

130
Res.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

EXAMEN DE PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

**ADAPTACION DE UN LAVADOR DE GASES
DE FLUJO CRUZADO A FLUJO MIXTO**

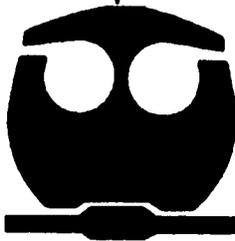
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

NICOLAS RUIZ FUENTES



MEXICO, D.F.

1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

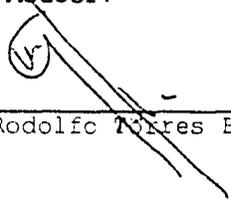
Jurado asignado:

Presidente: Prof. Caritino Moreno Padilla.
Vocal: Prof. Sergio Trejo Martinez.
Secretario: Prof. Rodolfo Torres Barrera.
1er. suplente: Prof. Genovevo Silva Pichardo.
2do. suplente: Prof. Victor M. Luna Pabello.

Sitio donde se desarrolló el tema:

Facultad de Química, UNAM.
Servicios Profesionales en Control de Contaminantes,
S.A. de C.V.

Asesor:


I.Q. Rodolfo Torres B.

Sustentante:


Nicolás Ruiz Fuentes

**ADAPTACION DE UN LAVADOR DE GASES
DE FLUJO CRUZADO A FLUJO MIXTO**

Agradecimientos

A mis Padres:

Nicolás Ruiz López y
Albina Fuentes Delgado
(qepd), por el amor y
cariño, que siempre me
han tenido.

A mis hermanos :

Gerardo, Cecilia,
Josefina, Teresa,
Piedad, Maribel,
Rocio. Gracias a
todos, por brindarme
un mejor futuro los
quiere Nicolás.

Con mucho cariño a mi
esposa, Graciela.

A la humanidad entera,
por el legado de sus
conocimientos.

Al pueblo de México,
por brindarme la
oportunidad.

INDICE

	Pag.
Agradecimientos	iii
Indice	iv
Introducción	v
Capítulo 1. Generalidades	1
Origen de la partículas sólidas	3
Efectos de los contaminantes	6
Efectos en el hombre	8
Efectos en los animales	13
Efectos en la vegetación	14
Efectos en los materiales	16
Capítulo 2. Principios de la reducción de contaminantes	18
De las propiedades del gas portador	19
De las propiedades del contaminante	25
De los equipos y técnicas de control	29
De los mecanismos de colección	39
Capítulo 3. El lavador de gases	44
Principios del funcionamiento	44
Descripción del equipo	45
Capítulo 4. Dinámica de las partículas	58
La fuerza total en una partícula	65
Velocidad terminal de caída	66
Efectos de los alrededores	75
Efectos del movimiento del fluido	76
Movimiento de burbujas y gotas	76
Movimiento acelerado de una partícula en el campo gravitacional	78
Movimiento de una esfera en la región de la Ley de Stokes	85
Capítulo 5. Eficiencia de captura	90
Expresiones de la efectividad de colección	90
Eficiencia de captura simple	95
Captura por impacto inercial	96
Captura por intercepción directa	98
Eficiencia de captura en grupos.....	99

Capítulo 6. Modelado	103
Parámetros de diseño	104
Flujo a Contra-Corriente	107
Flujo Cruzado	108
Flujo Paralelo	109
La relación L/G	109
Requerimientos de energía	110
Capítulo 7. Dimensionamiento	114
Conclusiones	131

INTRODUCCIÓN

La recolección de polvo se ocupa de la separación o la reunión de dispersoides o coloides de sólidos en los gases, para los siguientes fines: (a) control de la contaminación del aire, (b) reducción del mantenimiento de equipos, (c) eliminación de riesgos contra la salud, (d) mejoramiento de la calidad del producto, (e) recuperación de un producto valioso y, (f) recolección de productos en forma de polvo.

El problema de la contaminación del aire no se puede solucionar exclusivamente por el uso de la tecnología. Es una zona en la que la ingeniería y los conocimientos científicos pueden ayudar a lograr soluciones satisfactorias sólo si la primera se quita el velo de las emociones y de la política.

Para muchos, química y contaminación tienen la misma significación, hasta el extremo de que al químico se le considera el responsable directo de la contaminación. Sin embargo, los problemas de la contaminación del aire pertenecen a varias disciplinas, pues atañen a campos tan

distintos como el de la sociología, la física, el derecho, la botánica y; por supuesto, la química entre otras.

Es indudable que saber de donde procede el problema es el primer paso para solucionarlo, pero más importante es el hecho de que el hombre común asume que la industria es la principal culpable. Sin embargo, es cierto y se puede probar con estadísticas que los desperdicios de la fábricas contribuyen actualmente sólo en un 20% a nuestra contaminación total del aire. Sabemos que el motor de combustión interna que se utiliza en los automóviles, autobuses, camiones, y otras formas de transporte aportan el 60% de toda la contaminación del aire en el mundo actual. El otro 10% o más es producido por las centrales termoeléctricas en la generación de servicios; finalmente tenemos la aportación de las casas habitación, hoteles, restaurantes, etc. que utilizan los diferentes servicios en la cocción de alimentos, generación de calefacción, calentamiento de agua, etc. no obstante; el hombre promedio ignora estas estadísticas y en general sigue aceptando que la industria es la culpable y que, puesto que ella ha generado la contaminación, debe pagar el precio.

Pero **¿Qué es la contaminación del aire?**, en un sentido es la adición a nuestra atmósfera de cualquier material que

tenga un efecto perjudicial en los seres vivos de nuestro planeta. Este material puede ser un hidrocarburo tóxico gaseoso que tenga un efecto perdurable en el organismo que lo inhale, o quizá una partícula irritante que pudiera ocasionar problemas semejantes. Pueden ser radiaciones atómicas, invisibles pero dañinas para las células animales o vegetales. Un contaminante es algo que al ser introducido en la atmósfera, a propósito o por alguna acción de la naturaleza, reduce el contenido de oxígeno (O_2) o cambia en forma significativa la composición del aire.

El aire limpio de campo puede contener monóxido de carbono, metano, amoníaco, óxidos de nitrógeno y ozono. Estos gases que normalmente se consideran contaminantes tiene su origen en procesos naturales, en pequeñas cantidades. También se pueden encontrar partículas en forma de gotitas de agua, polen, cenizas volcánicas e insectos. Los olores desagradables provienen de la putrefacción. El hombre ha logrado la capacidad de generar éstas sustancias y otras semejantes en cantidades masivas que ha menudo exceden a la capacidad de disipación de los procesos naturales y al hacerlo ha creado zonas en las que la atmósfera resulta molesta y posiblemente tóxica o destructora. Tiene la responsabilidad consigo mismo y con el resto de los habitantes del planeta, de aplicar a la limpieza del aire la

misma tecnología que creó el problema. Es una operación muy complicada puesto que exige diferentes pasos para identificar a cada contaminante, definir las concentraciones "seguras", medir las emisiones de los procesos industriales, vigilar las atmósferas del ambiente urbano y controlar las fuentes de emisión para que se mantengan concentraciones seguras en las zonas circundantes.

Con este trabajo se pretende, más que detallar las ecuaciones de diseño de un Lavador de Gases de Flujo Cruzado, hacer conciencia sobre la importancia del problema de la contaminación ambiental. Ya que día a día consciente o inconscientemente todos los habitantes del planeta contribuimos en mayor o menor grado a su deterioro.

En el capítulo uno se presenta el origen y la clasificación de las partículas sólidas, analizándose las repercusiones que tienen en la salud humana, las plantas y los animales; así como en los edificios y estructuras. En el capítulo dos, se hace un estudio de los diferentes mecanismos de colección de partículas que tienen lugar en los lavadores de gases por vía húmeda haciéndose incapie en el mecanismo de impacto inercial por ser éste el preponderante en la eficiencia total de captura. Se analiza también el efecto que tienen las propiedades físicas,

químicas y de transporte, tanto del gas portador como del contaminante, en el diseño y operación del equipo. Finalmente se hace un repaso de los equipos y técnicas de control utilizados actualmente, su rango de aplicabilidad, sus ventajas y desventajas; tanto para la recolección de contaminantes particulados como gaseosos.

En el capítulo tres, se da una descripción detallada del Lavador de Gases de Flujo Mixto. El capítulo seis está dedicado al modelado del sistema, se presentan las consideraciones echas y finalmente se expresa un algoritmo de cálculo.

En el capítulo siete se hace un cálculo manual aplicando el modelo obtenido, así como el análisis de los resultados.

CAPÍTULO 1
GENERALIDADES

La recolección de polvo se ocupa de la separación o la reunión de dispersoides o coloides de sólidos en los gases, para los siguientes fines:

- 1.- *Control de la contaminación del aire*, como sucede en la separación de cenizas muy finas suspendidas en los gases de combustión de una planta generadora de energía.

- 2.- *Reducción del mantenimiento de equipo*; como en la filtración del aire de entrada de un motor o el tratamiento del gas de hornos para piritas, antes de su entrada a una planta de ácido sulfúrico de contacto.

- 3.- *Eliminación de riesgos contra la seguridad o la salud*; como en la recolección de polvos silíceos y metálicos, en las cercanías de equipos de

trituration y perforación y en algunas operaciones metalúrgicas, y polvos de harina que se desprenden al efectuarse operaciones de molienda o embolsado.

4.- *Mejoramiento de la calidad del producto;* como en la limpieza o la purificación del aire en la producción de artículos farmacéuticos y películas fotográficas.

5.- *Recuperación de un producto valioso;* como en la recolección de polvos de secadores y fundidoras.

6.- *Recolección de productos en forma de polvo;* como en el transporte neumático; la desecación por rocío de la leche, jabón, y la elaboración de óxido de zinc y negro de humo de alta pureza.

La eliminación de los contaminantes de las descargas gaseosas se complica a menudo porque, en general, la concentración de estos es baja en un gran exceso de gases diluyentes inertes. Esto significa que debemos encontrar procesos que eliminen el contaminante a éstas bajas concentraciones o lo concentren en otra fase.

Origen de las partículas sólidas

Las partículas sólidas tiene su origen tanto en los procesos naturales como en las actividades del hombre, de ahí que se clasifiquen en naturales y creadas por el hombre (artificiales).

Los polvos naturales pueden dividirse en varias categorías:

- Polvos cósmicos, conteniendo hidrógeno, potasio y sodio y, polvos meteóricos.
- Polvos inorgánicos de origen terrenal, por ejemplo *polvos geológicos*, originados por actividades volcánicas, desastres naturales como son las tormentas de arena, la erosión de las rocas, etc.
- Polvos orgánicos o biológicos, tales como el polen de las flores, al plancton marino, las esporas de hongos, las semillas de las plantas o los virus.

Los polvos creados por el hombre caen en dos tipos principalmente:

- Polvos que se generan como subproductos, por ejemplo, los generados por abrasión en el procesado o maquinado de varios metales o durante su uso, aquellos debidos a la combustión y sublimación de productos principalmente hollín y cenizas; así como el contenido en los gases de desecho industrial.
- Polvos que son producidos deliberadamente y que tienden a escaparse hacia la atmósfera durante la producción y manejo principalmente de materiales granulados, tales como cemento, yeso, cal, fertilizantes, carbón, etc.

La atmósfera de nuestro planeta siempre ha contenido polvo, sin embargo; éste solo ha venido a ser un problema en épocas recientes debido al incremento de la producción industrial y especialmente de la generación de calor y energía (potencia), así como del transporte, actividades de construcción, etc. La concentración de polvos "artificiales" en la mayor parte de áreas residenciales e industriales, hoy en día, exceden grandemente a la emisión de polvos naturales y a menudo representan grave peligro para la salud.

Las principales fuentes industriales de polvos pueden clasificarse en el siguiente orden decreciente de importancia:

- Procesos de combustión, principalmente para la generación de servicios (vapor y potencia), plantas incineradoras de basura, calderas industriales, así como facilidades de calentamiento local.
- Construcción de edificios y materiales similares, incluyendo las operaciones asociadas a la extracción de canteras, esto aplica a las industrias del cemento, yeso y cal. En este ramo se incluyen también la construcción de carreteras, materiales de aislamiento y refractarios, así como el procesado de materiales por la industria cerámica, del vidrio y la porcelana.
- Industria metalúrgica, incluyendo la producción de metales ferrosos y no-ferrosos, aleaciones y fundidoras.
- Industria química, se contemplan la de productos orgánicos, inorgánicos y del petróleo, por ejemplo, la producción de ácido sulfúrico, carburo de calcio,

refrescos, negro de humo, fertilizantes, pigmentos, combustibles, etc.

- La minería o extracción de menas, y subsecuente procesado de los materiales.
- Transporte y otras actividades derivadas de la industria, particularmente las industrias metalúrgicas, textiles, del papel, alimentos, farmacéuticas e industrias de la madera.

Efectos de los contaminantes

En la sección anterior vimos los diferentes agentes contaminantes que pueden encontrarse en la atmósfera, ahora nos ocuparemos de los efectos que éstos tienen sobre los seres vivos (flora y fauna), así como en los materiales.

A excepción de algunos contaminantes, la mayoría de ellos tienen poco efecto, cuando actúan por sí solos, sobre los seres vivos y los materiales; sin embargo, la existencia de factores naturales inevitables los hacen prácticamente letales, tales factores son: *el movimiento del aire, la temperatura del ambiente, la intensidad de la luz solar y las mezclas de contaminantes* [Jorgensen, 1989].

El medio de transporte de los contaminantes atmosféricos es el aire, éste los desplaza mediante mecanismos de convección (transporte por arrastre del viento) y difusión (transporte debido a gradientes de concentración), sin embargo, no es el único factor, se ha demostrado que la acción conjunta de varios contaminantes acentúa dramáticamente sus efectos, por ejemplo, las partículas de carbón y el bióxido de azufre en forma aislada prácticamente no afectan a los materiales; pero en una atmósfera mezclada, las partículas de carbón concentran el dióxido de carbono por sorción, incrementándose así la actividad de éste en el punto de contacto.

La influencia más obvia de la temperatura está en la velocidad de reacción química, por ejemplo, la probabilidad de daño aumenta en objetos expuestos a una inversión de temperatura, puesto que pierden calor rápidamente y se enfrían a temperaturas menores a la ambiente. Si la temperatura de la superficie metálica es menor al punto de rocío del contaminante, la superficie se vuelve húmeda y en presencia de contaminantes corrosivos (cuya concentración esta incrementada bajo la influencia de la inversión de temperatura), se acelera el rápido deterioro de los materiales. La luz solar, mientras tanto, puede causar deterioro de ciertos materiales por medio de agentes tales

El medio de transporte de los contaminantes atmosféricos es el aire, éste los desplaza mediante mecanismos de convección (transporte por arrastre del viento) y difusión (transporte debido a gradientes de concentración), sin embargo, no es el único factor, se ha demostrado que la acción conjunta de varios contaminantes acentúa dramáticamente sus efectos, por ejemplo, las partículas de carbón y el bióxido de azufre en forma aislada prácticamente no afectan a los materiales; pero en una atmósfera mezclada, las partículas de carbón concentran el dióxido de carbono por sorción, incrementándose así la actividad de éste en el punto de contacto.

La influencia más obvia de la temperatura está en la velocidad de reacción química, por ejemplo, la probabilidad de daño aumenta en objetos expuestos a una inversión de temperatura, puesto que pierden calor rápidamente y se enfrían a temperaturas menores a la ambiente. Si la temperatura de la superficie metálica es menor al punto de rocío del contaminante, la superficie se vuelve húmeda y en presencia de contaminantes corrosivos (cuya concentración esta incrementada bajo la influencia de la inversión de temperatura), se acelera el rápido deterioro de los materiales. La luz solar, mientras tanto, puede causar deterioro de ciertos materiales por medio de agentes tales

como el ozono que provocan una serie de reacciones fotoquímicas complejas en la atmósfera.

Los efectos de la contaminación del aire pueden clasificarse en cuatro tipos:

En el hombre.
En los animales.
En la vegetación.
En los materiales.

Efectos en el hombre.

La salud del hombre puede afectarse indirectamente por ingestión de alimentos contaminados o directamente por inspiración de gases y partículas a través del sistema respiratorio. Estudios realizados muestran que todas las relaciones entre aire contaminado y enfermedades se concentran en dos órganos humanos: los ojos y el sistema respiratorio que son los sistemas más afectados por la contaminación del aire.

Las sustancias que causan la irritación de los ojos no han sido completamente definidas, sin embargo, algunos materiales particulados combinados con ozono, óxidos de

nitrógeno, hidrocarburos aromáticos y contaminantes sintéticos pueden causar dicha irritación.

La función básica del sistema respiratorio es inhalar aire hacia los pulmones, filtrar las impurezas del aire inspirado, administrar el oxígeno contenido y exhalar bióxido de carbono removido del sistema circulatorio. Cuando las partículas reaccionan con el tejido pulmonar, tres tipos de daños son causados : bronquitis (es una irritación e inflamación de los bronquios que reducen el flujo de aire a los pulmones), enfisema (es la destrucción del alveolo que reduce el intercambio de oxígeno y bióxido de carbono en la sangre) y, cancer pulmonar (que es una destrucción del tejido pulmonar).

Estos efectos son provocados por agentes alergésicos, comunes en las grandes ciudades por el uso masivo de insecticidas, pinturas, barnices y cosméticos así como por el polen de las flores y bacterias de los animales caseros.

La tabla siguiente muestra una pequeña lista de los alergésicos considerados comunes en el aire, y su principal fuente de emisión.

Tabla 1. Alergéricos comunes.

Alergésico	Fuentes de emisión
Pólen	Polinización de las plantas por el viento
Hongo	Normalmente saprofitico, prevalece dependiendo de la humedad del aire.
Hicetas	Piumas de pollos, patos, cabellos de gatos, perros, caballos, ovejas, etc. Laboratorios de animales y humanos.
Pólvos caseros	Esta compuesto por todos aquellos encontrados alrededor de una casa.
Vegetales y fibras	Algodón, lino, cañamo, yute, paja, frijol, centeno, trigo, etc.
Cosméticos	Lociones, talcos, perfumes y acondicionadores de cabello, etc.
Insecticidas, pinturas, barnices y pegamentos.	Insecticidas conteniendo pyrethrum, acetato de linano y solventes orgánicos.

La tabla 2, señala los contaminantes atmosféricos de las grandes ciudades y zonas industriales, indicándose las principales fuentes de emisión y los efectos que éstos tienen sobre la salud.

Tabla 2. Efecto de los contaminantes en el hombre.

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos sobre la salud
Aldehidos	Incineración de desechos, combustión de hidrocarburos, reacciones fotoquímicas.	Irritación de los ojos, piel y aparato respiratorio.
Amoníaco	Industrias químicas, hornos, refinarias, incineradores de combustibles.	Dañó a los ojos y al tracto respiratorio.
Arsénico	Fabricas de aleaciones, minas, locales en contaminación.	Fibrosis pulmonar, calcificación pleural y cáncer pulmonar.
Atóxico	Fundidoras de metal, pesticidas y herbicidas orgánicos.	Inhalado, ingerido o absorbido por la piel causa dermatitis, bronquitis moderada e irritación nasal; es un agente cancerígeno.

