber	Straight chamber expansion (with baffles)		> 30	> 5	0-700		1000-2000	Inlet	
	Skimming chamber	Scroll shaped chamber w/peripheral slots		< 20	> 1	0-700		2000-4000	Inlet	
	Cyclone	Chamber with spiral flow		> 10	> 1	0-700		2000-4000	Inlet	
	Multiple-cyclone	Small cyclones in parallel		> 5	> 1	0-700		2000-4000	Inlet	
	Impingement	Alternate stages of baffles and nozzles		> 10	> 1	0-700		3000-6000	Nozzles	
Scrubbers	Dynamic		Dust, Fumes, Smoke, Mist	> 10	> 1	0-700		1/2hp/1000 cfm	2000-4000	Inlet
	Cyclone	Cyclone collector same as dry inertial type with coarse sprays		> 10	> 1	40-700		2-10 gpm/1000 cfm	1800-3000	Inlet
	Impingement	Impingement collector w/wetted baffles		> 2-10	> 1	40-700		3-5 gpm/1000 cfm 2-4 hp/1000 cfm	4000-6000	Nozzles
	Submerged	Dynamic collector w/coarse sprays		> 1	> 1	40-700		1 gpm/1000 cfm	2000-4000	Inlet
	Fog	Cyclone collector w/fine tangential sprays		< 2	> 0.1	40-700		3-5 gpm/1000 cfm 350 psig sprays	3000-4000	Inlet
	Pebble bed	Tower w/counter-currently wetted coarse pecking		> 5	> 0.1	40-700		3-5 gpm/1000 cfm	500-1000	Bed
	Multi-dynamic	Power driven normal and reverse flow fan stages w/coarse sprays		< 0.5	> 0.1	40-700		10-30 gpm/1000 cfm 10-20 hp/1000 cfm	2000-3000	Inlet