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos sobre la salud
Bario	Industrias mineras, producción y refinación de Bario y productos químicos basados en Bario.	Afecta a los músculos del corazón, el tracto gastro intestinal, el tracto respiratorio y el sistema nervioso central.
Berilio	Uso industrial. Producción de lámparas fluorescentes.	Daño pulmonar y a la piel.
Boro	Industrias productoras de Boro, aditivos de hidrocarburos del petróleo.	Tóxico por ingestión e inhalación, sus polvos causan irritación e inflamación. El hidruro de boro causa daños al sistema nervioso central y la muerte.
Cadmio	Industrias metálicas dedicadas a la extracción, refinación, maquinado, electroplatinado y soldado con materiales de cadmio.	Veneno crónico. La inhalación de humos y vapores, daña los riñones, provoca enfisema, bronquitis, cáncer y desórdenes gástricos.
Cloro	Procesos industriales que usan cloro. Derrame accidental durante su almacenamiento y transporte.	Irrita los ojos, nariz y garganta. Dosis prolongadas dañan los pulmones produciendo edema, neumonitis, enfisema y bronquitis.
Cromo	Industrias químicas metalúrgicas. Productos que emplean compuestos de cromo y asbestos.	Corrosivo y tóxico a los tejidos del cuerpo. Agente cancerígeno. Desarrolla dermatitis y úlceras en la piel.
Etileno	Emisión de vehículos automotores. Industrias químicas. Incineración de desechos orgánicos.	Irritación de los ojos, como resultado de reacciones fotoquímicas con óxidos de nitrógeno y ozono.
Acido Clorhídrico	Subproductos de la cloración de compuestos orgánicos. Quemado de productos plásticos, de cartón y de papel.	Tos y sofocamiento por inhalación, inflamación y ulceración del tracto respiratorio superior. Quemadura de la mucosa.
Acido Sulfúrico	Plantas de tratamiento de aguas residuales, Refinerías, plantas de papel, molinos de papel.	Dolor de cabeza, conjuntivitis, sensibilidad, dolor de ojos. Altas concentraciones bloquean la transferencia de oxígeno.
Picno	Emisión de automotores que usan gasolina con plomo. Bombarderos. Partículas en aerosol de plomo.	Se acumula por el tracto gastrointestinal y respiratorio, se deposita en las membranas de la nariz, garganta y pulmones.

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos sobre la salud
Manganeso	Hornos productores de compuestos ferromanganesicos. Incineración de productos de manganeso.	Envenenamiento del sistema nervioso central, es absorbido por inhalación o a través de la piel.
Mercurio	Refinado de mercurio. Usos en laboratorios y en pesticidas que lo contienen.	La inhalación de los vapores causa intoxicación y envenenamiento protoplásmico.
Níquel	Plantas metalúrgicas que usan níquel. Combustibles con aditivos de níquel.	Puede causar cáncer en los pulmones y senos, dermatitis y otros trastornos respiratorios.
Fósforo	Plantas de fertilizantes fosfatados, de ácido fosfórico. Emisión por vehículos y aeroplanos que usan fósforo como inhibidores de la corrosión en combustibles.	Irritación de la piel y envenenamiento sistémico. Altas concentraciones afectan al sistema nervioso central.
Sustancias radiactivas	Contaminación directa por gases radiactivos o polvos suspendidos de fuentes naturales o artificiales. Contaminación directa a través de radiocisiosas ingeridas por alimentos modificados, debida a la contaminación de tierras, aguas, plantas y animales.	Efectos somáticos tales como: leucemia y otros tipos de cáncer, cataratas y reducción de la longevidad. Los efectos genéticos incluyen mutaciones en gametos humanos presentadas en futuras generaciones.
Selenio	Incineración de combustibles volátiles de industrias, secado involucrando papel.	Irritación de ojos, nariz y garganta, tracto respiratorio y gastrointestinal. Intoxicación crónica por exposición industrial; tiene efectos tardíos en riñones, hígado y pulmones.
Vapores	Industrias refinadoras de petróleo. Industrias de aleaciones, etc.	Inhibe la síntesis de colesterol, una exposición prolongada produce enfermedades del corazón y cáncer, afecta el tracto respiratorio y gastrointestinal.

Efectos en los animales.

Relativamente pocos estudios se tienen respecto a los efectos de los contaminantes sobre los animales, esto se debe a que la mayoría de éstos se encuentran a grandes distancias de las fuentes de emisión.

Algunos de los contaminantes del aire causan envenenamiento crónico cuando se emiten a la atmósfera por periodos prolongados, otros como el arsénico, el fluoruro, el plomo, el molibdeno y el selenio; causan enfermedades agudas e incluso la muerte. La única vía de exposición de los contaminantes en los animales es a través del tracto digestivo, es decir, por medio del consumo de alimentos contaminados.

La tabla siguiente muestra una lista de los contaminantes más comunes, así como la fuente de emisión y los efectos que causan en los animales.

Tabla 3. Efectos de los contaminantes en los animales.

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos en los animales
Trifluoruro de arsénico	Fundiciones de arsénico y cobre. Fertilizantes conteniendo arsénico.	Envenenamiento crónico de gatos, caballos y ovejas.
Asbesto	Experimentos de laboratorio	Cáncer pulmonar en animales de laboratorio.

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos en los animales
Cadmio	Cápsulas de cadmio como eliminador de parásitos.	Disminución en la producción de leche en vacas, muerte de cerdos.
Cloro	Derrame accidental durante su manejo.	Muerte de los animales afectados.
DDT	pesticidas.	Interfiere con el depósito de calcio, causando rompimiento prematuro de huevos de pingüinos y águilas calvas, muerte de pájaros y roedores.
Fluor y HF	Fertilizantes fosfatados y plantas productoras de aluminio.	Fluorosis, acción corrosiva en dientes y huesos.
Picno	Fundidoras de picno.	Dolor en articulaciones del ganado y de los caballos.
Mercurio	Pesticidas.	Envenenamiento en animales por comer forraje tratado con pesticidas de mercurio.
Molibdeno	Plantas de acero.	Muerte del ganado.
Ozono	Experimentos de laboratorio.	Bronquitis, enfisema y neumonía de animales tratados, así como pérdida de fertilidad.
Materiales radiactivos	Estación-90, 100-101 y 200-107.	Concentraciones significantes en carne de animales expuestos y sus derivados (leche, crema, queso, etc.).

Efectos en la vegetación.

Una gran cantidad de vegetales, forrajes y cultivos de flores, son afectados por los contaminantes del aire. Los daños se observan en las hojas, la dimensión de las cosechas y en el tamaño de los frutos, así como en la destrucción de las flores.

Los contaminantes gaseosos penetran con el aire por los estomas durante la respiración de la planta, destruyendo la clorofila y frenando la fotosíntesis [Seinfeld, 1978]. Otros contaminantes como el hollín, polvos y humos ensucian y bloquean los estomas impidiendo la respiración y el paso de la luz.

En la tabla siguiente, se muestran algunos contaminantes, su fuente y los síntomas observados en la vegetación.

Tabla 4. Efectos de los contaminantes en la vegetación.

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos en la vegetación
Ozono	Reacciones fotoquímicas de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, provenientes de la combustión de productos del petróleo.	Pérdida de pigmentación de hojas, disminución del crecimiento y desprendimiento temprano. Oscurecimiento y muerte de las puntas de las coníferas.
Dióxido de Nitrógeno	Combustión a altas temperaturas de carbón, aceite, gas y gasolina en plantas generadoras de potencia y máquinas de combustión interna.	Decoloración irregular, lesiones en el tejido interno y cerca del tallo de las hojas.
Dióxido de Azufre	Quema de carbón, combustibles, aceite y petróleo.	Decoloración de hojas, necrosis y disminución del crecimiento y de la producción en plantas.
Acido fluorhídrico	Procesos de coque forfundados, industrias del aluminio, fundiciones de hierro y trabajos cerámicos.	Quemas del tallo y la punta de las hojas, clorosis, enanismo y reducción de la producción.

Contaminante	Fuente de emisión	Efectos en la vegetación
Cloro	Escape de tanques de almacenamiento, nieblas de ácido clorhídrico cerca a zonas industriales.	Decoloración entre las venas, quemado del tallo y puntas de las hojas, caída temprana de las mismas.
Etileno	Combustión incompleta del carbón, gas, aceite para calentamiento, en máquinas de combustión interna y generadoras de potencia.	Caída de las flores e inhibición de su florecimiento, así como anomalías en las hojas.

Efectos en los materiales.

La contaminación también afecta directamente a muchos materiales, como los metales, productos pétreos y materiales de origen orgánico (madera, telas, piel y pinturas). El daño producido por la contaminación en las construcciones arquitectónicas es también considerable. El mármol y en general los materiales de construcción son ensuciados por el hollín y carcomidos por el efecto de la lluvia ácida, ésta última junto con oxidantes como el ozono atacan de manera inevitable a los metales, la ropa, los muebles, los libros, zapatos y otros artículos fabricados con materiales de origen orgánico. Los materiales son dañados por la acción de los siguientes mecanismos: abrasión, depositación y remoción, ataque químico directo, corrosión electroquímica; o una mezcla de ellos y acelerados por los factores

ambientales (mezclas, movimientos del aire, temperatura del ambiente, la intensidad de la luz solar, etc.).

La tabla siguiente muestra una relación de los agentes contaminantes más comunes, el tipo de afectación y los materiales que se ven afectados.

Tabla 5. Efectos de los contaminantes en los materiales.

Contaminante	Tipos de efectos	Materiales afectados
Amoniaco	Deterioración asociada con mezclas de bióxido de azufre.	Daño a barnices y superficies protectoras, decoloración de tejidos.
Bióxido de Carbono	Deterioración causada por combinación de bióxido de carbono y mezclas de ácido carbónico.	Piedras y canchales de los edificios.
Cloro	Corrosión y decoloración.	Metales, pinturas y tejidos.
Acido clorhídrico	Corrosión.	La mayor parte de los metales y aleaciones.
Acido fluorhídrico	Corrosión.	Vidrios y metales.
Hierro	Enchubamiento, manchas en forma de óxidos.	Pinturas y otros materiales textiles.
Manganeso	Enchubamiento, especialmente cerca de plantas de ferromanganeso.	La mayor parte de los metales y tejidos.
Oxido de Nitrógeno	Deterioramiento y decoloración.	Tejidos.
Partículas	Atracción y corrosión, cuando está combinado con otros contaminantes.	La mayor parte de los metales, pinturas y tejidos.
Fluoruro	Corrosión en forma de ácido fluorídrico.	La mayoría de los metales.
Oxido de Azufre	Corrosión y deterioración electroquímica.	Metales como el acero, zinc, hierro, aluminio, cobre, plata, equipos eléctricos, materiales de construcción, papel y tejidos.

CAPÍTULO 2

PRINCIPIOS DE LA REDUCCION DE CONTAMINANTES

La selección y diseño de la unidad de separación depende no solo del equilibrio químico y de la cinética de las correspondientes reacciones químicas, sino también de las propiedades físicas de transporte de las diversas especies que intervienen. Estos fenómenos de transporte, son comunes a todos los procesos e incluyen los efectos de la transferencia de materia y calor. Por tanto, deben tenerse en cuenta al seleccionar el método adecuado para tratar un problema específico de contaminación del aire, así como ciertas particularidades del equipo de control que pueden influir sobre la instalación, mantenimiento y eficiencia.

Con frecuencia la solución que se quiera dar a uno o más problemas conectados puede hacer deseable la elección de un equipo distinto del que parecía aconsejable a primera vista. Así, el equipo colector finalmente elegido supone a menudo un compromiso, el más ventajoso (es decir, aquel que además de cumplir con los requerimientos técnicos del proceso realice el mismo trabajo al costo más bajo posible).

De las propiedades del gas portador

Composición.- La composición del gas es importante sólo si afecta sus propiedades físicas y químicas, las propiedades químicas son importantes para predecir si habrá reacción química entre el gas, el contaminante y el colector, por ejemplo cuando el gas contiene óxidos de azufre y vapor de agua, estos causan corrosión de las partes mecánicas del colector.

Temperatura.- Las dos influencias de la temperatura son: el volumen del gas y los materiales de construcción del colector, éstos factores influyen tanto en el costo como en el tamaño del equipo, así como en la concentración del contaminante por unidad de volumen. La temperatura, a su vez, afecta otras propiedades como son la viscosidad y la densidad del gas.

Los procesos de adsorción no son prácticos a altas temperaturas, porque generalmente son exotérmicos y su cinética puede variar drásticamente, en absorción (donde la solubilidad del gas contaminante depende de la temperatura del solvente), los efectos pueden ser significantes si la concentración del material soluble es tal que un aumento en la temperatura cambie sus propiedades físicas de transporte.

En la combustión, la temperatura del gas afecta el balance de calor el cual es el principal factor en el proceso. En los precipitadores electrostáticos, tanto la resistividad del polvo como la fuerza dieléctrica del gas son dependientes de la temperatura.

Los procesos húmedos no pueden usarse donde el líquido absorbente pueda congelarse, hervir o evaporarse rápidamente.

Presión.- En general una presión muy alta o muy baja requiere que el equipo de control sea diseñado como un recipiente a presión.

La presión del gas es importante en la colección de partículas por su influencia en la densidad, viscosidad y propiedades eléctricas. Es importante, también, en situaciones donde la selección esta entre lavadores de alta eficiencia y otros equipos de colección de partículas. La presión disponible puede usarse para superar la elevada caída de presión a través del lavador y reducir el requerimiento de potencia que muchas veces limitan la utilización de los lavadores. En la absorción, una elevada presión favorece la remoción y se requiere en algunas situaciones.

Principios de la Reducción de Contaminantes

Viscosidad.- La viscosidad es importante en las técnicas de colección por dos aspectos: primero, en los mecanismos de remoción por colección inercial, gravitacional y precipitación electrostática. Algunas técnicas de remoción de partículas involucran la migración de las partículas a través de la corriente gaseosa bajo la influencia de alguna fuerza directriz, segundo, la viscosidad influye en la caída de presión a través del equipo.

Densidad.- La densidad no parece tener efecto significativo en la mayor parte de los procesos de limpieza de gases, debido a que la diferencia entre la densidad de la partícula y la del gas aparece como un factor en el análisis teórico de todos los equipos de colección, tanto gravitacionales como centrífugos.

Humedad.- La humedad de la corriente de gas es importante para la selección del equipo de control en varias formas. Una elevada humedad formará entortado y bloqueo en los colectores inerciales, así mismo, la presencia de vapor de agua influye en los mecanismos básicos de remoción así como en la resistividad del medio. En la combustión catalítica es importante puesto que debe mantenerse el balance de calor. En la adsorción, limita la capacidad del lecho. En filtración, influye en la aglomeración. En

situaciones donde la humedad es un problema por cualquiera de las razones expuestas, los lavadores o torres de absorción son los equipos apropiados.

Combustibilidad.- El manejo de un gas inflamable o explosivo requiere de ciertas precauciones, la más importante es evitar que la corriente de gas llegue a los límites máximos o mínimos de explosividad con respecto a cualquier mezcla de aire que exista o pudiera ocurrir. El uso de lavadores o absorbedores es un medio efectivo de minimizar el riesgo. Los precipitadores electrostáticos no son prácticos pues existe la posibilidad de chispa e incendio.

Reactividad.- Un gas reactivo presenta problemas especiales. En adsorción, el gas no debe reaccionar con el adsorbente, por ejemplo, la sílica gel no es apropiada cuando la corriente gaseosa contiene vapor de agua. La reactividad es aún más problemática cuando el proceso se lleva a cabo a altas temperaturas. Los equipos que usan agua tampoco son apropiados si ésta reacciona con el gas y provoca corrosión en el equipo.

Toxicidad.- Cuando el gas es tóxico o irritante, se necesitan precauciones especiales en la construcción y

operación del equipo así como en la descarga. El sistema completo debe construirse en forma vertical, bajo presión negativa, tal que el colector funcione bajo succión, adicionalmente deben incluirse al equipo ventilas para remover el contaminante.

Propiedades sónicas y eléctricas.- Las propiedades sónicas y eléctricas son importantes principalmente en la precipitación electrostática por la facilidad de ionización que influye en los mecanismos de colección. La energía sónica, por su parte, se utiliza para producir aglomeración, ésta propiedad es dependiente tanto de la viscosidad del gas como del movimiento *Browniano* de las partícula que a su vez dependen de la temperatura de la corriente gaseosa.

Velocidad de flujo.- La velocidad a la cual el gas debe ser tratado depende de la velocidad de evolución del proceso mismo, su temperatura inicial y los medios por los cuales es enfriado, si éste se utiliza, éstos y otros factores determinan la velocidad a la cual el gas debe ser tratado.

La velocidad de flujo determina también el tamaño del equipo. Por razones económicas es deseable minimizar el tamaño del equipo. La optimización del tamaño y la velocidad tiene dos efectos:

- a) la reducción de tamaño implica un aumento en la potencia requerida para tratar una cantidad dada de gas a causa de la pérdida de presión dentro del equipo de control, y
- b) el efecto de la velocidad se manifiesta en los mecanismos de eliminación, por ejemplo, altas velocidades favorecen la remoción de contaminantes en equipos de impactación inercial; principalmente en el punto de turbulencia, sin embargo, mas allá de éste, un incremento en la velocidad tiene efectos contraproducentes en la eficiencia de remoción. En las cámaras de sedimentación por gravedad, la velocidad de flujo determina el tamaño de partícula más pequeño que puede ser removido. En los lavadores tipo venturi, la eficiencia es directamente proporcional a la velocidad a la que el gas atraviesa el sistema. En filtración, la resistencia del medio a menudo varía con la velocidad debido a cambios en la permeabilidad de la torta. En adsorción, la velocidad de la corriente de gases a través del lecho, no debe exceder de un máximo, tal que se obtenga una remoción efectiva. La velocidad óptima, para cada equipo de control no ha sido establecida, debido a las influencias del

proceso, las propiedades del gas portador, así como del equipo mismo.

Las variaciones en el flujo implican cambios en la eficiencia del equipo, en la velocidad del gas y en la caída de presión. En situaciones donde las variaciones son inevitables es necesario: a) Diseñar para condiciones extremas, b) utilizar equipos de flujo variable, o c) usar un colector que sea inherentemente positivo en su operación. Los equipos de filtración son los más aptos para variaciones extremas de flujo.

Las variaciones en la velocidad de flujo pueden ser de dos tipos:

- 1.- aquellos donde unicamente cambia el flujo del gas y,
- 2.- aquellos en los que las variaciones en el flujo se deben a cambios en el proceso, y que pueden variar desde la composición hasta la temperatura de la corriente gaseosa.

De las propiedades del contaminante

Composición.- La composición del contaminante es importante debido a que rige en última instancia la

proceso, las propiedades del gas portador, así como del equipo mismo.

Las variaciones en el flujo implican cambios en la eficiencia del equipo, en la velocidad del gas y en la caída de presión. En situaciones donde las variaciones son inevitables es necesario: a) Diseñar para condiciones extremas, b) utilizar equipos de flujo variable, o c) usar un colector que sea inherentemente positivo en su operación. Los equipos de filtración son los más aptos para variaciones extremas de flujo.

Las variaciones en la velocidad de flujo pueden ser de dos tipos:

- 1.- aquellos donde unicamente cambia el flujo del gas y,
- 2.- aquellos en los que las variaciones en el flujo se deben a cambios en el proceso, y que pueden variar desde la composición hasta la temperatura de la corriente gaseosa.

De las propiedades del contaminante

Composición.- La composición del contaminante es importante debido a que rige en última instancia la

cantidad de líquido de lavado a utilizarse, así como la vida media del agente adsorbente; también afecta algunas propiedades físicas y químicas, extensivas.

Solubilidad.- La solubilidad del contaminante es importante para la adsorción, absorción y lavado. En absorción, el grado de solubilidad es un indicador de la facilidad de remoción del contaminante. En adsorción, la solubilidad es importante por la facilidad con la cual el adsorbente es regenerado. En la operación de lavado, es importante para remover las partículas colectadas, la solubilidad es además, un mecanismo secundario de eliminación que ayuda a las fuerzas básicas de separación.

Combustibilidad.- No es deseable usar un sistema de colección que permita la acumulación de contaminantes cuando éste es combustible o explosivo. Los sistemas que manejan tales materiales deben protegerse de la acumulación de cargas estáticas. Los precipitadores electrostáticos no son apropiados, debido a su tendencia a formar chispa. La colección húmeda por métodos de lavado o absorción son muy apropiados.

Reactividad.- Ciertas precauciones deben tomarse en la selección de equipos para la colección de contaminantes

reactivos. En filtración, la selección del medio filtrante resulta un problema especial; en adsorción, ciertas situaciones requieren que el adsorbato contaminado, reaccione con el adsorbente para que el grado de reactividad sea importante. Cuando se usan lavadores, deben considerarse los efectos de la corrosión, incluyendo materiales resistentes al mismo.

Propiedades eléctricas y sónicas.- Las propiedades eléctricas y sónicas del contaminante influyen en la eficiencia de cualquier equipo de colección, se considera también que contribuyen en la recolección de sólidos en los colectores inerciales. En los precipitadores electrostáticos, las propiedades eléctricas del contaminante son de vital importancia en la determinación de la eficiencia de colección; en equipos de filtrado, el fenómeno eléctrico tiene influencia directa y visible principalmente en el proceso de formación y remoción de la torta. En torres de rocío y otras formas de lavadores en la que gotas de líquido se ponen en contacto con contaminantes, la carga eléctrica tanto de las partículas como de la gota misma es una variable importante, el proceso es más eficiente cuando la gota cargada atrae las partículas contaminantes. Las propiedades sónicas son significantes cuando se utiliza aglomeración sónica.

Toxicidad.- Un contaminante tóxico requiere de técnicas especiales de remoción, mantenimiento y servicio del equipo. La toxicidad, sin embargo, no influye con los mecanismos de colección de partículas.

Tamaño, forma y densidad del contaminante.- El tamaño, la forma y la densidad son los tres factores que determinan la magnitud de las fuerzas que se oponen al movimiento de una partícula a través de un fluido, estas fuerzas son el factor principal en la determinación de la efectividad de remoción a través de colectores inerciales, gravitatorios, lavadores y precipitadores electrostáticos; de hecho estas fuerzas son de interés primordial para cualquier equipo. En el caso de los filtros, el tamaño y la forma de la partícula influyen tanto en la eficiencia de colección como en la caída de presión.

Higroscopicidad.- La higroscopicidad no está relacionada con ningún mecanismo de remoción, sin embargo, es una medida de cuán rápidamente las partículas pueden acumularse (formar grumos). Si la acumulación ocurre en un equipo de filtrado, este se puede tapar y evitar el paso de la corriente gaseosa.

Propiedades del flujo.- Estas propiedades están relacionadas con la facilidad con la que el polvo colectado puede ser descargado del colector, por ejemplo, si el contaminante es pegajoso se elimina la posibilidad de usar filtros.

De los equipos y técnicas de control

En el capítulo anterior se dijo que los contaminantes pueden ser tanto gaseosos como partículas, en ésta sección se describen los equipos y las técnicas de control usadas en el combate de la contaminación del aire ya sea por agentes gaseosos o particulados.

Contaminantes gaseosos

Las técnicas y equipos usados para controlar los contaminantes gaseosos dependen de las propiedades del gas a controlar, dichas técnicas o métodos de control se clasifican en tres tipos básicamente: *absorción, adsorción y combustión* [Painter, 1974].

Absorción

La absorción es una operación unitaria de transferencia de materia que consiste en poner un gas en contacto con un líquido, para que este disuelva determinados componentes del gas (aprovechando la solubilidad preferencial o reactividad química del contaminante gaseoso en la fase líquida), que queda libre de los mismos. En la técnica de absorción, la corriente gaseosa pasa a través del absorbedor (lavador), el cual contiene el líquido absorbente que remueve o modifica uno o más de los constituyentes de la corriente de gas.

El líquido absorbente puede ser reactivo si existe un cambio químico para remover el contaminante, por ejemplo, el dióxido de azufre es removido de una corriente gaseosa por inyección de agua y piedra caliza, éstos reaccionan para formar hidróxido de calcio el cual, a su vez, reacciona con el dióxido de azufre formando sulfato de calcio mismo que es lavado de la corriente de gas con más agua.

Si el contaminante es removido de la corriente gaseosa por disolución simple, sin cambio químico, el absorbente se denomina no reactivo, por ejemplo, el agua. Adicionalmente, se puede diferenciar un absorbente como regenerable y no

regenerable dependiendo de su capacidad de eliminación del contaminante gaseoso.

Los absorbedores (lavadores) son los equipos que físicamente contienen el líquido absorbente y a través del cual pasa la corriente de gas.

Existe una gran variedad de equipos que utilizan la técnica de absorción, algunos ejemplos son:

- Torres empacadas
- Torres de platos
- Torres de rocío
- Lavadores de choro (venturi)
- Tanques agitados

Adsorción

La adsorción - a veces llamada sorción- consiste en la eliminación de algunos componentes de una fase fluida mediante un sólido que lo retiene.

La adsorción es un fenómeno de superficie. Las moléculas, átomos o iones adsorbidos están confinados en la superficie de los poros del sólido, unidos por fuerzas de Van Der Waals, o por verdaderos enlaces químicos. En éste último caso se habla a veces de quimisorción. Solamente

sólidos que poseen una superficie específica elevada serán adsorbentes de interés, por ejemplo, carbón activo, gel de sílice, alúmina activada, etc.

Los adsorbedores son los equipos que físicamente contienen al sólido adsorbente y a través del cual fluye el gas, los tipos más comunes son:

- Adsorbedores de lecho fijo
- Adsorbedores de lecho fluido, etc.

Combustión

La combustión u oxidación rápida, es una técnica usada para eliminar contaminantes gaseosos orgánicos emitidos en ciertos procesos de manufactura. Para obtener combustión completa es necesario balancear las cantidades suministradas de oxígeno, temperatura, turbulencia y tiempo de contacto.

El oxígeno, es necesario para que la combustión se lleve a cabo, el producto final de la combustión depende del suministro de oxígeno, de hecho, cuando se quema metano con insuficiente oxígeno se forma carbón sólido.

La temperatura debe mantenerse muy cerca de la temperatura de ignición (temperatura a la cual más calor es

generado que el que se pierde hacia los alrededores), de los contaminantes.

La turbulencia provee un mezclado completo del oxígeno con el combustible (contaminante gaseoso) en cualquier tiempo, en ocasiones para favorecer las turbulencias se colocan mamparas en el interior de los equipos.

Además, es necesario que la corriente gaseosa se mantenga en contacto con el fuego el tiempo suficiente para que se efectúe la combustión completa.

Contaminantes particulados

Los equipos de control de material particulado son ligeramente diferentes a los utilizados para contaminantes gaseoso, aún cuando algunos de aquellos puedan funcionar eficientemente para la recolección de partículas, en general se les puede clasificar de la siguiente manera: colectores mecánicos, colectores húmedos, sistemas de filtrado, precipitadores electrostáticos y quemadores [Painter, 1974].

Colectores mecánicos

A esta categoría corresponden las cámaras de sedimentación y los ciclones.

La cámara de sedimentación -la forma mas sencilla de aparato de limpieza de gases se basa en el hecho de que las partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas caen a través de éste bajo la acción de la gravedad, a una velocidad que depende del tamaño de las partículas, su densidad y su forma; así como de la densidad y la viscosidad del gas. La partícula alcanza rápidamente una velocidad constante expresada como velocidad de caída libre o velocidad terminal, que, para partículas pequeñas, se calcula a partir de la fórmula deducida por Stokes, en la cual se establece

$$u_s = \frac{gd^2(\rho_s - \rho)}{18\mu}$$

donde u_s velocidad de caída libre, g aceleración de la gravedad, d diámetro de la partícula, ρ_s densidad de la partícula, ρ densidad del gas y μ viscosidad del gas. Experimentalmente se ha comprobado que la ley de Stokes se cumple para tamaños de partículas superiores a los 100 μm .

Colectores mecánicos

A esta categoría corresponden las cámaras de sedimentación y los ciclones.

La cámara de sedimentación -la forma mas sencilla de aparato de limpieza de gases se basa en el hecho de que las partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas caen a través de éste bajo la acción de la gravedad, a una velocidad que depende del tamaño de las partículas, su densidad y su forma; así como de la densidad y la viscosidad del gas. La partícula alcanza rápidamente una velocidad constante expresada como velocidad de caída libre o velocidad terminal, que, para partículas pequeñas, se calcula a partir de la formula deducida por Stokes, en la cual se establece

$$u_s = \frac{gd^2(\rho_s - \rho)}{18\mu}$$

donde u_s velocidad de caída libre, g aceleración de la gravedad, d diámetro de la partícula, ρ_s densidad de la partícula, ρ densidad del gas y μ viscosidad del gas. Experimentalmente se ha comprobado que la ley de Stokes se cumple para tamaños de partículas superiores a los 100 μm .

El *ciclón simple*, consta de un recipiente cilíndrico vertical, donde se introduce el gas a través de una entrada tangente y horizontal. El polvo se concentra, por la acción de giro, en la capa del gas próxima a la pared del recipiente. La columna de giro del gas circula a lo largo del recipiente, y por último cambia de dirección y sale por el conducto situado en el eje del recipiente. El polvo cae a la tolva colocada por debajo de la columna móvil de gas.

Colectores húmedos

Los *lavadores y absorbedores húmedos* son aparatos que utilizan fases mezcladas de gas y líquido. El objetivo del aparato de lavado o absorbedor estriba en transferir la materia suspendida en el gas al líquido absorbente, fácilmente separable del aparato de limpieza de gases, y entonces el gas sale limpio hacia el proceso para el cual ha de utilizarse, o se descarga a la atmósfera.

La acción de lavadores y absorbedores húmedos se basa en la colisión entre las partículas de polvo y las gotas de líquido en suspensión en el gas. La colisión y la coalescencia resultante se provocan mediante uno o más de los siguientes mecanismos de captura.

El *ciclón simple*, consta de un recipiente cilíndrico vertical, donde se introduce el gas a través de una entrada tangente y horizontal. El polvo se concentra, por la acción de giro, en la capa del gas próxima a la pared del recipiente. La columna de giro del gas circula a lo largo del recipiente, y por último cambia de dirección y sale por el conducto situado en el eje del recipiente. El polvo cae a la tolva colocada por debajo de la columna móvil de gas.

Colectores húmedos

Los *lavadores y absorbedores húmedos* son aparatos que utilizan fases mezcladas de gas y líquido. El objetivo del aparato de lavado o absorbedor estriba en transferir la materia suspendida en el gas al líquido absorbente, fácilmente separable del aparato de limpieza de gases, y entonces el gas sale limpio hacia el proceso para el cual ha de utilizarse, o se descarga a la atmósfera.

La acción de lavadores y absorbedores húmedos se basa en la colisión entre las partículas de polvo y las gotas de líquido en suspensión en el gas. La colisión y la coalescencia resultante se provocan mediante uno o más de los siguientes mecanismos de captura.

- Efectos de la inercia y de la gravedad
- Efecto electrostático
- Tensiones de difusión
- Otros mecanismos

Los equipos de colección húmeda son de diferentes tipos, los más importantes son:

- Torre de pulverización por gravedad
- Lavadores tipo venturi
- Absorbedores desintegradores
- Precipitadores dinámicos húmedos
- Torres de platos

Sistemas de filtración

La *filtración* -el método más antiguo utilizado para separar materiales suspendidos en gases- se basa en el principio de hacer pasar los gases cargados de polvo a través de un medio filtrante poroso donde este se queda atrapado. Cabe agrupar ampliamente los medios filtrantes en los siguientes tres tipos:

- Lechos de grava o arena con o sin limpieza incorporada.
- Papel poroso y esferas fibrosas, normalmente filtros tejidos.
- Filtros de tela y de fieltro, normalmente con limpieza incorporada.

Todos los medios de filtración mencionados recogen el polvo mediante una combinación de efectos diferentes, que son:

- a) Las partículas se separan debido al tamizado del medio filtrante, cualquier medio filtrante tiene determinado tamaño de poro y se separan todas las partículas mayores de ésta.
- b) Las partículas se separan por inercia. Su paso a través del medio filtrante suele ser muy tortuoso y las partículas de polvo se depositan sobre el material del filtro durante los muchos cambios de dirección.
- c) Acostumbra haber una carga electrostática sobre las partículas de polvo y especialmente sobre las partículas más finas que pueden depositarse como consecuencia de esta carga.
- d) Las partículas muy finas en la región submicroscópica, de peso similar a las moléculas del gas portador, siguen las líneas de flujo del gas y no se separan por efectos de la inercia. Estas partículas pequeñas están sujetas al movimiento *Browniano*, y

gracias a este llegan finalmente a la proximidad del material filtrante, donde se depositan y quedan retenidas por una combinación de fuerzas electrostáticas y moleculares.

- e) Las partículas de tamaño más pequeño que los poros del filtro quedan eficazmente retenidas debido a la acumulación de una capa de polvo sobre el material filtrante y en su interior. Formada ésta, la filtración se produce a través de la capa de polvo depositado, pero cabe que inicialmente se reduzca la eficacia hasta que se forma la capa la cual también incrementa la pérdida de presión, comparada con el filtro limpio.

Precipitadores electrostáticos

El *precipitador electrostático* se basa en el hecho de que las partículas cargadas eléctricamente sujetas a un campo eléctrico son atraídas hacia los electrodos que crean dicho campo y depositadas sobre ellos. La separación de las partículas suspendidas del gas requiere tres etapas fundamentales:

- a) Introducción de una carga eléctrica sobre las partículas suspendidas.
- b) Depósito de las partículas cargadas, bajo la influencia del campo eléctrico, sobre los electrodos colectores.
- c) Transferencia del material recogido desde los electrodos a una tolva de almacenamiento de la que puede extraerse continuamente o a intervalos.

Los quemadores son considerados equipos para el control de contaminantes gaseosos, sin embargo, pueden usarse para el control de partículas residuales libres de vapor, siempre que éstas sean realmente combustibles.

De los mecanismos de colección

El diseño de los aparatos utilizados para eliminar las partículas de un gas se basa en el aprovechamiento de ciertas propiedades físicas, químicas o eléctricas de las partículas. La eficacia de los equipos de eliminación de partículas se mide por su rendimiento, expresado

generalmente como el porcentaje en peso de la cantidad total de partículas retenidas.

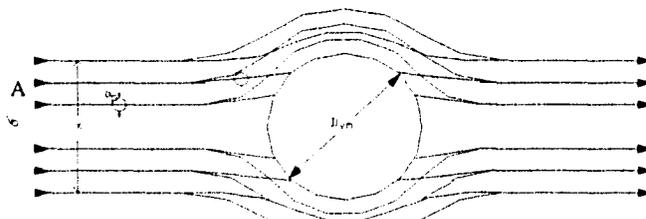
Uno de los factores más importantes cuando se trata de elegir una técnica de eliminación es la distribución de tamaños de las partículas presentes en el flujo de gas.

La eliminación de las partículas de un gas depende de cierto número de mecanismos, tales como la difusión (tanto molecular como turbulenta), el desplazamiento bajo la influencia de fuerzas eléctricas, centrífugas y gravitatorias, la intercepción y el impacto inercial. El diseño de los aparatos de eliminación de las partículas se basa fundamentalmente en el principio de hacer que la corriente gaseosa, en la que se encuentran las partículas, pase a través de una región en donde las partículas se ven sometidas a la acción de fuerzas externas o chocan contra ciertos obstáculos, lo que hace que se separen de la corriente gaseosa.

Impacto inercial

El impacto inercial ocurre cuando una partícula no puede seguir los remolinos rápidos que se forman alrededor de un obstáculo, y, como consecuencia de su inercia, se dirige

hacia el obstáculo con un movimiento de menos curvatura que la de las líneas de corriente. Por tanto, la colisión ocurre como consecuencia de la cantidad de movimiento de la partícula, que es proporcional a su masa. La trayectoria A de la figura ilustra el caso del impacto inercial.

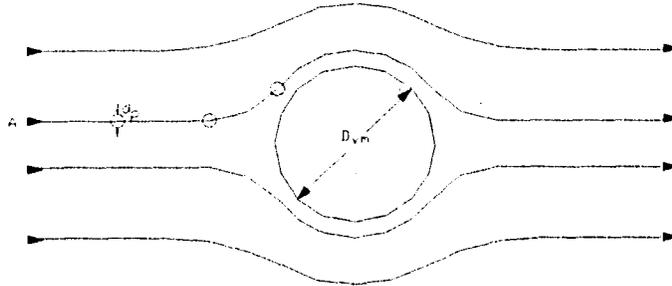


donde d_p es el diámetro de la partícula, D_{vm} es el diámetro de la gota, V_c es la velocidad de la corriente de gases, A, son las trayectorias inerciales, X representa la distancia máxima en la cual las partículas pueden ser atrapadas.

Intercepción directa

La intercepción directa ocurre cuando una partícula que sigue las líneas de corriente alrededor de un obstáculo, tiene un tamaño lo suficientemente grande como para que su superficie y la del obstáculo entren en contacto. Por consiguiente, si la línea de corriente sobre la que esta situada el centro de la partícula esta a una distancia $d_p/2$

del blanco, habrá intercepción. La trayectoria A de la figura ilustra el caso de la intersección directa.



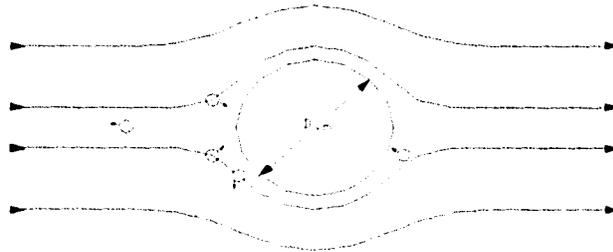
Nótese que el mecanismo de impacto inercial se basa en la premisa de que la partícula tiene masa, pero no tiene dimensiones, mientras que la intercepción directa se basa en la premisa de que la partícula tiene dimensiones pero no tiene masa.

Difusión

Las partículas de aerosol suspendidas en un gas isotérmico, están sujetas a un bombardeo continuo por parte de las moléculas de gas, debido a su movimiento térmico aleatorio. En cada colisión, se lleva a cabo un intercambio de momentum, si las partículas de aerosol son muy pequeñas; cada una de estas colisiones provoca que las partículas se muevan también de manera aleatoria, lo cual es llamado

movimiento browniano. Debido al movimiento browniano las partículas de aerosol tienden a difundirse a través del gas desde regiones de alta concentración de partículas hacia regiones de baja concentración.

Por tanto, el proceso de difusión se da cuando existe un gradiente de concentraciones, en un equipo de lavado, dicho gradiente es formado cuando las partículas con movimiento Browniano chocan con la superficie colectora, quedando retenidos. La superficie adquiere de esta forma una concentración relativamente mayor a la que se encuentra en la corriente gaseosa formandose así la fuerza motriz de la difusión.



CAPÍTULO 3

EL LAVADOR DE GASES

Principios del funcionamiento.

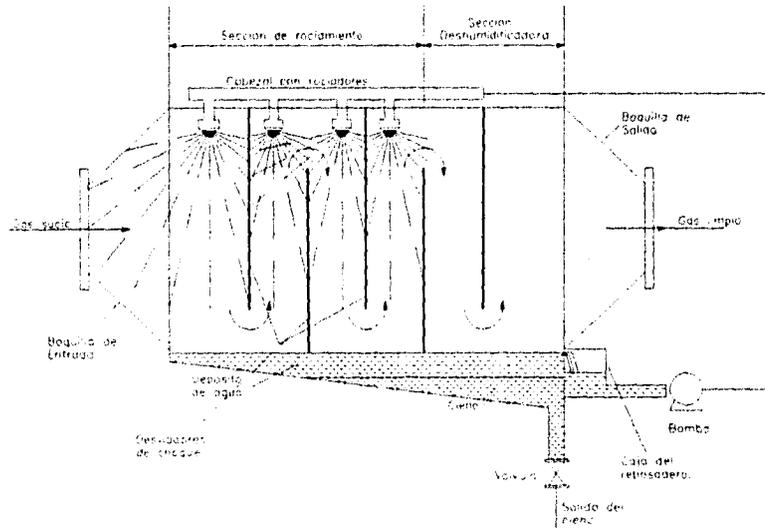
Los lavadores y absorbedores húmedos son aparatos que utilizan fases mezcladas de gas y líquido. El objetivo del aparato de lavado o absorbedor estriba en transferir la materia suspendida en el gas al líquido absorbente, fácilmente separable del aparato de limpieza de gases, y entonces el gas sale limpio hacia el proceso para el cual ha de utilizarse, o se descarga a la atmósfera.