	Venturi	Venturi w/coarse sprays at throat		< 2	> 0.1	40-700		3-5 gpm/1000 cfm	12000-24000	Throat
	Crossflow	Packed bed; liquid and gas flows at 90°		> 3	> 0.1	40-250			1800-3000	Bed
	Jet	Water activated jet pump		> 2	> 0.1	40-700		50-100gpm/1000 cfm	2000-3000	Inlet
Afterburners	Direct	Combustion chamber with supplemental fuel firing	Gases, Vapors, Malodors	Any	Combustible Only	2000		1.1 Btu/cfm ΔT	500-1000	Chamber
	Catalytic	Combustion chamber with catalyst with supplemental fuel firing		Any	Combustible Only	1500		500-1000	Chamber	
Gas Absorbers	Spray tower	Vertical up flow chamber with downward sprays	Gases, Vapors, Malodors	Molecular	> 0.001	40-100		2-10 gpm/1000 cfm	120 (superficial)	
	Packed tower	Tower with counter-currently wetted Raschig rings, bert saddles, etc. packing		Molecular	> 0.001	40-100		3-6 gpm/1000 cfm	60 (superficial)	
	Fiber cell	One or more stages of cocurrently wetted fiber cells		Molecular	> 0.001	40-100		5-15 gpm/1000 cfm	200 (superficial)	
Gas Adsorbers	Deep bed (1-3 ft)	Activated charcoal bed in regenerative recovery equipment	Gases, Vapors, Malodors	Molecular	> 0.001	125			30-100	Bed
	Shallow bed (1/4-1 in.)	Activated charcoal beds in cells or cartridges		Molecular	< 0.001	125			80-120	Bed

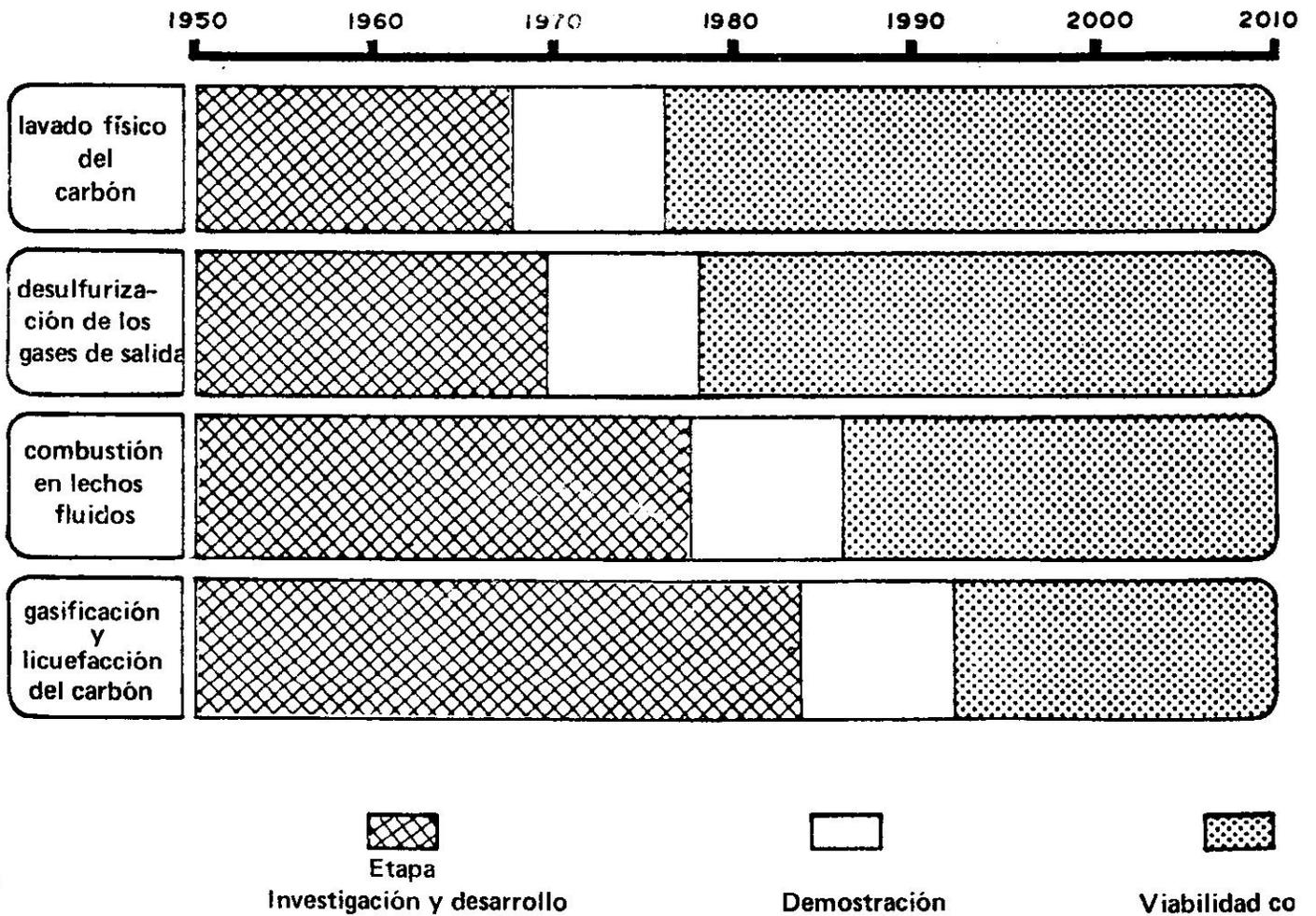
Referencia número 07.