La acción de los lavadores y absorbedores húmedos se basa en la colisión entre las partículas de polvo y las gotas de líquido en suspensión en el gas, la colisión y la coalescencia resultante se provocan mediante uno o más de los siguientes mecanismos de captura.

- Efectos de la inercia y de la gravedad
- Efecto electrostático
- Tensiones de difusión
- Otros mecanismos

Descripción del equipo

La figura siguiente, muestra un diagrama esquemático en el que se señalan los diversos componentes de un lavador de gases de flujo mixto.



La **cámara de rociado**, consiste en un gran recipiente a través del cual suele fluir el gas por el plano horizontal, a relativamente baja velocidad. Se introduce el líquido absorbente por el extremo superior y circula en flujo cruzado, paralelo y contracorriente respecto a la corriente gaseosa.

La corriente de gas sucio se hace más lenta en la boquilla de entrada, y se abre camino en medio de la turbulencia producida por la fuerza de los finos rociadores, pasa después a la sección de separación de las gotas de líquido y se acelera en la boquilla de salida a la velocidad del ducto.

Algunas partículas más grandes se depositan en la superficie del agua por efecto de la gravedad, sin embargo, la principal recolección se lleva a cabo por colisión entre las partículas de polvo y las gotitas de agua, con el resultado de que la segunda captura a la primera.

Sección de rociado: Los mecanismos anteriores hacen que las partículas de polvo se hagan más grandes y más pesadas al ser capturadas por gotas de agua. Este aumento de tamaño y de peso ayuda a la recolección de las partículas al reforzar las fuerzas que ayudan a separar el polvo más pesado del más ligero. Estas fuerzas son la gravedad, la inercia y la fuerza centrífuga.

Una vez capturada, la partícula de polvo húmeda actúa como si fuera una pequeña gota de agua. Rápidamente se unen entre sí para formar gotas mayores, después forman películas húmedas en las superficies y finalmente charcos de líquido.

Como en todos los colectores, las partículas finas son más difíciles de capturar que las gruesas. La probabilidad de captura de las partículas finas depende de la cantidad de energía que hace que se mezclen el gas, el polvo y las gotitas.

En la cámara de rociar casi toda la energía mezcladora es aportada por la presión de los rociadores. Las presiones más altas se usan para producir gotitas más finas, en mayor número y con mayor turbulencia.

Rociadores.- La necesidad de dispersar un líquido en un gas dió origen a una enorme variedad de dispositivos mecánicos. Los diferentes diseños realzan ventajas distintas, como libertad en el atascamiento, patrón de rociado, tamaño pequeño de gotitas, uniformidad de la aspersión, etc.

La mayor parte de las toberas de aspersión (rociadores o atomizadores), caen en una de tres categorías:

- Toberas de presión (hidráulicas)
- Toberas de dos fluidos (neumáticas)
- Dispositivos giratorios

Todas ellas comparten ciertas características como son:

- a) Eficiencia relativamente baja
- b) Dependencia del mecanismo de división¹
- c) Distribución amplia de tamaños de gotitas
- d) Bajo costo

La característica más importante de una tobera es el tamaño de gotitas que produce. Por otra parte, las gotas que son demasiado finas no se asentarán y una de las preocupaciones más comunes es la que se refiere a la cantidad de líquido que será arrastrado en una operación dada de aspersion.

Hay varios modos de describir el tamaño de las gotitas, las más comunes son:

- 1.- Mediana de volumen (mediana de masa) D_{vm} , da el tamaño mayor de los diversos tamaños promedio de las gotas.
- 2.- La mediana de Sauter D_{32} , tiene la misma relación de superficie a masa que la población total de gotas, suele ser de 70 a 90% D_{vm} . Se utiliza con frecuencia en procesos de transporte.

¹ Fraccionamiento en columna de líquidos y fraccionamiento en lámina de líquidos.

3.- Diámetro máximo D_{max} , es la partícula de tamaño mayor en la población. Por lo común, suele ser de dos a tres veces D_{vm} . Su utilización proporciona el cálculo más conservador para los procesos de transporte.

El diámetro de las gotas depende de ciertas propiedades físicas del líquido como son: la viscosidad, la densidad y la tensión superficial. Sin embargo, la viscosidad ejerce el efecto más importante entre todas las propiedades físicas, porque puede variar dentro de un intervalo más amplio. Por ejemplo, no es raro encontrar un aceite que tenga mil veces la viscosidad del agua¹, mientras que la mayor parte de los líquidos caen dentro de un factor de dos de la viscosidad del agua y de un factor de tres de su tensión superficial.

El procedimiento de predicción que se recomienda, parte de datos sobre el sistema aire-agua dados por los fabricantes de atomizadores, al flujo deseado. A continuación ese tamaño de las gotas se corrige mediante la siguiente ecuación:

¹ Se utilice esta comparación debido a que en la mayoría de los sistemas de lavado se utiliza agua como absorbente.

$$\frac{D_{vm\ sistema}}{D_{vm\ agua}} = \left(\frac{\sigma_{sistema}}{73} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_1}{1.0} \right)^{0.2} \left(\frac{1.0}{\rho_1} \right)^{0.9}$$

en donde D_{vm} = mediana del diametro del volumen de las gotitas, $\sigma_{sistema}$ = tensión superficial mN/m (dina/cm), μ_1 = viscosidad del líquido, mPa.s (cP), ρ_1 = densidad del líquido, g/cm³

Otra manera de predecir el tamaño promedio y máximo de gotas, es el delineado por Marshall³. En el caso de boquillas neumáticas, se recomienda aplicar la expresión desarrollada por Nukiyama y Tanasawa⁴:

$$D_{vm} = \frac{1920\sqrt{\sigma_1}}{V_r \sqrt{\rho_1 \cdot 62.3}} + 75.4 \left(\frac{\mu_1}{\sqrt{\sigma_1 \rho_1 \cdot 62.3}} \right)^{0.47} \left(\frac{1000Q_1}{Q_2} \right)^{1.5}$$

en donde D_{vm} = diámetro promedio de gota, en μm , σ_1 = tensión superficial, en dinas/cm, μ_1 = viscosidad del líquido, en cp, V_r = velocidad relativa entre el aire y el líquido, en ft/s (velocidad del gas), ρ_1 = densidad del líquido, en lb/ft³, Q_1 = gasto volumétrico del líquido ft³/s, Q_2 = gasto volumétrico del aire ft³/s.

³ Chem. Eng. Prog. Monograph Ser., 40, 1, (1944), cited for William Licht, 1980, Air Pollution Control Engineering, Marcel Dekker, Inc.

⁴ Trans. Res. Mem. Elec. Japan, 5, 48(1933), cited for William Licht, Loc. Cit.

Para boquillas de presión de un solo fluido (hidráulicas), se acostumbra utilizar una regla empírica:

$$D_{vm} = \frac{500}{\sqrt{\Delta P}}$$

en donde ΔP = caída de presión en la boquilla, en lb/in².

Para discos centrifugos, se utiliza la relación de Friedman, Gluckert y Marshall⁵:

$$\frac{D_{vm}}{r} = 0.4 \left(\frac{\Gamma}{\rho_1 N r^2} \right)^{0.6} \left(\frac{\mu}{\Gamma} \right)^{0.2} \left(\frac{\sigma \rho_1 L_w}{\Gamma^2} \right)^{0.1}$$

en donde D_{vm} = diámetro promedio de gota, en ft, r = radio del disco, en ft, Γ = velocidad de masa del rocío, en lb/(min)(ft de periferia del disco humedecido), ρ_1 = densidad del líquido, en lb/ft³, N = velocidad del disco, en rpm, μ = viscosidad del líquido, en lb/(ft)(min), σ = tensión superficial, en lb/(min)², L_w = periferia del disco humedecido, en ft.

⁵ Chem. Eng. Prog., 45, 151 (1953), citado por Wilbur Licht, Lec. 311.

Al examinar estas relaciones se observa que las variables son difíciles de especificar cuando no se cuenta con pruebas, excepto cuando se manejan líquidos puros, lo que, a decir verdad, sucede en muy raras ocasiones. Pese a ello, es común utilizarlas considerando las propiedades físicas del fluido como un promedio del de sus constituyentes.

El tamaño máximo de partículas se calcula utilizando la relación citada a continuación, y los efectos de las variables de atomización cambiantes se evalúan por medio de las ecuaciones anteriores:

$$D_{max} = 3D_{vm}$$

en donde D_{max} = diámetro máximo de gota, μm^6

⁶ Nota: Todas las fracciones poseen las mismas dimensiones. Para convertir dinas por centímetro cuadrado a libras por metro cuadrado, multiplíquese por 1.37×10^{-5} ; para convertir poises en newton por segundo por metro cuadrado, multiplíquese por 11.3 ; para convertir pies por segundo en metros por segundo, multiplíquese por 0.3048 ; para convertir pies en metros, multiplíquese por 0.3048 ; para convertir libras por minuto-pie en kilogramos por segundo-metro, multiplíquese por 0.0047 ; para convertir libras por pie cúbico en kilogramos por metro cúbico, multiplíquese por 16.019 ; para convertir libra por minuto cuadrado en kilogramos por segundo cuadrado, multiplíquese por 1.26×10^{-4} ; para convertir unidades térmicas británicas por hora en kilogramos por segundo, multiplíquese por 2.63×10^{-4} y para convertir unidades térmicas británicas por hora-pie cuadrado grado Fahrenheit por pie en julios por metro cuadrado-segundo kelvin por metro, multiplíquese por 1.7307 .

Es común que en la operación de un equipo se desee saber cual será el efecto de cambiar algún parámetro como la presión, el flujo o el diámetro de orificio de la tobera a fin de tomar las medidas respectivas cuando ocurra una acción como esta. Para ello se tienen algunas relaciones semiempíricas que nos relacionan la caída de presión, la velocidad de flujo y el diámetro del orificio con el tamaño de las gotitas generadas⁷.

El volumen del diámetro medio de la gota se puede estimar que disminuye al incrementar la ΔP (caída de presión) por medio de la ecuación:

$$\frac{D_{vm1} \cdot \Delta P_1}{D_{vm2} \cdot \Delta P_2} = \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \right)^{3/2}$$

Para toberas similares y ΔP constante, el diámetro de la gota se incrementa a medida que aumenta el diámetro de la tobera, como indica la siguiente ecuación:

$$\frac{D_{vm1}}{D_{vm2}} = \left(\frac{\text{Diámetro del orificio}_1}{\text{Diámetro del orificio}_2} \right)^{3/2}$$

⁷ Robert H. Perry's, Chem. Eng. Handbook, 6th. Edition, (1964).

El efecto de la ΔP y el diámetro del orificio se puede calcular también en términos del flujo y la velocidad volumétrica. Para toberas similares la expresión es:

$$\frac{D_{vm_1}}{D_{vm_2}} = \left(\frac{\text{Flujo volumétrico}_1}{\text{Flujo volumétrico}_2} \right)^{1/2} \left(\frac{\text{Velocidad}_2}{\text{Velocidad}_1} \right)$$

Adicionalmente, Gluckert [Op. cit], sugiere las siguientes relaciones para calcular la transferencia de calor en varias condiciones de atomización:

Boquillas neumáticas con dos fluidos:

$$Q = \frac{6.38K_s v^{1/2} \Delta t \omega_s}{D_{noz} \rho_s} \sqrt{\frac{\rho_s}{\omega_s v_a} * \frac{\omega_s + \omega_a}{\omega_a}}$$

Boquillas de presión con un fluido:

$$Q = \frac{10.98K_s v^{1/2} \Delta t}{D_m^2 \rho_s} D_s \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_s}}$$

Atomizadores de discos centrífugos:

$$Q = \frac{4.19K_s (R_1 - R_2)^2 \Delta t}{D_{noz}^2 \rho_s} \sqrt{\frac{\omega_s \rho_s}{rN}}$$

en donde Q = Velocidad de transferencia de calor al rocío, en BTU/h, K_f = Conductividad térmica de la película de gas que rodea a la gotita, en BTU/(h) (ft²) (°F/ft) evaluado a nivel promedio entre las temperaturas del gas y la gota, v = Volumen de la cámara, en ft³, Δt =Fuerza impulsora de la temperatura (en las condiciones terminales especificadas antes), en °F, D_{max} =Diámetro máximo de la gota, en ft, w_s =Velocidad másica del flujo de líquido, en lb/h, ρ_s = Densidad del líquido, en lb/ft³, w_a =Velocidad másica del flujo de aire de atomización, en lb/h, ρ_a =Densidad del aire de atomización, en lb/ft³, V_a =Velocidad del aire de atomización en el atomizador, en ft/h, D =Diámetro del orificio de descarga de la boquilla a presión, en ft/h, ρ_t = Densidad del gas, en las condiciones de salida en lb/ft³, R_c =Radio de la cámara, en ft, r =Radio del disco, en ft, N =Velocidad de rotación del disco, en rph.

Sección deshumidificadora: El separador de arrastre, es un elemento básico del depurador, porque la eficiencia de recolección de éste depende esencialmente de la eliminación total del rocío contenido en la corriente gaseosa.

Los rocíos generados en los depuradores son, por lo general, gotas con un diámetro bastante grande, que se pueden eliminar en forma adecuada por medio de separadores

por inercia bien diseñados. La recolección primaria de rocío constituye rara vez una limitación decisiva del rendimiento del separador, pero el arrastre es un problema común.

En su forma más sencilla, un separador por choque no es otra cosa que un blanco colocado frente a un canal de flujo, por ejemplo, un disco al final de un tubo. Para mejorar la eficiencia de la recolección se incrementa la velocidad del gas, de manera que al final forme una tobera.

Mamparas de choque.- Estos desviadores mejoran la eficiencia de recolección capturando las partículas de polvo que chocan contra ellos y que son capturados por la superficie mojada y después arrastradas por la película líquida en movimiento.

Además de mejorar la eficiencia de colección, estos dispositivos son útiles para dispersar en forma homogénea la corriente de gases a través del equipo e incrementar el tiempo de contacto del gas con el fluido de lavado.

No existe un parámetro que determine el número de mamparas requerido para un cierto tamaño de equipo, sin embargo, es común añadir tantos como sean necesarios sin que ello afecte el funcionamiento del mismo, es decir; siempre y

cuando no se incrementa en forma significativa la caída de presión de la corriente gaseosa a través del lavador. Es común colocar tantas mamparas como boquillas de rociado se tengan, así como un mínimo de dos en la sección de deshumidificación.

Ciclo del polvo: las partículas capturadas y húmedas, se sedimentan por gravedad en forma de gotitas en la superficie del depósito de agua. La gotita enseguida cae en el depósito de agua y deja libre al polvo que, como tiene un peso específico más alto que el del líquido de lavado, se sedimenta en el fondo para formar cieno que se extrae periódicamente.

Los métodos más comunes para extraer el cieno y el agua sucia son:

- Tanque de sedimentación
- Aclarador
- Clarificador
- Filtración continua
- Ciclones para líquidos
- Centrifugación continua
- Tratamiento químico

Ciclo del agua: la recirculación del agua tiende a obturar y erosionar las boquillas de los rociadores. Entre las soluciones más prácticas está el uso de boquillas especiales más gruesas y la filtración del líquido.

CAPÍTULO 4

DINAMICA DE LAS PARTICULAS

El estudio de los equipos de colección de partículas desde un punto de vista formal requiere el conocimiento de los principios de la mecánica, quien gobierna el movimiento de las partículas de aerosol. La trayectoria seguida por una partícula mientras está en movimiento en la zona de influencia de la fuerza(s) colectora(s) determina cuanto colisionará con el blanco de colección. Es necesario poder predecir esta ruta o trayectoria a fin de desarrollar modelos de colectores eficientes.

En ciertos tipos de colectores tales como lavadores y filtros, además es necesario determinar la interacción entre el fluido y los blancos individuales, por ejemplo, en los lavadores el elemento de captura son gotas de líquido de lavado en movimiento relativo no solo a las partículas de polvo sino también a la corriente de aire.

Siempre que existe un movimiento relativo entre una partícula y el fluido que la rodea, este ejercerá un

arrastre sobre la primera. La fuerza de arrastre ejercida sobre la partícula está dada por:

$$F = 3\pi\mu du \quad (1)$$

donde μ es la viscosidad del fluido, d es el diámetro de la esfera; y u es la velocidad del fluido relativo a la partícula. Esta relación fue obtenida por Stokes en 1851, quien resolvió la ecuación del movimiento hidrodinámico, es decir, la ecuación de Navier-Stokes.

La forma más satisfactoria de representar la relación entre la fuerza de arrastre y la velocidad es por el uso de dos grupos adimensionales:

El primer grupo es el Número de Reynolds de la partícula

$$Re_p = \frac{udp}{\mu} \quad (2)$$

El segundo, es el grupo $R/\rho u^2$, en el cual R es la fuerza por unidad de área de partícula proyectada en un plano perpendicular a la dirección del movimiento, para una esfera, el área proyectada es la de un círculo de igual diámetro que la esfera, por lo tanto:

$$R = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (3)$$

dividiendo la ecuación 3 por ρu^2 tenemos:

$$\frac{R}{\rho u^2} = \frac{4F}{\pi d \rho u^2} \quad (4)$$

$R/\rho u^2$, es una forma de coeficiente de arrastre denotada por el símbolo C'_r . Usualmente el coeficiente de arrastre se define como la relación de R a $\rho u^2/2$, es decir:

$$C_c = 2C'_r = \frac{2R}{\rho u^2} \quad (5)$$

de éste modo, cuando la fuerza de arrastre F esta dada por la ley de Stokes:

$$\frac{R}{\rho u^2} = \frac{12\mu}{\rho u d} = 12 \text{Re}^{-1} \quad (6)$$

las ecuaciones 1 y 6 sólo aplican a valores muy bajos del número de Reynolds.

La relación $R/\rho u^2$ y Re se expresa convenientemente en una gráfica logarítmica como se muestra en la figura 1. La gráfica se divide en cuatro regiones, para fines netamente prácticos. La región (b) es esencialmente una zona de transición entre la zona (a) donde aplica la Ley de Stokes, y la zona (c) donde $R/\rho u^2$ es casi constante:

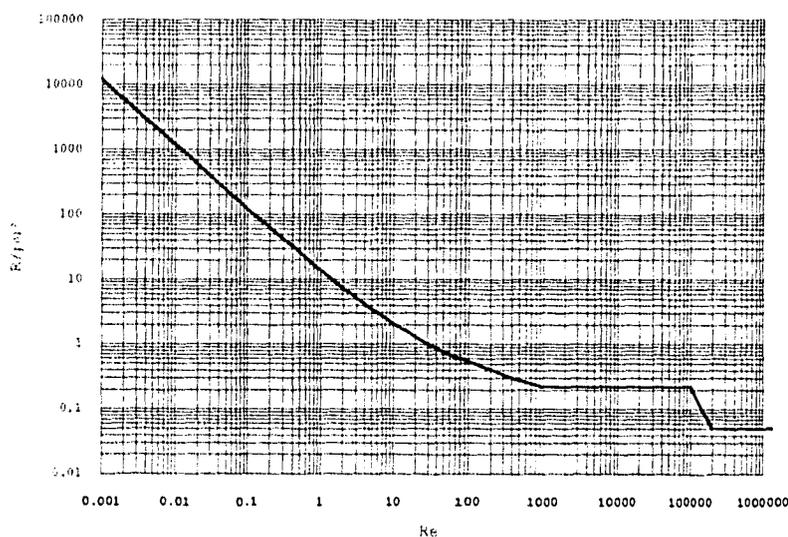
Región (a), $10^{-4} < Re < 0.2$

Sobre esta región, la relación esta dada por una línea recta de pendiente -1 en la figura, representada por la ecuación 4.

$$\frac{R}{\rho u^2} = 12 Re^{-1} \quad (6)$$

El límite 10^{-4} se debe a que no hay datos experimentales confiables a valores de Re más bajos, sin embargo, no hay razón para suponer que la ecuación no es aplicable a Re más bajos, únicamente debemos asegurarnos que las dimensiones de las partículas sean más grandes que la trayectoria libre media de las moléculas del fluido, de manera tal que el fluido se comporte como un continuo.

Gráfica 1



El límite superior, $Re=0.2$ corresponde a la condición donde el error aumenta cerca del 4% respecto a la aplicación de la Ley de Stokes.

Región (b), $0.2 < Re < 500-1000$

En esta zona, la pendiente de la curva cambia progresivamente de -1 a 0 conforme el Re incrementa. Algunos investigadores han sugerido ecuaciones aproximadas para el flujo en esta región intermedia, Dallavelle¹ propuso que

¹ Dallavelle, J.M.: Micromeritics, 2nd. de. (Pitman, 1948), citado en Richard F. C., 1990, Chemical Engineering, New York: McGraw-Hill, pag. 100.

$R/\rho u^2$ se compone de dos partes; la primera debida a la Ley de Stokes y la segunda es una constante debido a los efectos no viscosos:

$$\frac{R}{\rho u^2} = 12 \text{Re}^{-1} + 0.22 \quad (7)$$

Schiller y Naumann² por su parte, emplean la siguiente ecuación, con la cual se obtiene una aproximación razonable de números de Reynolds hasta de 1000.

$$\frac{R}{\rho u^2} = 12 \text{Re}^{-1} [1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}] \quad (8)$$

Siendo más estrictos, es posible caracterizar todavía más la región intermedia mediante el uso de las siguientes relaciones:

0.1 < Re < 0.5	$C_D = 24/\text{Re} + 4.5$
0.5 < Re < 3.0	$C_D = 24/\text{Re} + 3.60/\text{Re}^{0.548}$
400 < Re < 800	
3.0 < Re < 400	$C_D = 24/\text{Re} + 4/(\text{Re})^{0.4}$

² Schiller, L. y Naumann, A:Z. Ver deut Ing. 77 (1933). Über die grundlegenden Berechnungen der Schwerkraftaufbereitung, citado por Richard, Loc. Cit.

Región (c), $500-1000 < Re < ca\ 2 \times 10^5$

En esta región es aplicable la Ley de Newton y el valor de $R/\rho u^2$ es aproximadamente una constante, dando:

$$\frac{R}{\rho u^2} = 0.22 \quad (9)$$

Región (d), $Re > ca\ 2 \times 10^5$

Cuando el Re es mayor de 2×10^5 , el flujo en la capa límite cambia de una línea de corriente a turbulento.

$$\frac{R}{\rho u^2} = 0.05 \quad (10)$$

Khan y Richardson⁷ sugieren la siguiente correlación, entre $R/\rho u^2$ y Re válida para valores de Re de hasta 10^6 :

$$\frac{R}{\rho u^2} = [1.84 Re^{-0.45} + 0.293 Re^{-0.6}]^{0.45} \quad (11)$$

⁷ Citado en Richard F. C., 1990, Chemical Engineering, New York: McGraw-Hill, pag. 100.

La fuerza total en una partícula.

La fuerza sobre una partícula esférica puede expresarse usando las ecuaciones 6, 8, 9 y 10 para cada una de las regiones a, b, c, y d.

En la región (a):

$$R = 12\rho u^2 \cdot \frac{\mu}{ud\rho} = \frac{12\mu\mu}{d} \quad (12)$$

el área proyectada de la partícula es: $A=\pi d^2/4$, por lo tanto; la fuerza total en la partícula esta dada por:

$$F = \frac{12\mu\mu}{d} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 3\pi\mu du \quad (13)$$

esta es la expresión originalmente obtenida por Stokes.

En la región (b), de la ecuación 8 tenemos:

$$R = \frac{12\mu\mu}{d} (1 + 0.15 Re^{0.45}) \quad (14)$$

y lo tanto: $F = 3\pi\mu du(1 + 0.15 Re^{0.45}) \quad (15)$

$$\text{En la región (c): } R=0,22\rho u^2 \quad (16)$$

$$\text{y} \quad F = \frac{\pi d^2}{4} \cdot 0,22\rho u^2 = 0,055\pi d^2 \rho u^2 \quad (17)$$

esta relación es a menudo conocida como la Ley de Newton.

$$\text{En la región (d): } R=0,05\rho u^2 \quad (18)$$

$$F = \frac{\pi d^2 \rho u^2}{4} \quad (19)$$

De igual forma, usando la ecuación 11 que es válida sobre las primeras tres regiones (a), (b) y (c):

$$F = \frac{\pi d^2 \rho u^2}{4} (1,84 \text{Re}^{-0,6} + 0,293 \text{Re}^{0,6})^{0,45} \quad (20)$$

Velocidad terminal de caída

Si una partícula esférica se le permite sedimentar en un fluido bajo la acción de la fuerza de gravedad terrestre, esta incrementará su velocidad hasta que la fuerza de la

aceleración este exactamente balanceada por la fuerza de resistencia.

La fuerza de aceleración debida a la gravedad es:

$$F_g = \frac{\pi d^3 (\rho_s - \rho) g}{6} \quad (21)$$

donde ρ_s es la densidad del sólido.

La velocidad terminal de caída u_s , correspondiente a la región (a) esta dada por:

$$\frac{\pi d^3 (\rho_s - \rho) g}{6} = 3\pi \mu d u_s \quad (22)$$

$$u_s = \frac{d^2 (\rho_s - \rho) g}{18\mu}$$

La velocidad terminal de caída correspondiente a la región (c) esta dada por:

$$\frac{\pi d^3 (\rho_s - \rho) g}{6} = 0.055 \pi d^3 \rho u_s^2 \quad (23)$$

$$u_s^2 = \frac{3d(\rho_s - \rho)g}{\rho}$$

En estas expresiones, se han hecho las siguientes consideraciones:

1. La sedimentación no se ve afectada por la presencia de otras partículas en el fluido. Esta condición es conocida como "sedimentación libre", cuando la interferencia con otras partículas es apreciable, el proceso se conoce como "sedimentación obstruida".

2. El fluido puede considerarse como un medio continuo, esto es, la partícula es grande comparada con la trayectoria libre media de las moléculas del fluido, de otra manera las partículas podrían ocasionalmente "deslizarse" entre las moléculas y lograr así una velocidad mayor que la calculada.

3. Las paredes del recipiente contenedor no ejercen un efecto apreciable de retardo.

La metodología hasta aquí planteada para calcular la velocidad de caída libre es satisfactoria, ya que provee que ecuación podría usarse para calcular la fuerza de arrastre o el coeficiente de arrastre. Sin embargo, se ve que las ecuaciones dan el coeficiente de arrastre en términos del número de Reynolds de la partícula, $(Re_{sp}=u_s d \rho / \mu)$ el cual a su vez es función de la velocidad terminal de caída, (u_s) por calcularse.

El problema se resuelve de forma más efectiva mediante la generación de nuevos grupos adimensionales, que sean independientes de la velocidad de la partícula. La fuerza de arrastre por unidad de área proyectada de la partícula bajo condiciones de caída libre (R_s) esta dada por:

$$\frac{R_s \pi d^2}{4} = \frac{\pi d^3 (\rho_p - \rho) g}{6} \tag{24}$$

$$R_s = \frac{2d(\rho_p - \rho)g}{3}$$

esto es:

$$\frac{R_s}{\rho u_s^2} = \frac{2d(\rho_p - \rho)g}{3\rho u_s^2} \tag{25}$$

fácilmente vemos que el grupo adimensional $(R/\rho u_s^2) Re_s^2$ no incluye u_s , por lo tanto:

$$\begin{aligned} \frac{R_s}{\rho u_s^2} \cdot \frac{u_s^2 d^2 \rho^2}{\mu^2} &= \frac{2dg(\rho_s - \rho)}{3\rho u_s^2} \cdot \frac{u_s^2 d^2 \rho^2}{\mu^2} \\ &= \frac{2d^3(\rho_s - \rho)\rho g}{3\mu^2} \end{aligned} \quad (26)$$

el grupo $\frac{d^3(\rho_s - \rho)\rho g}{\mu^2}$, se conoce como Número de Galileo, Ga (o algunas veces como el Número de Arquímedes, Ar).

esto es:

$$\frac{R_s}{\rho u_s^2} Re_s^2 = \frac{2}{3} Ga \quad (27)$$

nuevamente, usando las ecuaciones 6, 8 y 9 para expresar $R/\rho u_s^2$ en términos del Re_s sobre el rango apropiado del números de Reynolds:

$$Ga = 18 Re_s \quad (Ga < 3.6) \quad (28)$$

$$Ga = 18 Re_s + 2.7 Re_s^{1.687} \quad (3.6 < Ga < ca. 10^5) \quad (29)$$

$$Ga = \frac{Re_s^2}{3} \quad (Ga > ca. 10^5) \quad (30)$$

$(R/\rho u_s^2) Re_s^2$ puede evaluarse si las propiedades del fluido y de la partícula son conocidos.

La metodología para determinar la velocidad de caída libre de una partícula es la siguiente: *primero* evaluamos la relación $(R/\rho u_s^2) Re_s^2$, *segundo* el valor del Re_s respectivo se halla con ayuda de la figura 2; *tercero* de la definición del Número de Reynolds calculamos la velocidad de sedimentación:

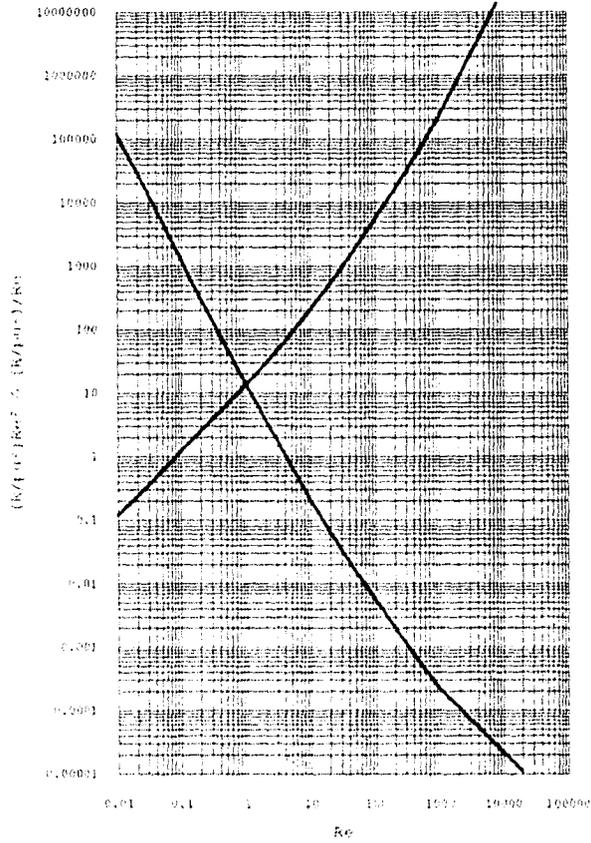
$$u_s = \frac{Re_s \mu}{\rho d} \quad (31)$$

Una forma alternativa fue propuesta por Schiller y Naumann, quien a partir de la ecuación 11 obtienen:

$$Re_s = (2.33Ga^{0.55} - 1.53Ga^{-0.419})^{1.75} \quad (32)$$

igual que antes, el número de Galileo es obtenido de las propiedades del fluido y de la partícula. El correspondiente valor de Re_g se calcula con la ecuación 32. finalmente determinamos u_g con la ayuda de la ecuación 31.

Gráfica 2



Cuando las partículas son muy pequeñas, es decir, cuando sus tamaños son del orden de la trayectoria libre media de las moléculas de gas, ya no puede aplicarse la suposición característica de los desarrollos anteriores de que el fluido puede ser considerado como un medio continuo. En este caso, las partículas muestran una tendencia a moverse más rápidamente de lo predicho por las teorías clásicas de la mecánica del continuo. Con objeto de tener en cuenta este aumento de velocidad, Cunningham calculó un factor de corrección de los modelos continuos basado en la teoría cinética de los gases. Por consiguiente, la ley de Stokes puede escribirse de nuevo de la siguiente forma:

$$F = \frac{3\pi\mu d u}{C} \quad (33)$$

donde el factor de corrección de Cunningham, C , viene dado por:

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1.257 + 0.4e^{-1.103\lambda/d}) \quad (34)$$

donde λ es la trayectoria libre media de las moléculas de gas dada por

$$\lambda = \frac{\mu}{0.499\rho\sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}} \quad (35)$$

la corrección debida a C alcanza un valor de 5%, aproximadamente, para partículas cuyo diámetro es de 5 μm y de un 6% para partículas cuyo diámetro es de 1 μm .

Sin embargo, para hacer uso de estas ecuaciones es necesario tener un parámetro de referencia, para ello utilizamos un grupo adimensional conocido como Número de Knudsen, Kn dado por:

$$\text{Kn} = 0.0226 \frac{\mu}{dP} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (36)$$

donde R es la constante universal de los gases (8.31×10^7 erg/K.mol), T es la temperatura en K, M es el peso molecular del fluido y P es la presión en atm. Si $\text{Kn} > 0.016$, es necesario calcular el factor de corrección de Cunningham, para ello debemos calcular la trayectoria libre media de las moléculas (partículas).

Efecto de los alrededores

Hasta ahora sólo se ha discutido el movimiento de una partícula esférica aislada en una extensión infinita de fluido. Si otras partículas están presentes en las vecindades de la esfera, la velocidad de sedimentación disminuirá, el efecto será más marcado conforme la concentración aumenta. Los factores principales que contribuyen a este fenómeno son: *primero*, conforme las partículas sedimentan desplazan un volumen igual de fluido, lo que conlleva a un aumento de flujo de líquido hacia arriba, *segundo*; la fuerza de flotación será influida debido a que la suspensión tendrá una densidad mayor a la del fluido. Finalmente, las trayectorias de flujo del líquido relativo a la partícula cambian y por tanto, los gradientes de velocidad se verán afectados.

La frontera del recipiente conteniendo al fluido en la que las partículas están sedimentándose también afectarán su velocidad, si la relación entre el diámetro de la partícula (d) y la del recipiente (d_r) es significativa, el movimiento de la partícula disminuirá; de aquí surgen dos efectos:

primero, como las partículas se mueven hacia abajo desplazan un volumen igual de líquido que debe subir a través de la región anular entre las partículas y la pared, segundo, el perfil de velocidad en el fluido será afectado por la presencia del límite del recipiente.

Efecto del movimiento del fluido

Si el fluido se está moviendo relativo a alguna otra superficie que la de la partícula, habrá una distribución de velocidad superimpuesta y el arrastre en la partícula será alterado. Esto es, si la partícula está situada en el eje de un tubo vertical en el cual fluye un fluido siguiendo las líneas de corriente, la velocidad cerca de la partícula será dos veces la velocidad media debido al perfil parabólico de la velocidad en el fluido. La fuerza de arrastre está determinada por la diferencia en las velocidades del fluido y de la partícula.

Movimiento de partículas y gotas

La fuerza de arrastre actuando sobre una burbuja o una gota de líquido en general, no es la misma que la de una

partícula esférica de igual forma y tamaño, debido a que las corrientes de circulación están hacia arriba de la burbuja. El gradiente de velocidad se ve disminuido y la fuerza de arrastre por lo tanto es menor que para una partícula rígida. Hadamard⁴, mostró que si el efecto de la energía superficial es despreciable, la velocidad terminal de sedimentación de una gota, como la calculada por la Ley de Stokes, debe multiplicarse por un factor Q para considerar la circulación interna:

$$Q = \frac{3\mu + 3\mu_1}{2\mu + 3\mu_1} \quad (37)$$

donde μ es la viscosidad del fluido continuo y μ_1 es la viscosidad del fluido formando la gota o burbuja. esta expresión sólo se aplica en el rango en el cual es válida la Ley de Stokes.

Si μ_1/μ es grande, Q tiende al valor de 1.5, esto significa que el efecto de la circulación es pequeño cuando gotas de líquido caen en un gas pero es grande cuando una burbuja de gas asciende por un líquido.

⁴ Citado por Richard F.C., Op. Cit.

Las gotas y burbujas, están sujetas a la deformación debido a las diferencias de presión que actúan en diversas partes de la superficie, esto es, cuando una gota esta cayendo en un fluido, tanto la presión hidrostática como la de impacto son más grandes en la cara de adelante que en la cara posterior y tenderán entonces a aplastar a la gota, mientras que el arrastre viscoso tenderá a estirarla. Las fuerzas que se oponen a la deformación de la gota son las fuerzas de tensión superficial, tal que gotas muy pequeñas mantienen su forma esférica mientras que las gotas grandes tienden a deformarse considerablemente aumentando la resistencia al movimiento.

Movimiento acelerado de una partícula en el campo gravitacional

El movimiento de una partícula a través de un fluido puede conocerse debido a que el valor del factor de arrastre $R/\rho u^2$ para un número de Reynolds dado es fijo. El comportamiento de una partícula bajo aceleración o desaceleración ha sido sujeto a gran cantidad de estudios pese a que las diferentes investigaciones no son

consistentes muestran que el factor de arrastre esta relacionado no sólo con el número de Reynolds sino también con la distancia que viaja una partícula desde el inicio de su movimiento.

Una aproximación relativamente simple del problema que da resultados muy cercanos a las medidas prácticas, es considerar que la masa del fluido da efectivamente la misma aceleración que la partícula. Esto es sólo una aproximación debido a que diferentes elementos del fluido a diferentes distancias de la partícula no podrán tener la misma aceleración. Para una partícula esférica esta opción o masa hidrodinámica es igual a la masa del fluido cuyo volumen es igual a un medio del de la partícula. La masa total de la partícula y del fluido asociado es conocida como masa virtual m' :

Es decir:

Masa virtual = Masa de la partícula + Masa adicional

Para una esfera:

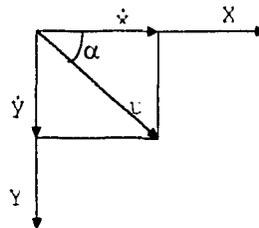
ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

$$m' = \frac{\pi d^3 \rho_s}{6} + \frac{\pi d^3 \rho}{12}$$

ó

$$m' = \frac{\pi d^3 \rho_s}{6} \left(1 + \frac{\rho}{2\rho_s} \right) = m \left(1 + \frac{\rho}{2\rho_s} \right) \quad (38)$$

Consideremos el movimiento de una partícula de masa m en el campo gravitacional terrestre, en cualquier tiempo t , la partícula se moverá con un ángulo α de lo horizontal con una velocidad u (figura 3). Esta velocidad u puede resolverse en sus dos componentes, \dot{x} y \dot{y} en las direcciones vertical y horizontal, (\dot{x} y \ddot{x} denotan la primera y segunda derivada del desplazamiento x en la dirección X con respecto al tiempo, \dot{y} y \ddot{y} son las correspondientes derivadas de y).