Continuación tabla 3

General	Name of Device	Air Resistance WG (inches)	Efficiency % by Weight	Space	Description of Collected Pollutant	Application	Limitations																																																																																																																																				
Industrial Filters	Cloth bag	> 4	> 99	Large reverse type pulse type moderate Large	Discharged into hoppers when dislodged from bags	Dry collection possible Decrease of performance is noticeable Collection of small particles possible High efficiencies possible	Sensitivity to filtering velocity High-temperature gases must be cooled to 200F to 550F Affected by relative humidity (condensation) Susceptibility of fabric to chemical attack																																																																																																																																				
	Cloth envelope	> 4	> 99		Discharged into hopper when dislodged from fabric face			Electrostatic Precipitators (High Voltage)	Single stage (plate)	< 1	> 99	Large	Dry dust on plates—dislodged into hopper	99+ percent efficiency obtainable Very small particles can be collected Particles may be collected wet or dry Pressure drops and power requirements are small compared to other high-efficiency collectors Maintenance is nominal unless corrosive or adhesive materials are handled Few moving parts	Relatively high initial cost Precipitators are sensitive to variable dust loadings or flow rates Resistivity causes some material to be economically uncollectible Precautions are required to safeguard personnel from high voltage Collection efficiencies can deteriorate gradually and imperceptibly	Single stage (pipe)	< 1	> 99	Large	Dry dust on pipe—dislodged into hopper	Dry Inertial Collectors	Settling chamber	< 0.1	< 50	Large	Dry dust or liquid into hopper	Low pressure loss, simplicity of design and maintenance Simplicity of design and maintenance	Much space required Low collection efficiency Much head room required Low collection efficiency of small particles Sensitive to variable dust loadings and flow rates	Baffle chamber	< 0.5	< 50	Large	Dry dust or liquid into hopper	Skimming chamber	< 1.0	< 70	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Little floor space required Dry continuous disposal of collected dusts	Low to moderate pressure loss Handles large particles Handles high dust loadings Temperature independent	Cyclone	< 2.0	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Dry dust or liquid into hopper Dry dust or liquid into hopper	Multiple cyclone impingement	4.6 4.6	> 90 > 80	Moderate Small	Dry dust or liquid into hopper	Dynamic	-B developed	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Scrubbers	Cyclone	1.5-3	< 90	Large	Slurry sludge with water	Simultaneous gas absorption and particle removal Ability to cool and clean high-temperature, moisture-laden gases Corrosive gases and mists can be recovered and neutralized Reduced dust explosion risk Efficiency can be varied	Corrosion, erosion problems Added cost of wastewater treatment and reclamation Low efficiency on submicron particles Contamination of effluent stream by liquid entrainment Freezing problems in cold weather Reduction in buoyancy and plume rise Water vapor contributes to visible plume under some atmospheric conditions	Impingement	2/stage	< 95	Large	Slurry sludge with water	Submerged	3-6	< 95	Small	Slurry sludge with water	Gas and particulate removal	Fog	> 2.0	< 99	Moderate	Slurry sludge with water	Pebble bed	> 4.0	< 90	Large	Slurry sludge with water	Multi-dynamic	2-4	< 99	Small	Slurry sludge with water	Venturi	> 10	< 99	Small	Slurry sludge with water	Crossflow Jet	-B developed	< 95 < 90	Small Small	Slurry sludge with water Slurry sludge with water	Afterburners	Direct	< 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	High removal efficiency of submicron odor-causing particulate matter Simultaneous disposal of combustible gaseous and particulate matter Direct disposal of nontoxic gases and wastes to the atmosphere after combustion Possible heat recovery Relatively small space requirement Low maintenance	High operational cost Fire hazard Removes only combustibles Catalysts subject to poisoning Catalysts require reactivation	Catalytic	> 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	Gas Absorbers	Spray tower	< 1	< 95	Large	Solution in water	Solution in water	Packed tower	1.5-4 in. WG/ft of packing	> 98	Compact	Solution in water	Fiber cell	< 4	< 95	Moderate	Solution in water	Gas Adsorbers	Deep bed (1-3 ft)	2-10	100	Large	Absorbed on charcoal	Solvent recovery	Shallow bed (1/4-4 in.)	0.5-2
Electrostatic Precipitators (High Voltage)	Single stage (plate)	< 1	> 99	Large	Dry dust on plates—dislodged into hopper	99+ percent efficiency obtainable Very small particles can be collected Particles may be collected wet or dry Pressure drops and power requirements are small compared to other high-efficiency collectors Maintenance is nominal unless corrosive or adhesive materials are handled Few moving parts	Relatively high initial cost Precipitators are sensitive to variable dust loadings or flow rates Resistivity causes some material to be economically uncollectible Precautions are required to safeguard personnel from high voltage Collection efficiencies can deteriorate gradually and imperceptibly																																																																																																																																				
	Single stage (pipe)	< 1	> 99	Large	Dry dust on pipe—dislodged into hopper			Dry Inertial Collectors	Settling chamber	< 0.1	< 50	Large	Dry dust or liquid into hopper	Low pressure loss, simplicity of design and maintenance Simplicity of design and maintenance	Much space required Low collection efficiency Much head room required Low collection efficiency of small particles Sensitive to variable dust loadings and flow rates	Baffle chamber	< 0.5	< 50	Large	Dry dust or liquid into hopper		Skimming chamber	< 1.0	< 70	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Little floor space required Dry continuous disposal of collected dusts	Low to moderate pressure loss Handles large particles Handles high dust loadings Temperature independent	Cyclone	< 2.0	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Dry dust or liquid into hopper Dry dust or liquid into hopper	Multiple cyclone impingement	4.6 4.6	> 90 > 80	Moderate Small	Dry dust or liquid into hopper		Dynamic	-B developed	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Scrubbers	Cyclone	1.5-3	< 90	Large	Slurry sludge with water	Simultaneous gas absorption and particle removal Ability to cool and clean high-temperature, moisture-laden gases Corrosive gases and mists can be recovered and neutralized Reduced dust explosion risk Efficiency can be varied	Corrosion, erosion problems Added cost of wastewater treatment and reclamation Low efficiency on submicron particles Contamination of effluent stream by liquid entrainment Freezing problems in cold weather Reduction in buoyancy and plume rise Water vapor contributes to visible plume under some atmospheric conditions	Impingement	2/stage	< 95		Large	Slurry sludge with water	Submerged	3-6	< 95	Small	Slurry sludge with water	Gas and particulate removal	Fog	> 2.0	< 99	Moderate	Slurry sludge with water	Pebble bed	> 4.0	< 90	Large		Slurry sludge with water	Multi-dynamic	2-4	< 99	Small	Slurry sludge with water	Venturi	> 10	< 99	Small	Slurry sludge with water	Crossflow Jet	-B developed	< 95 < 90	Small Small	Slurry sludge with water Slurry sludge with water	Afterburners	Direct	< 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	High removal efficiency of submicron odor-causing particulate matter Simultaneous disposal of combustible gaseous and particulate matter Direct disposal of nontoxic gases and wastes to the atmosphere after combustion Possible heat recovery Relatively small space requirement Low maintenance	High operational cost Fire hazard Removes only combustibles Catalysts subject to poisoning Catalysts require reactivation	Catalytic	> 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	Gas Absorbers	Spray tower	< 1	< 95	Large	Solution in water	Solution in water	Packed tower	1.5-4 in. WG/ft of packing		> 98	Compact	Solution in water	Fiber cell	< 4		< 95	Moderate	Solution in water	Gas Adsorbers	Deep bed (1-3 ft)	2-10	100	Large	Absorbed on charcoal	Solvent recovery	Shallow bed (1/4-4 in.)	0.5-2	95	Small	Discharged w/charcoal	Removal of toxic/odorous organics			
Dry Inertial Collectors	Settling chamber	< 0.1	< 50	Large	Dry dust or liquid into hopper	Low pressure loss, simplicity of design and maintenance Simplicity of design and maintenance	Much space required Low collection efficiency Much head room required Low collection efficiency of small particles Sensitive to variable dust loadings and flow rates																																																																																																																																				