Ahora,

$$\cos \alpha = \frac{\dot{x}}{u} \quad (39)$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{\dot{y}}{u} \quad (40)$$

$$y \quad u = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (41)$$

Hay dos fuerzas actuando sobre el cuerpo:

En la dirección vertical, el peso aparente de la partícula:

$$W = mg \left(1 - \frac{\rho}{\rho_c} \right) \quad (42)$$

La fuerza de arrastre es igual a RA y actúa en una dirección tal que se opone al movimiento de la partícula, su dirección cambia conforme α varía, Aquí, A es el área proyectada de la partícula en un ángulo recto a la dirección del movimiento y su valor varía con la orientación de la partícula en el fluido. La fuerza de arrastre puede expresarse por la relación:

$$F = \frac{R}{\rho u^2} \cdot \rho u^2 A \quad (43)$$

esta fuerza tiene una componente en la dirección X que es:

$$\frac{R}{\rho u^2} \rho u^2 A \cos \alpha = \frac{R}{\rho u^2} A \rho \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (44)$$

y en la dirección Y

$$\frac{R}{\rho u^2} \rho u^2 A \sin \alpha = \frac{R}{\rho u^2} A \rho \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (45)$$

Las ecuaciones de movimiento en la dirección X y Y son por lo tanto:

$$m\ddot{x} = - \frac{R}{\rho u^2} A \rho \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (46)$$

y

$$m\ddot{y} = - \frac{R}{\rho u^2} A \rho \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} + mg \left(1 - \frac{\rho}{\rho_c} \right) \quad (47)$$

las ecuaciones 46 y 47 se refieren a la condición donde las partículas se están moviendo en el sentido positivo en la dirección X y en el sentido positivo (hacia abajo) en la dirección Y. Si la partícula se esta moviendo en la dirección X negativa, la forma de la solución permanece sin

cambio, excepto que los incrementos de X serán negativos. Sin embargo, si la partícula esta moviéndose inicialmente hacia arriba, únicamente el signo del término fraccional en la ecuación 47 cambia, y la forma de la solución en general, será diferente respecto al movimiento hacia abajo; debe entonces tenerse cuidado en la aplicación de la ecuación particularmente si un cambio de sentido ocurre durante el movimiento de la partícula.

Como podemos ver, el par de ecuaciones del movimiento para las direcciones X y Y deben resolverse simultáneamente; la solución, sin embargo, no es muy sencilla analíticamente excepto para movimiento en la región de aplicación de la Ley de Stokes.

Para una partícula esférica sabemos que:

$$m = \frac{\pi d^3 \rho_s}{6} \quad y \quad A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\therefore \ddot{x} = - \frac{R}{\rho u^2} \frac{3}{2d} \frac{\rho}{\rho_s} \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (48)$$

si ahora consideramos el efecto de la masa adicionada m' en la ecuación 46, es decir sustituimos m' por m ; tenemos lo siguiente:

$$\ddot{x} = - \frac{R}{\rho u^2} \frac{3}{d} \frac{\rho}{(2\rho_s + \rho)} \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (49)$$

de forma similar obtenemos:

$$\ddot{y} = \pm \frac{R}{\rho u^2} \frac{3}{2d} \frac{\rho}{\rho_s} \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} + g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (50)$$

e introduciendo la masa adicionada m' , llegamos a la siguiente expresion:

$$\ddot{y} = \pm \frac{R}{\rho u^2} \frac{3}{d} \frac{\rho}{(2\rho_s + \rho)} \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} + \frac{2g(\rho_s - \rho)}{(2\rho_s + \rho)} \quad (51)$$

donde el signo menos de la ecuación 50 y 51 se aplica por movimiento hacia abajo y el signo positivo para movimiento hacia arriba (hemos considerado que el signo positivo es hacia arriba).

Movimiento de una esfera en la región de la Ley de Stokes.

De la ecuación 6 tenemos:

$$\frac{R}{\rho u^2} = 12 \text{Re}^{-1} = \frac{12\mu}{d\rho\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (52)$$

sustituyendo en las ecuaciones 48, 49, 50 y 51, obtenemos:

$$\ddot{x} = -\frac{18\mu}{d^2\rho_s} \dot{x} = -a\dot{x} \quad (53)$$

$$\text{ó} \quad \ddot{x} = -\frac{36\mu}{d^2(2\rho_s + \rho)} \dot{x} = -a'\dot{x} \quad (54)$$

$$\ddot{y} = -\frac{18\mu}{d^2\rho_s} \dot{y} + g\left(1 + \frac{\rho}{\rho_s}\right) = -a\dot{y} + b \quad (55)$$

$$\text{ó} \quad \ddot{y} = -\frac{36\mu}{d^2(2\rho_s + \rho)} \dot{y} + \frac{2g(\rho_s + \rho)}{(2\rho_s + \rho)} = -a'\dot{y} + b' \quad (56)$$

para este caso en particular, las ecuaciones de movimiento para las direcciones X y Y son mutuamente independientes y por ende pueden integrarse separadamente, además, debido a que el término friccional es ahora función lineal de la

velocidad, el signo automáticamente se ajusta en función del movimiento, ya sea hacia arriba o hacia abajo.

Por el momento consideraremos el sistema formado por las ecuaciones 53 y 55, que no incluyen el efecto de la masa adicionada, de la ecuación 55 tenemos:

$$\dot{y} = -ay + bt + \text{constante}$$

los ejes se seleccionaran de manera tal que la partícula se encuentre en el origen en el tiempo $t=0$. Si el componente de la velocidad de la partícula en la dirección Y es v , entonces, cuando $t=0$, $y=0$ y $\dot{y}=v$; y la constante es por lo tanto v , es decir:

$$\dot{y} + ay = bt + v$$

$$\therefore e^{at}\dot{y} + e^{at}ay = (bt + v)e^{at}$$

es decir:

$$\begin{aligned}
 e^{at}y &= (bt + v) \frac{e^{at}}{a} - \int b \frac{e^{at}}{a} dt \\
 &= (bt + v) \frac{e^{at}}{a} - \frac{b}{a^2} e^{at} + \text{constante}
 \end{aligned}$$

cuando $t=0$, $y=0$; la constante = $\frac{b}{a^2} - \frac{v}{a}$, esto es:

$$y = \frac{bt}{a} + \frac{v}{a} - \frac{b}{a^2} + \left(\frac{b}{a^2} - \frac{v}{a} \right) e^{-at} \quad (57)$$

donde $a = \frac{18\mu}{d^2 \rho_s} \quad (58)$

y $b = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) g \quad (59)$

debemos notar que $b/a = u_s$, la velocidad terminal de sedimentación, esta ecuación da el desplazamiento de la partícula en la dirección Y, calculada a cualquier tiempo t.

Para la dirección X, la ecuación 53 es de la misma forma que la ecuación 55, con $b=0$. Sustituyendo $b=0$ y escribiendo w como la velocidad inicial en la dirección X, la ecuación 57 tiene la forma:

$$x = \frac{w}{a} (1 - e^{-at}) \quad (60)$$

por lo tanto, el desplazamiento en la dirección X también puede calcularse para cualquier tiempo t.

Eliminando t entre las ecuaciones 57 y 60, se obtiene una relación entre el desplazamiento en la dirección X y Y. Ecuaciones de esta forma son útiles para calcular la trayectoria de las partículas en equipos de separación de tamaños.

De la ecuación 60 tenemos:

$$e^{-at} = \left(1 - \frac{ax}{w}\right)$$

$$y \quad t = -\frac{1}{a} \ln\left(1 - \frac{ax}{w}\right) \quad (61)$$

finalmente, sustituyendo en la ecuación 57:

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{b}{a} \left\{ -\frac{1}{a} \ln \left(1 - \frac{ax}{w} \right) \right\} + \frac{v}{a} - \frac{b}{a^2} + \left(\frac{b}{a^2} - \frac{v}{a} \right) \left(1 - \frac{ax}{w} \right) \\
 &= -\frac{b}{a^2} \ln \left(1 - \frac{ax}{w} \right) - \frac{bx}{aw} + \frac{vx}{w}
 \end{aligned} \tag{62}$$

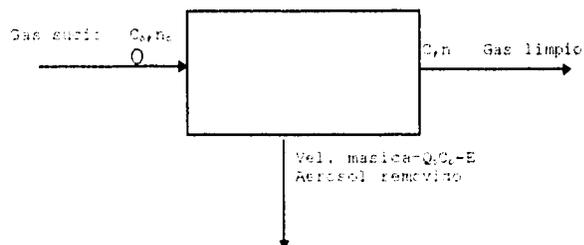
los valores de a y b pueden sustituirse para dar la relación final:

$$y = -\frac{g\rho_s(\rho_s - \rho)}{324\mu^2} \left\{ \ln \left(1 - \frac{18\mu x}{w\rho_s d} \right) + \frac{18\mu x}{w\rho_s d} \left(1 - \frac{18v\mu}{d^2(\rho_s - \rho)g} \right) \right\} \tag{63}$$

CAPÍTULO 5
EFICIENCIA DE CAPTURA

Expresiones de la efectividad de colección

El éxito de una operación de colección de partículas se expresa en términos de la cantidad de aerosol removido de la corriente de aire o en términos de la cantidad que se permita mantener en esta. Para desarrollar las expresiones de efectividad de colección, considere la siguiente figura:



donde Q es la velocidad de flujo de la corriente de gas [m/min, cfm], c es la masa de aerosol por unidad de volumen

[g/m³, gr/ft³], n es el número de partículas de aerosol por unidad de volumen de gas [m⁻³, ft⁻³], E es la velocidad de emisión de aerosol no colectado [g/min, lb/hr]. El subíndice (o) se refiere a condiciones de entrada.

Eficiencia total

Se han definido las siguientes eficiencias totales de colección usadas para diferentes propósitos, en todas las definiciones se considera que Q=Q_o.

a) Eficiencia de colección, por masa (másica)

$$\eta_k = \frac{C_c - C}{C_o} = \frac{Q_c C_o - E}{Q_o C_o} = 1 - \frac{E}{Q_o C_o} = \frac{C}{Q_o C_o} \quad (1)$$

b) Eficiencia de colección, por área superficial de partícula

$$\eta_k = \frac{\text{Area superficial de partículas colectadas}}{\text{Area superficial total de partículas colectadas}} \quad (2)$$

c) Eficiencia de colección, por número de partículas

$$\eta_k = \frac{n_c - n}{n_o} = \frac{Q_c n_o - Qn}{Q_o n_o} \quad (3)$$

estas eficiencias dependen principalmente de d_p^3 , d_p^2 y d_p respectivamente, donde d_p representa el tamaño de la partícula. La determinación de estas cantidades depende de la técnica disponible para medir el número de partículas, su área o su masa. Experimentalmente, la eficiencia total de colección por masa es la más usada por la facilidad de medición.

Otros conceptos igualmente importantes son:

a) La penetración, definida por:

$$P = \frac{E}{Q_o C_o} = \frac{C}{C_o} = 1 - \eta_M \quad (4)$$

b) El factor de descontaminación,

$$FD = \frac{C_o}{C} = \frac{1}{P} \quad (5)$$

c) El índice descontaminación,

$$ID = \log(FD) = \log\left(\frac{1}{P}\right) \quad (6)$$

finalmente, el número de unidades de transferencia esta dado por:

$$NTU = \ln\left(\frac{1}{P}\right) = 2.30(ID) \quad (7)$$

Eficiencia fraccional

La relación entre la eficiencia de colección y el tamaño de partículas para partículas de un tipo dado siendo tratados en un colector es llamado el grado de eficiencia o eficiencia fraccional, ($\eta_i=f(d_i)$), donde d_i representa el tamaño de un partícula individual de cierto tipo, indicado por el subíndice i , tipo se refiere a partículas de cierta densidad, forma y composición, por tanto, el grado de eficiencia de i es la eficiencia con la cual son colectadas partículas de cierto tipo en función de su tamaño.

a) Eficiencia másica,

$$\eta_w = \frac{\sum_i n_i d_i^3 - \sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^3} * 100 \quad (8)$$

b) Eficiencia superficial,

$$\eta_s = \frac{\sum_0^i n_c d_i^2 - \sum_0^i n d_i^2}{\sum_0^i n_c d_i^2} * 100 \quad (9)$$

c) Eficiencia ponderal,

$$\eta_w = \frac{\sum_0^i n_c d_i - \sum_0^i n d_i}{\sum_0^i n_c d_i} * 100 \quad (10)$$

d) Penetración,

$$P = 1 - \eta_w \quad (11)$$

e) Velocidad de emisión,

$$E = PQ_c C_c \quad (12)$$

Un punto de especial interés en la función de eficiencia fraccional es aquel en el cual $\eta_i=0.50$. El tamaño de partícula en este punto es llamado tamaño de corte o diámetro de corte, y representa el tamaño de partícula que será capturado con una eficiencia del 50 %, es decir,

partículas con tamaño mayor al diámetro de corte serán capturadas con mayor eficiencia.

Eficiencia de captura simple

El término captura aerodinámica se usa para referirse a la colisión de partículas con la superficie de un blanco, debido a la inercia o alguna otra causa. Por otra parte, el término eficiencia simple de captura o eficiencia fraccional (η_s), se define como la fracción de partículas de un tamaño dado d_p en la corriente que colisiona con el blanco. Dichas colisiones son debidas a los siguientes mecanismos:

- a) Impacto inercial
- b) Intercepción directa
- c) Fuerzas de difusión

Los intervalos de tamaños de partículas, en los que los diferentes mecanismos de eliminación tienen mayor importancia, son:

Impacto inercial:	> 1 μm
Intercepción directa:	> 1 μm
Difusión:	0.001 a 0.5 μm

partículas con tamaño mayor al diámetro de corte serán capturadas con mayor eficiencia.

Eficiencia de captura simple

El término captura aerodinámica se usa para referirse a la colisión de partículas con la superficie de un blanco, debido a la inercia o alguna otra causa. Por otra parte, el término eficiencia simple de captura o eficiencia fraccional (η_{s1}), se define como la fracción de partículas de un tamaño dado d_1 en la corriente que colisiona con el blanco. Dichas colisiones son debidas a los siguientes mecanismos:

- a) Impacto inercial
- b) Intercepción directa
- c) Fuerzas de difusión

Los intervalos de tamaños de partículas, en los que los diferentes mecanismos de eliminación tienen mayor importancia, son:

Impacto inercial:	> 1 μm
Intercepción directa:	> 1 μm
Difusión:	0.001 a 0.5 μm

para propósitos de este trabajo, solo las dos primeras son de interés por ser estos mecanismos los predominantes en el rango de partículas manejadas por el Lavador de Gases.

Captura por impacto inercial

De los mecanismos de captura aerodinámica de partículas (especialmente para partículas con $d_p \geq 1$ micron), la debida al impacto inercial es definitivamente la más común y que ha recibido la mayor cantidad de estudios, en parte por su aplicación a los equipos de lavado y filtros así como por el manejo relativamente simple de variables.

Para determinar la eficiencia de captura por impacto inercial, $\eta_{i,i}$, es necesario resolver el par de ecuaciones diferenciales dados en el capítulo 4 (ecuaciones 53 y 54), con el fin de encontrar la trayectoria límite de captura. En seguida, la eficiencia se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta_{i,i} = \frac{\text{Area de sección transversal de corriente de gas}}{\text{Area de sección transversal del blanco de captura}} \quad (13)$$

Para una forma particular de blanco y perfil de velocidad, el valor de $\eta_{i,i}$ se encuentra en general como función del número de Reynolds y el número de Stokes, o solo

como función del número de Stokes en el caso de flujo potencial, así:

Para impacto inercial en blancos esféricos, se tiene la relación de Herne¹ modificada por Knettih and Beeckmans²

$$\eta_{II} = 0.00376 - 0.464Stk + 9.68Stk^2 + 16.2Stk^3 \quad (14)$$

donde $0.0416 \leq Stk \leq 0.30$ y

$$\eta_{II} = \frac{Stk^2}{(Stk + 0.25)^2} \quad (15)$$

para $Stk > 0.3$. Finalmente, el número de Stokes esta dado por:

$$Stk = \frac{v_o \rho_f d_p^2}{18\mu D} \quad (16)$$

¹ H. Herne, Int. J. of Air Poll., 3: 26, (1960)

² E. Knettig and J.M. Beeckmans, Aerosol Sci., 5: 235, (1974).

Captura por intercepción directa

Cuando la partícula es relativamente grande comparada con el tamaño del colector, la colección puede realizarse por intercepción directa. Esta intercepción puede llevarse a cabo en dos casos:

1.- La inercia de la partícula es tal que esta se mueve en línea recta, $Stk \rightarrow \infty$. Por tanto, todas las partículas que pasen a una distancia $d_p/2$ del blanco serán capturadas; para blancos esféricos se tiene

$$\eta_{D1} = \left(\frac{d_p}{D} \right)^2 \quad (17)$$

2.- La partícula no posee masa y se mueve en línea recta, $Stk \rightarrow 0$, al igual que en el punto anterior, las partículas que pasen a $d_p/2$ del blanco serán capturadas, para blancos esféricos la relación es:

$$\eta_{D2} = (1 + R)^{-2} - 1 / (1 + R) \quad (18)$$

donde $R = d/D$.

Cuando la captura aerodinámica ocurre debido a la acción simultánea de uno a más mecanismos, la captura total fraccional se estima tomando la penetración neta, es decir, el producto de la penetración resultante de cada uno de los mecanismos que actúan

$$P_t = P_{I1} * P_{D1} * \dots \quad (19)$$

esto es equivalente a tener:

$$\eta_{t_i} = 1 - (1 - \eta_{I1}) (1 - \eta_{D1}) \dots \quad (20)$$

se ve claramente que la eficiencia total no es igual a la suma de las eficiencias de cada mecanismo actuando separadamente.

Eficiencia de captura en grupos

La principal modificación del comportamiento de blancos aislados causada por la presencia de blancos vecinos es la trayectoria de flujo del fluido alrededor del blanco, este tiene efecto no solo en la eficiencia de captura aerodinámica sino también en la caída de presión del gas que esta fluyendo a través del grupo de blancos.

En principio, la eficiencia de captura simple podría usarse para grupos de igual forma que para blancos aislados excepto por el uso de la trayectoria modificada.

La eficiencia total de un grupo completo de blancos debe relacionarse con la eficiencia de blancos aislados y con el número de blancos presentes.

Consideremos un grupo de N_T blancos por unidad de volumen, cada blanco tiene un área proyectada de A_T en la dirección del flujo. En una sección transversal de área unitaria de espesor dL , habrá un total de $N_T \cdot dL$ blancos y $A_T N_T \cdot dL$ de área total proyectada. Considerando que todos los blancos son iguales y están arreglados en forma regular. Aplicando la eficiencia total de captura de blancos aislados, η_T si se aproximan n_v partículas por unidad de tiempo cuya reducción será de $v_c \cdot dn$ tenemos:

$$-v_c \cdot dn = n_v \cdot \eta_T \cdot A_T \cdot N_T \cdot dL \quad (21)$$

además considerando que η_T , A_T , N_T y ϵ son constantes, la integración da la eficiencia total de captura del grupo de blancos sobre el volumen unitario $A_T \cdot dL$:

$$-\int_{n_c}^n \frac{dn}{n} = \frac{\eta_T A_T N_T}{\varepsilon} \int_0^L dL \quad (22)$$

sabemos tambien: $P = 1 - \eta_M = \frac{n}{n_0} \quad (23)$

$$\therefore -\ln(P) = \frac{\eta_T A_T N_T L}{\varepsilon} \quad (24)$$

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{\eta_T A_T N_T L}{\varepsilon}\right] \quad (25)$$

la cantidad adimensional $A_T N_T L / \varepsilon$ se llama el factor de solidaridad, S del grupo; para un grupo de blancos esféricos cada uno de diámetro D, tenemos:

$$A_T = \frac{\pi D^2}{4} \quad (26)$$

$$N_T = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\pi D^3} \quad (27)$$

donde ε , es la porosidad, por lo tanto:

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{3(1 - \varepsilon)\eta_T L}{2\varepsilon D}\right] \quad (28)$$

y $S = \frac{3(1 - \varepsilon)L}{2\varepsilon D} \quad (29)$

cuando los elementos del grupo están suficientemente alejados uno del otro, como las gotas en un lavador, no es necesario considerar el efecto de interacción, es decir $\epsilon=1$.