	Baffle chamber	< 0.5	< 50	Large	Dry dust or liquid into hopper				Skimming chamber	< 1.0	< 70	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Little floor space required Dry continuous disposal of collected dusts	Low to moderate pressure loss Handles large particles Handles high dust loadings Temperature independent	Cyclone	< 2.0	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper		Dry dust or liquid into hopper Dry dust or liquid into hopper	Multiple cyclone impingement	4.6 4.6	> 90 > 80	Moderate Small	Dry dust or liquid into hopper		Dynamic	-B developed	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Scrubbers	Cyclone	1.5-3	< 90	Large	Slurry sludge with water	Simultaneous gas absorption and particle removal Ability to cool and clean high-temperature, moisture-laden gases Corrosive gases and mists can be recovered and neutralized Reduced dust explosion risk Efficiency can be varied	Corrosion, erosion problems Added cost of wastewater treatment and reclamation Low efficiency on submicron particles Contamination of effluent stream by liquid entrainment Freezing problems in cold weather Reduction in buoyancy and plume rise Water vapor contributes to visible plume under some atmospheric conditions	Impingement	2/stage	< 95	Large		Slurry sludge with water	Submerged	3-6	< 95	Small	Slurry sludge with water	Gas and particulate removal	Fog	> 2.0	< 99		Moderate	Slurry sludge with water	Pebble bed	> 4.0	< 90	Large	Slurry sludge with water		Multi-dynamic	2-4	< 99	Small	Slurry sludge with water	Venturi	> 10	< 99	Small	Slurry sludge with water	Crossflow Jet	-B developed	< 95 < 90	Small Small	Slurry sludge with water Slurry sludge with water	Afterburners	Direct	< 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	High removal efficiency of submicron odor-causing particulate matter Simultaneous disposal of combustible gaseous and particulate matter Direct disposal of nontoxic gases and wastes to the atmosphere after combustion Possible heat recovery Relatively small space requirement Low maintenance	High operational cost Fire hazard Removes only combustibles Catalysts subject to poisoning Catalysts require reactivation	Catalytic	> 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	Gas Absorbers	Spray tower	< 1	< 95	Large	Solution in water	Solution in water	Packed tower	1.5-4 in. WG/ft of packing	> 98	Compact		Solution in water	Fiber cell	< 4	< 95	Moderate		Solution in water	Gas Adsorbers	Deep bed (1-3 ft)	2-10	100	Large	Absorbed on charcoal	Solvent recovery	Shallow bed (1/4-4 in.)	0.5-2	95	Small	Discharged w/charcoal	Removal of toxic/odorous organics														
	Skimming chamber	< 1.0	< 70	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Little floor space required Dry continuous disposal of collected dusts	Low to moderate pressure loss Handles large particles Handles high dust loadings Temperature independent																																																																																																																																				
	Cyclone	< 2.0	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Dry dust or liquid into hopper Dry dust or liquid into hopper																																																																																																																																					
	Multiple cyclone impingement	4.6 4.6	> 90 > 80	Moderate Small	Dry dust or liquid into hopper			Dynamic	-B developed	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper	Scrubbers	Cyclone	1.5-3	< 90	Large	Slurry sludge with water	Simultaneous gas absorption and particle removal Ability to cool and clean high-temperature, moisture-laden gases Corrosive gases and mists can be recovered and neutralized Reduced dust explosion risk Efficiency can be varied	Corrosion, erosion problems Added cost of wastewater treatment and reclamation Low efficiency on submicron particles Contamination of effluent stream by liquid entrainment Freezing problems in cold weather Reduction in buoyancy and plume rise Water vapor contributes to visible plume under some atmospheric conditions	Impingement	2/stage	< 95	Large	Slurry sludge with water	Submerged	3-6	< 95	Small	Slurry sludge with water	Gas and particulate removal	Fog	> 2.0		< 99	Moderate	Slurry sludge with water	Pebble bed	> 4.0	< 90	Large	Slurry sludge with water	Multi-dynamic	2-4	< 99		Small	Slurry sludge with water	Venturi	> 10	< 99	Small	Slurry sludge with water	Crossflow Jet	-B developed	< 95 < 90	Small Small	Slurry sludge with water Slurry sludge with water	Afterburners	Direct	< 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	High removal efficiency of submicron odor-causing particulate matter Simultaneous disposal of combustible gaseous and particulate matter Direct disposal of nontoxic gases and wastes to the atmosphere after combustion Possible heat recovery Relatively small space requirement Low maintenance	High operational cost Fire hazard Removes only combustibles Catalysts subject to poisoning Catalysts require reactivation	Catalytic	> 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	Gas Absorbers	Spray tower	< 1	< 95	Large	Solution in water	Solution in water	Packed tower	1.5-4 in. WG/ft of packing	> 98	Compact	Solution in water	Fiber cell	< 4	< 95	Moderate	Solution in water	Gas Adsorbers	Deep bed (1-3 ft)	2-10	100	Large	Absorbed on charcoal	Solvent recovery	Shallow bed (1/4-4 in.)	0.5-2	95	Small	Discharged w/charcoal	Removal of toxic/odorous organics																																						