CAPÍTULO 6

MODELADO

El modelo es un dispositivo o medio que tiene características que sirven para predecir el rendimiento o funcionamiento de un "prototipo". A su vez, el prototipo es el sistema físico a escala completa que se desea modelar. Existen dos tipos generales de modelos:

1. Modelos físicamente similares que difieren del prototipo sólo por la escala.
2. Modelos físicamente disímbolos, como los de índole matemática y los análogos eléctricos.

Para obtener las ecuaciones que representen el comportamiento de un Lavador de Gases, podemos proceder en cualquiera de las dos formas siguientes: (a) por el estudio de los fundamentos del movimiento de las partículas o, (b) por el análisis empírico de datos experimentales. En nuestro estudio abordaremos el problema desde un punto de vista

CAPÍTULO 6

MODELADO

El modelo es un dispositivo o medio que tiene características que sirven para predecir el rendimiento o funcionamiento de un "prototipo". A su vez, el prototipo es el sistema físico a escala completa que se desea modelar. Existen dos tipos generales de modelos:

1. Modelos físicamente similares que difieren del prototipo sólo por la escala.
2. Modelos físicamente disímbolos, como los de índole matemática y los análogos eléctricos.

Para obtener las ecuaciones que representen el comportamiento de un Lavador de Gases, podemos proceder en cualquiera de las dos formas siguientes: (a) por el estudio de los fundamentos del movimiento de las partículas o, (b) por el análisis empírico de datos experimentales. En nuestro estudio abordaremos el problema desde un punto de vista

netamente teórico, es decir, a partir del estudio de la dinámica de las partículas.

Modelado

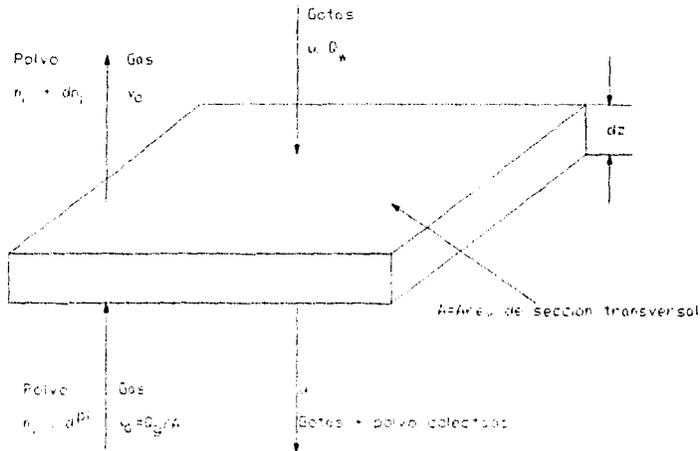
Para obtener el modelo de ecuaciones que representen el comportamiento de un lavador de gases debemos primero fijar algunos parámetros de diseño a efecto de facilitar y/o comprender el fenómeno.

Antes de listar los parámetros de diseño considerados en el modelado, es preciso tener una visión clara del objeto sobre el cual se aplican dichos parámetros, para tal fin considerese una sección transversal del equipo de espesor diferencial como el que se muestra en la figura siguiente:

Parámetros de diseño: El modelo se desarrolla bajo las siguientes consideraciones:

- a) Las gotas del líquido de lavado son del mismo tamaño, $\text{diámetro}=D$, y están cayendo a su velocidad terminal u_{sd} relativo al gas. Esto es, la velocidad de las gotas relativo al lavador es: $u=(u_{s1}-v_0)$.

- b) La concentración de las gotas es suficientemente baja, tal que cada gota puede considerarse que actúa independientemente, es decir, como si fuese la única presente.



- c) La cantidad total de líquido de lavado fluyendo a un flujo volumétrico Q_0 está distribuido uniformemente a través del área de sección transversal A por tanto, el número de gotas que entran a la sección por unidad de tiempo es:

$$N_g = \frac{6Q_0}{\pi D^3 A} \quad (1)$$

- d) Las partículas de polvo son arrastradas a una velocidad de $(v_c - u_{st,i})$, relativa al lavador, donde $u_{st,i}$ es la velocidad terminal de sedimentación de las partículas de polvo de i-esimo grado.
- e) La concentración de polvo de grado i-esimo es uniforme en cualquier punto del lavador.
- f) De acuerdo a la definición de eficiencia de captura simple η_{ii} , cada gota colecta, por unidad de tiempo, un número de partículas igual a:

$$\eta_{t,i} = \frac{(u_{sd} - u_{st,i}) \eta_{ii} \pi D^2}{4} \quad (2)$$

donde $\eta_{ii} = f(\text{Stk}_i, \text{Re}, \text{etc.})$.

- g) El tiempo requerido para que una gota atraviese la sección transversal de espesor dz es igual a:

$$\frac{dz}{u} = \frac{dz}{(u_{sd} - v_c)} \quad (3)$$

Una vez definidos los parámetros de diseño, podemos realizar un balance de materia sobre la sección transversal,

a fin de determinar la colección total de partículas que se lleva a cabo en dicha sección.

Flujo contra-corriente

La colección de partículas que se lleva a cabo en esta sección es:

$$-dn_i \frac{Q_i}{A} = \frac{6Q_i}{\pi D^3 A} \eta_{t,i} \frac{\pi D^2}{4} (u_{sd} - u_{si}) n_i \frac{dz}{u} \quad (4)$$

reordenando tenemos:

$$-\int_{n_{i,1}}^{n_{i,2}} \frac{dn_i}{n_i} = \frac{3\eta_{t,i}}{2D} \int_0^H \left(\frac{u_{sd} - u_{si}}{u_{sd} - v_c} \right) dz \quad (5)$$

Integrando bajo la consideración que las cantidades en el lado derecho son constantes e independientes de Z, obtenemos la eficiencia total de colección:

$$\eta_{t,i} = 1 - \exp \left[- \frac{3}{2} \left(\frac{u_{sd} - u_{si}}{u_{sd} - v_c} \right) \frac{Q_i}{Q_d} \frac{H}{D} \eta_{t,i} \right] \quad (6)$$

donde H, es la altura.

Flujo cruzado

Procediendo de forma similar a la sección de flujo a contra corriente desarrollaremos un modelo para flujo cruzado horizontal, consideraciones similares son hechas excepto que $v_c=0$ en la dirección vertical, además la velocidad terminal de las partículas es mucho menor que la de las gotas del líquido de lavado, $U_{S_i} \ll U_{S_d}$, por lo tanto la expresión 45 se reduce a:

$$-\int_{n_{i0}}^{n_i} \frac{dn_i}{n_i} = -\frac{3\eta_i}{2D} \int_0^z dz \quad (7)$$

integrando y considerando que $(n_i/n_{i0})=1-\eta_{S_i}$, y $z=(Q_i/Q_g)L$ llegamos a la expresión que nos señala la eficiencia de colección total en el lavador de gases, para partículas de tamaño i es:

$$\eta_{S_i} = 1 - \exp\left(-\frac{3\eta_i}{2D} \frac{Q_i}{Q_g} L\right) \quad (8)$$

La relación anterior, expresa claramente que η_{S_i}/D no tiene un valor máximo con respecto a D , sin embargo, incrementa conforme D disminuye.

Flujo paralelo

Para este caso, la ecuación obtenida es la misma que para flujo cruzado salvo que se reemplaza L, por H la altura.

$$\eta_{s_i} = 1 - \exp\left(-\frac{3\eta_{t_i}}{2D} \frac{Q_i}{Q_g} H\right) \quad (9)$$

Finalmente, en el capítulo 5 vimos que la eficiencia total del equipo esta dado por la siguiente expresión:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{s_i}^{FC})(1 - \eta_{s_i}^{CC})(1 - \eta_{s_i}^{FP}) \dots \quad (10)$$

donde $\eta_{s_i}^{FC}$, es la eficiencia de colección de partículas de tamaño y en la sección de flujo cruzado, $\eta_{s_i}^{FP}$ corresponde a la sección de flujo paralelo y $\eta_{s_i}^{CC}$ a la de flujo a contra corriente.

La relación L/G.

Este modelo introduce la relación de flujo líquido-gas, que es de vital importancia en la eficiencia de cualquier lavador. Esta relación puede expresarse en términos de la velocidad de flujo másico de líquido (M_l) dividido por la velocidad de flujo másico del gas (M_g); sin embargo, por

conveniencia es común expresarlo en términos del volumen equivalente tomados a las condiciones actuales de entrada, esto es:

$$\frac{M_i}{M_g} = \frac{\rho_l Q_l}{\rho_g Q_g} \quad (11)$$

para el sistema aire-agua a 20°C, $\rho_l / \rho_g = 1/1.205 \times 10^{-3} = 830$. Por lo tanto, es también práctica común expresar Q_l/Q_g en galones de líquido por mil pies cúbicos actuales de gas, a las condiciones de entrada. Esto es, a lo que comunmente se llama relación L/G. La experiencia muestra que L/G cae típicamente en el rango de 2-20 gal por 1000 ft³ o 0.27-2.7 l/m³ (1 gal/ft³ = 0.1337 l/m³). Esta relación es directamente proporcional al número de gotas por unidad de volumen de gas: $6Q_l/\pi D^3 Q_g = 2.553 \times 10^6$ L/G D³ gotas/cm³, donde D, debe estar en micras.

Requerimientos de energía

La energía requerida para operar un sistema de colección de polvos es de dos tipos: (a) el trabajo requerido para mover la corriente de aire sucio a través del equipo y, (b) la energía adicional para formar la fuerza de colección utilizada. El primer tipo es debido a la pérdida

por fricción de la corriente de flujo a través del equipo, el segundo puede ser eléctrico como en un precipitador electrostático, calorífico como en un colector térmico u otro trabajo mecánico como bombeo del fluido de lavado en los lavadores, sacudimiento como en los filtros, etc.

El segundo tipo en ocasiones no es tan importante, sin embargo, el primero siempre esta presente y es necesario estimar la caída de presión de la corriente de aire cuando este fluye a través del sistema y calcular la correspondiente pérdida de potencia que es necesario proveer al ventilador que mueve la corriente.

$$\text{Pérdida de potencia} = \frac{Q \cdot \Delta P}{33000}, \text{ [hp]} \quad (12)$$

donde Q es la velocidad de flujo en ft³/min y ΔP es la caída de presión total en lb_f/ft².

$$\begin{aligned} \text{Pérdida de potencia} &= 1.58 \times 10^{-4} Q \cdot \Delta P'', \quad \text{[hp]} \\ & \quad (13) \\ \text{Pérdida de potencia} &= 1.18 \times 10^{-4} Q \cdot \Delta P'', \quad \text{[kw]} \end{aligned}$$

donde ΔP'' esta en pulgadas de agua.

Para determinar la pérdida de energía por fricción, realizamos un balance de energía a través del equipo de colección:

$$\Delta \left(\frac{V^2}{2g_c} \right) + \frac{\Delta P}{\rho_f} + \frac{g\Delta Z}{g_c} = W_s - F \quad (14)$$

cada término representa energía por unidad de masa de la corriente de fluido. El término delta (Δ), indica la diferencia entre un punto en el ducto de salida, inmediatamente después del colector, y un punto en la entrada del mismo. Si el ducto tiene aproximadamente la misma área de sección transversal $\Delta(V^2)=0$, y si esta casi a la misma elevación $\Delta Z=0$; además, como no hay trabajo intercambiado entre la corriente de gas y sus alrededores $W_s=0$, por tanto, la ecuación se reduce a:

$$\frac{\Delta P}{\rho_f} = -F \quad (15)$$

evaluando F como un múltiplo de la velocidad de cabeza $V_c^2/2g_c$, tenemos $F=N_f V_c^2/g_c$, donde N_f es llamado el número de velocidad de cabeza de entrada, $N_f=f(L/D)$; finalmente la expresión queda de la siguiente manera

$$\Delta P = \frac{-\rho_f N_f V_c^2}{2g_c} \quad (16)$$

Para lavadores húmedos es necesario, además, la energía requerida para el bombeo del líquido de lavado, la forma de la ecuación es similar a (I), excepto que ΔP esta en lb_f/in^2 y Q en gal/min.

$$\begin{aligned} \text{Pérdida de potencia} &= 5.83 \times 10^{-4} Q \cdot \Delta P, \quad [\text{hp}] \\ & \hspace{15em} (17) \\ \text{Pérdida de potencia} &= 4.35 \times 10^{-4} Q \cdot \Delta P, \quad [\text{kw}] \end{aligned}$$

Si existe pérdida de líquido en el proceso, este puede expresarse como un equivalente al consumo de potencia:

$$\text{Perd. de pot. equiv.} = 60Q_w \left(\frac{\$}{\text{gal}} \left(\frac{\text{Kw} - \text{hr elect.}}{\$} \right) \right), \quad [\text{Kw}] \quad (18)$$

donde Q_w es el agua consumida, gpm; $\$/\text{gal}$ es el costo del líquido de lavado y $\$/\text{Kw-hr}$ es el costo de la electricidad. Por lo tanto, el consumo total de potencia de un lavador esta dado por la suma de (13), (17) y (18).

$$\text{Potencia total} = (13) + (17) + (18) \quad (19)$$

CAPÍTULO 7

DIMENSIONAMIENTO

En general, el diseño de cualquier equipo de proceso requiere el conocimiento exhaustivo tanto de los materiales que entran como los que de él salen, esto sin embargo; no es todo pues se requiere también conocer las condiciones de las corrientes (temperatura, presión, composición), a fin de disponer de la mayor cantidad de información para un diseño óptimo.

"...el diseño ingenieril se puede definir como un proceso de toma de decisiones que requiere un conocimiento amplio e integrado (tanto técnico como de diversa índole), una experiencia práctica y frecuentemente una imaginación creativa. Por lo común, se tiene más de un diseño posible para un problema dado de ingeniería. Sin embargo, para que un diseño resulte viable, además de ser científicamente adecuado deberá ser compatible con los requisitos de confiabilidad, de costo, de

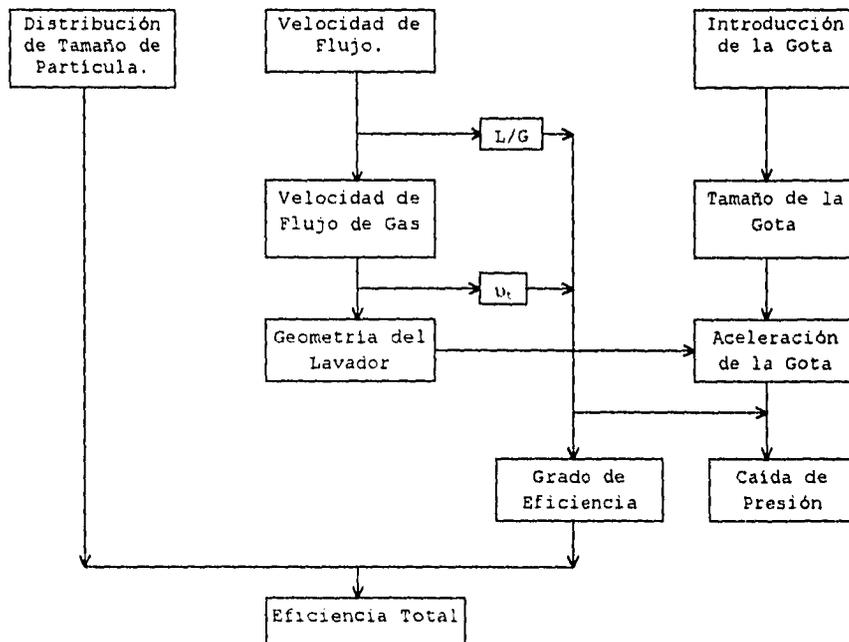
espacio y de protección al medio ambiente. En realidad, la selección final de un diseño casi siempre se basa, en buena medida, en procedimientos de análisis y síntesis, teniendo en cuenta muchos factores de importancia, algunos de los cuales pueden ser de naturaleza completamente diferente a la técnica¹ ...”

Modelar un equipo de proceso no es fácil puesto que requiere probar el modelo tantas veces como variables susceptibles de cambio se tenga. Para lograr el objetivo proponemos el siguiente esquema de trabajo, el cual es relativamente flexible en cuanto al orden de manipulación de las variables cambiantes. Antes de presentar el algoritmo es necesario mencionar que se precisa el conocimiento de las siguientes propiedades:

Propiedad	Gas	Partícula	Liq. de lavado
Temperatura	•		•
Presión	•		•
Densidad	•	•	•
Viscosidad	•		•
Velocidad	•		•
Flujo	•		•
Diametro		•	•
Composición		•	

¹ Francis F. Huanzi: Ingeniería Termodinámica, fundamentos y aplicaciones, ed. CECOSA, México, 1992.

La interacción de los parámetros de diseño independientes (geometría del lavador, introducción del líquido) y de operación (relación L/G, velocidad del gas), se muestra en la siguiente figura:



A continuación se presenta una secuencia completa de cálculo, útil en el modelado del Lavador de Gases; se determina tanto la dimensión, la forma del equipo, así como los requerimientos de energía y su eficiencia.

DATOS			
Propiedad	Fluido	Partícula	Liq. de Lavado
Temperatura (K)	293		
Presión (atm)	1		
Densidad (g/cm ³)	1.205E-3	0.6	1.0
Viscosidad (g/cm.s)	1.816E-4		
Diámetro		Varios	D _{max}
Flujo (m ³ /s)	2.83		
ΔP	10 inH ₂ O		20 lb/in ²

1. En primer lugar, determinaremos la velocidad terminal de sedimentación de las partículas, para ello usaremos las siguientes ecuaciones:

$$A) Ga_p = \frac{d^3 \rho (\rho_s - \rho) g}{\mu^2}$$

$$B) Re_p = \left(2.33 Ga_p^{0.018} - 1.53 Ga_p^{-0.016} \right)^{13.3}$$

$$C) u_{t,p} = \frac{\mu Re_p}{d\rho}$$

$$Ga_p = \frac{(5 \times 10^{-4} \text{ cm})^3 (1.205 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3) (0.6 - 1.205 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3) * 981 \text{ cm/s}^2}{(1.816 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s})^2}$$

$$Ga_p = 2.683 \times 10^{-3}$$

$$Re_p = \left[2.33 (2.683 \times 10^{-3})^{0.018} - 1.53 (2.683 \times 10^{-3})^{-0.016} \right]^{13.3} = 7.65 \times 10^{-4}$$

$$u_{sp} = \frac{(1.816 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{s})(7.65 \times 10^{-6})}{(5 \times 10^{-4} \text{ cm})(1.205 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3)} = 2.31 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

d_p	0.0005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010
G_{ap}	0.0027	0.0215	0.1717	0.5795	1.3737	2.6829	4.6361	7.3520	10.9894	15.6470	21.4636
Re_p	0.0000	0.0003	0.0063	0.0278	0.0727	0.1470	0.2549	0.3996	0.5834	0.8082	1.0753
u_{sp}	0.0023	0.0498	0.4778	1.3956	2.7389	4.4295	6.4013	8.6021	10.9903	13.5333	16.2048

2. Como siguiente paso, es importante definir el tipo de boquilla que deberá usarse para generar las gotas y desde luego el tamaño de éstas. Utilizaremos boquillas de presión; por requerir de poca energía.

$$D) D_{vth} = \frac{500}{\sqrt{\Delta P}}$$

$$E) D_{max} = 3D_{vth}$$

en la literatura hallamos que las caídas de presión recomendadas son del orden de 1.4 a 7.3 atm (20 a 100 psig), por lo tanto:

$$D_{vth} = \frac{500}{\sqrt{20}} = 184 \mu\text{m}$$

$$D_{max} = 3 \cdot 184 \times 10^{-4} = 552 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

ΔP	20	30	40	60	80	70	80	90	100
D_{vm}	184	161	146	136	128	121	116	112	108
D_{max}	553	483	439	407	383	364	348	335	323

también, es necesario conocer la velocidad de sedimentación de las gotas, recordando que esta debe ser cuando menos dos veces más grande que la velocidad de entrada del fluido (corriente de gas), para evitar el arrastre e inundación del equipo. Utilizando las mismas relaciones que en la etapa 1 tenemos:

D_{max}	0.0553	0.0483	0.0439	0.0407	0.0383	0.0364	0.0348	0.0335	0.0323
G_{ad}	6041	4028	3021	2417	2014	1726	1510	1343	1208
Re_d	83.14	63.18	51.85	44.40	39.07	35.03	31.86	29.28	27.14
u_{sd}	226.73	197.24	178.15	164.33	153.66	145.06	137.92	131.84	126.59

nuevamente, en la literatura² encontramos que las velocidades recomendadas son: $u_{sd} = 150$ a 213 cm/s. En este caso elegimos el valor más alto, el cual corresponde a un diámetro, $D = 0.0552$ y $u_{sd} = 226.73$.