Dynamic	-B developed	< 80	Moderate	Dry dust or liquid into hopper																																																																																																																																							
Scrubbers	Cyclone	1.5-3	< 90	Large	Slurry sludge with water	Simultaneous gas absorption and particle removal Ability to cool and clean high-temperature, moisture-laden gases Corrosive gases and mists can be recovered and neutralized Reduced dust explosion risk Efficiency can be varied	Corrosion, erosion problems Added cost of wastewater treatment and reclamation Low efficiency on submicron particles Contamination of effluent stream by liquid entrainment Freezing problems in cold weather Reduction in buoyancy and plume rise Water vapor contributes to visible plume under some atmospheric conditions																																																																																																																																				
	Impingement	2/stage	< 95	Large	Slurry sludge with water																																																																																																																																						
	Submerged	3-6	< 95	Small	Slurry sludge with water	Gas and particulate removal																																																																																																																																					
	Fog	> 2.0	< 99	Moderate	Slurry sludge with water																																																																																																																																						
	Pebble bed	> 4.0	< 90	Large	Slurry sludge with water																																																																																																																																						
	Multi-dynamic	2-4	< 99	Small	Slurry sludge with water																																																																																																																																						
	Venturi	> 10	< 99	Small	Slurry sludge with water																																																																																																																																						
Crossflow Jet	-B developed	< 95 < 90	Small Small	Slurry sludge with water Slurry sludge with water																																																																																																																																							
Afterburners	Direct	< 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack	High removal efficiency of submicron odor-causing particulate matter Simultaneous disposal of combustible gaseous and particulate matter Direct disposal of nontoxic gases and wastes to the atmosphere after combustion Possible heat recovery Relatively small space requirement Low maintenance	High operational cost Fire hazard Removes only combustibles Catalysts subject to poisoning Catalysts require reactivation																																																																																																																																				
	Catalytic	> 1	< 95	Moderate	Innocuous flue gas out stack																																																																																																																																						
Gas Absorbers	Spray tower	< 1	< 95	Large	Solution in water	Solution in water																																																																																																																																					
	Packed tower	1.5-4 in. WG/ft of packing	> 98	Compact	Solution in water																																																																																																																																						
	Fiber cell	< 4	< 95	Moderate	Solution in water																																																																																																																																						
Gas Adsorbers	Deep bed (1-3 ft)	2-10	100	Large	Absorbed on charcoal	Solvent recovery																																																																																																																																					
	Shallow bed (1/4-4 in.)	0.5-2	95	Small	Discharged w/charcoal	Removal of toxic/odorous organics																																																																																																																																					

* 2 (extended surface packings)
20-30 (filamentous packings)

TABLA 4
ESTADO ACTUAL Y PROYECTADO DE
LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE CONTROL DE EMISIONES DE AZUFRE



Referencia Número 6