3. Una vez calculada la velocidad de sedimentación de las partículas, procedemos a determinar el Número de Stokes y las respectivas eficiencias de remoción, por intercepción directa e impacto inercial; para ello usamos las siguientes relaciones:

² Mollvaine, (ed.): "The Mollvaine Scrubber Manual", Mollvaine Co., USA, 1974.

$$F) \text{ Stk} = \frac{d^2 \rho_s (u_{sD} - u_{sp})}{18 \mu D}$$

$$G) \eta_{i1} = \frac{\text{stk}^2}{(\text{stk} + 0.35)^2}$$

$$H) R = d/D$$

$$I) \eta_{i1} = (1 + R)^2 - \frac{1}{(1 + R)}$$

$$J) \eta_t = 1 - (1 - \eta_{i1})(1 - \eta_{i1}) \dots$$

$$\text{Stk} = \frac{(5 \times 10^{-4} \text{ cm})^2 (0.6 \text{ g/cm}^3) (226.73 - 0.0023 \text{ cm/s})}{18 (1.816 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{s}) (552 \times 10^{-4} \text{ cm})} = 0.1883$$

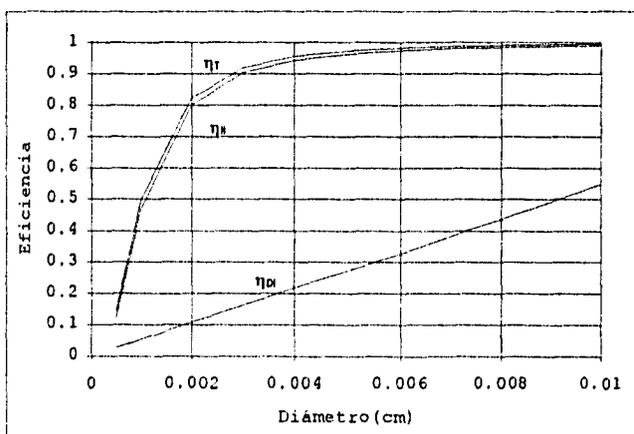
$$\eta_{i1} = \frac{0.1883^2}{(0.1883 + 0.35)^2} = 0.1223$$

$$R = \frac{5 \times 10^{-4} \text{ cm}}{552 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 9.05 \times 10^{-3}$$

$$\eta_{i1} = (1 + 9.09 \times 10^{-3})^2 - \frac{1}{(1 + 9.09 \times 10^{-3})} = 2.71 \times 10^{-2}$$

$$\eta_t = 1 - (1 - 0.1223)(1 - 2.71 \times 10^{-2}) = 0.1462$$

dp	0.0005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010
Stk	0.1883	0.7530	3.0061	6.7364	11.904	18.460	26.347	35.503	45.864	57.362	69.930
η_r	0.1223	0.4660	0.8023	0.9037	0.9437	0.9631	0.9740	0.9806	0.9849	0.9879	0.9901
R	0.0090	0.0181	0.0362	0.0543	0.0724	0.0905	0.1086	0.1267	0.1448	0.1629	0.1810
η_{α}	0.0271	0.0543	0.1086	0.1630	0.2175	0.2721	0.3269	0.3818	0.4370	0.4923	0.5479
η_l	0.1462	0.4950	0.8238	0.9194	0.9559	0.9732	0.9825	0.9880	0.9915	0.9939	0.9955



4. Antes de continuar, debemos dimensionar el equipo en forma adecuada para ello utilizaremos una geometría rectangular, no hay inconveniente si se desea usar un equipo cilindrico.



$V=A*B*C$, Si $B=C$, $V=A*B^2$, vemos que esta es la clásica relación longitud diámetro, por lo tanto si $A/B=3$ tenemos:

$$A = 3B$$

$$V = 3B \cdot B^2 = 3B^3; \quad V = 2.83 \text{ m}^3$$

$$\therefore B = \sqrt[3]{\frac{2.83}{3}} = 0.98 \approx 1.0 \text{ m}$$

$$A = 3(1.0) = 3.0 \text{ m}$$

ahora, determinaremos la distancia entre mamparas y el número de ellas que se recomienda, para el diseño.

$$n = \frac{L}{L'}$$

$$L' = \frac{B}{3} = 0.33 \text{ m}$$

$$n = \frac{3L}{B} = \frac{3 * 3}{1} = 9 \text{ mamparas}$$

es importante notar que durante la trayectoria que hace el fluido a través del equipo de lavado, su dirección cambia continuamente, estos cambios están dados por las siguientes relaciones:

n es par

n no es par

$$FC = 1$$

$$FC = 1$$

$$FCC = n - \frac{n + 2}{2}$$

$$FCC = FP = n - \frac{n + 3}{2}$$

$$FP = n - \frac{n + 4}{2}$$

además, se necesita un mínimo de dos secciones de deshumidificación.

Para nuestro caso en particular vemos que n es impar, por lo tanto:

$$FC = 1, \Rightarrow L = 0.333 \text{ m.}$$

$$FCC = FP = 9 - \frac{9 + 3}{2} = 3, \Rightarrow H = 1.0 \text{ m.}$$

sin embargo, hemos visto que el modelo predice una recolección por igual en todas las secciones del equipo, lo cual no es cierto, pues se ha visto que en las zonas de cambio de dirección existen zonas muertas donde la eficiencia llega a disminuir tanto que el modelo es incapaz de preverlo, por ello, en forma empírica se propone que el area efectiva de captura sólo sea el setenta porciento del total disponible.

Dado que la altura neta del equipo es de 1.0 m, y que tenemos tres secciones de flujo a contracorriente y tres en flujo paralelo; la altura real para cada uno sería de H=3.0 m, sin embargo, por la consideración anterior (zonas muertas), la altura efectiva es de H=2.10 m.

5. Finalmente, usando las ecuaciones siguientes obtenemos la eficiencia total de captura por tamaño de partículas:

$$K) \eta_s^{cc} = 1 - \exp\left(-\frac{3\eta_r Q_i}{2D Q_g} L\right)$$

$$L) \eta_s^{cc} = 1 - \exp\left[-\frac{3}{2} \frac{\eta_r}{D} \left(\frac{u_{sd} - u_{sf}}{u_{sd} - v_c}\right) \frac{Q_i}{Q_g} H\right]$$

$$M) \eta_s^{ff} = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{\eta_r Q_i}{D Q_g} H\right)$$

antes de proceder debemos conocer la cantidad de líquido de lavado a utilizar, para ello la bibliografía nos reporta las siguientes proporciones:

$$\frac{L}{G} = 0.27 \rightarrow 2.7 \frac{\text{l líquido lavado}}{\text{m}^3 \text{ de gas tratado}}$$

vamos a utilizar la proporción intermedia:

$$\therefore Q_1 = (0,5 \text{ l/m}^3)(2,83 \text{ m}^3/\text{s})(\text{m}^3/1000 \text{ l}) = 14,15 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\eta_s^{FC} = 1 - \exp\left(-\frac{3 \cdot 0,1467 \cdot 14,15 \times 10^{-4} \cdot 33,33}{2 \cdot 552 \times 10^{-4} \cdot 2,83}\right) = 0,0640$$

$$\eta_s^{FCC} = 1 - \exp\left(-\frac{3 \cdot 0,1467 \cdot (226,73 - 0,0023) \cdot 14,15 \times 10^{-4} \cdot 210}{2 \cdot 552 \times 10^{-4} \cdot (226,73 - 60) \cdot 2,83}\right) = 0,4325$$

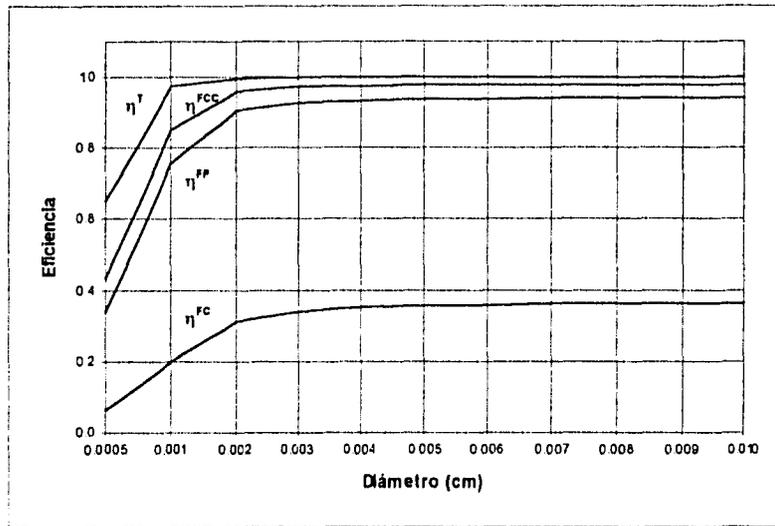
$$\eta_s^{FF} = 1 - \exp\left(-\frac{3 \cdot 0,1467 \cdot 14,15 \times 10^{-4} \cdot 210}{2 \cdot 552 \times 10^{-4} \cdot 2,83}\right) = 0,3407$$

$$\eta_s^T = 1 - (1 - 0,0640)(1 - 0,4325)(1 - 0,3407) = 0,6498$$

dp	0.0005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010
N ^{FC}	0.0640	0.2006	0.3111	0.3402	0.3511	0.3561	0.3588	0.3604	0.3614	0.3621	0.3626
N ^{FCC}	0.4325	0.8532	0.9589	0.9717	0.9754	0.9770	0.9778	0.9783	0.9786	0.9788	0.9789
N ^{FF}	0.3407	0.7561	0.9044	0.9272	0.9344	0.9376	0.9392	0.9401	0.9407	0.9411	0.9414
N ^T	0.6498	0.9714	0.9973	0.9986	0.9990	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992

finalmente, llegamos a la eficiencia neta del equipo que vendria a ser un promedio de las eficiencias de colección por tamaños de partículas:

$$\eta_t = 0,9646$$



6. El siguiente paso es determinar cuanta energía es necesario suministrar al equipo para su operación:

a) La potencia del ventilador esta dada por:

$$N) P_v = 1.18 \times 10^{-4} Q_v \Delta P$$

donde Q_v esta en ft^3/min y ΔP en in de agua.

b) La potencia de la bomba la determinamos con la ecuación:

$$O) P_p = 4.35 \times 10^{-4} Q_p \Delta P''$$

donde Q_1 esta en ft^3/min y ΔP en lb/in^2 .

c) En los lavadores de gases, es normal cierta pérdida de líquido de lavado, ya sea por arrastre del gas o simplemente por pérdidas por evaporación, es posible calcular dicha pérdida como un equivalente de potencia, a través de la fórmula siguiente:

$$P) P_{FE} = 60Q_1 \left(\frac{\$}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{\text{Kw} - \text{Hr}}{\$} \right)$$

donde Q_1 es el porcentaje de líquido perdido, $\$/\text{m}^3$ es el costo del líquido de lavado y $\text{Kw-Hr}/\text{\$}$, es el costo de la electricidad.

La potencia total se determina a partir de:

$$Q) P_T = P_v + P_E + P_{FE}$$

Para este análisis contamos con la siguiente información:

$$Q_1 = 2.83 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (6000 ft}^3/\text{min)}$$

$$\eta_{\text{BOMBA}} = 70 \%$$

$$\eta_{\text{VENTILADOR}} = 70 \%$$

$$\Delta P_{\text{GAS}} = 8 \text{ inH}_2\text{O}$$

$$\Delta P_{LIQ. LAV.} = 20 \text{ lb/in}^2$$

$$Q_1 = 14.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Costo del liq. de lavado} = 0.337 \text{ N\$/m}^3$$

$$\text{Costo de la electricidad} = 0.330 \text{ N\$/Kw-Hr.}$$

$$P_v = \frac{(1.18 \times 10^{-4})(6000)(8)}{0.70} = 8.09 \text{ Kw}$$

$$P_b = \frac{(4.35 \times 10^{-4})(3)(20)}{0.70} = 0.04 \text{ Kw}$$

$$P_{FE} = \frac{60(14.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3)(0.05)(0.337 \text{ N\$/m}^3)(\text{KwHr}/0.330 \text{ N\$/KwHr})}{0.70} = 0.006 \text{ Kw}$$

$$P_t = 8.09 + 0.04 + 0.006 = 8.137 \text{ Kw.}$$

En general, después de un análisis detallado del comportamiento del sistema, llegamos a los siguientes resultados:

- Un incremento en el ΔP del líquido de lavado nos genera gotas más pequeñas, esto a su vez incrementa la eficiencia general de captura.
- Un incremento en la relación de flujos líquido/gas, se refleja directamente en un aumento de la eficiencia total de captura.

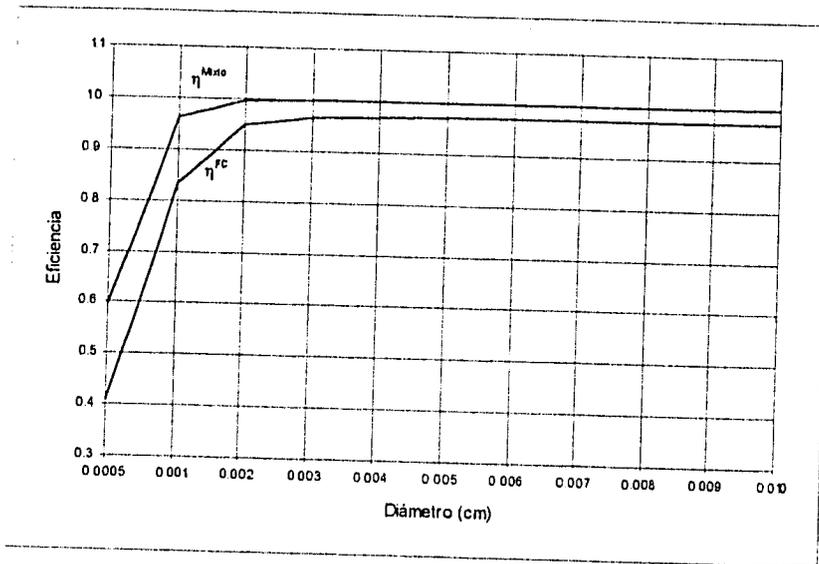
- La viscosidad y la densidad se ven afectadas cuando hay una variación muy fuerte en la temperatura o en la presión, así, un aumento de temperatura conlleva un aumento tanto de la viscosidad del gas como del factor de corrección de Cunningham, la presión también afecta, pues los números de Reynolds de las gotas de lavado incrementan ligeramente, dado que éste es función de la densidad y la viscosidad del fluido.

Hasta aquí, solo se ha hablado del Lavador de Gases de Flujo Mixto, que hay sin embargo del Lavador de Flujo Cruzado, bajo las mismas condiciones de operación, la siguiente gráfica muestra el comportamiento de ambos equipos, con ello quizá sea suficiente para afirmar que la adaptación propuesta representa una mejora significativa al proceso.

Ahora bien, la eficiencia total de colección como se dijo anteriormente, es una eficiencia promedio de las eficiencias de colección por tamaño de partícula, por tanto tenemos:

$$\eta_t^{\text{MIXTO}} = 0.9646$$

$$\eta_t^{\text{CRUZADO}} = 0.9052$$



CONCLUSIONES

Después de un análisis detallado del sistema, se llega a los siguientes resultados generales:

- Como puede observarse, en la última gráfica (pag. 130), la eficiencia de colección mejora sensiblemente entre el Lavador de Gases de Flujo Mixto respecto al de Flujo Crudo.
- La adaptación del equipo se justifica en dos sentidos; *primero* con la modificación propuesta se logra cumplir con los requerimientos técnicos del medio ambiente y, *segundo* la inversión requerida para su realización es mínima.
- Aún cuando el equipo no es el mejor de su especie en cuanto a la recolección de contaminantes particulados, es decir eficiencias muy altas, si lo es en lo relativo al consumo de servicios.

- Es importante no olvidar que en última instancia el factor determinante tanto en la selección como en la modificación o adaptación de un equipo o proceso, es el factor económico y desde luego que se adapte a los requerimientos técnicos requeridos.

Finalmente, quiero expresar que la única manera de evitar el deterioro del medio ambiente es a través de la generación de procesos limpios, procesos en los que se utilicen y reciclen en la medida de lo posible los materiales que en él intervienen, y se evite la salida de estos en cualquiera de sus formas al medio ambiente; ya que si los materiales procesados no son tratados de forma adecuada en el proceso mismo estos degeneran no en productos útiles al hombre sino en productos nocivos a la naturaleza, que una vez generados lo único que se puede hacer es traspasarlo de un medio a otro sea éste sólido, líquido o gaseoso; esto definitivamente no es la forma de controlar la contaminación pues si bien eliminamos el problema en una fase lo transportamos a otra que quizá, por el momento, no sea de la misma gravedad pero el tiempo avanza y el progreso no perdona.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos:

D.M. Benforado, G. Riddle Hoover: "Pollution Prevention: One Firm's Experience", Part II, Chem. Eng., Sep. 1991, Pag. 130.

F.A. Zenz: "Designing Gas-Absorption", Chem. Eng., Nov. 13, 1972. Pag. 120.

J.D. Brady, M.T. Rei: "A Wet Collector of Fine Particles", CEP, Aug. 1977, Pag. 45.

Konrad T. Semrau: "Practical Process Design of Particulate Scrubbers", Chem. Eng., Sep. 26, 1977, Pag. 87.

R.L. Berglund, C.T. Lawson: "Preventing Pollution in the CPI", Part I, Chem. Eng., Sep. 1991, Pag. 120.

Rashmi Parekh: "Equipment for Controlling Gaseous Pollutants", Chem. Eng. Oct. 6, 1975, Pag. 129.

Robert B. Pojasek: "For Pollution Prevention: Be Descriptive, Not Prescriptive", Part III, Chem. Eng. Sep. 1991, Pag. 136.

Robert McInnes, Steven Jelinek: "Cutting Toxic Organics", Part I, Chem. Eng. Sep. 1990, Pag. 108.

Robert McInnes, Kevin Jameson: "Scrubbing Toxic Inorganics", Part II, Chem. Eng., Sep. 1990, Pag. 116.

Robert McInnes, Ross Van Royen: "Desulfurizing Fluegas", Part III, Chem. Eng., Sep. 1990, Pag. 124.

Robert McInnes, Mary B. Van Vormer: "Cleaning Up NOx Emissions", Part IV, Chem. Eng., Sep. 1990, Pag. 130.

Seymour Calvert: "How to Choose a Particulate Scrubber", Chem. Eng. Aug. 29, 1977, Pag. 54.

Thomas Godbey: "Brace your Plant Against a Dust Explosion", Chem. Eng., Apr. 1991, Pag. 130.

Report: "How to Cumply with the Clean Air Act", Chem. Eng., Jul. 1991, Pag. 121-123.

Report: "Wipping Out Air Pollution", Chem. Eng., May. 1990,
Pag. 27.

Report: "Pricing Equipment for Air Pollution Control", Chem.
Eng., May. 1990, Pag. 126.

Enciclopedias:

David C. Herting: "Wastes Industrial", Encyclopedia of
Chemical Technology (Kirk-Othmer), 3th. Ed. Vol. 24,
Pag. 227, USA., 1978.

G.M. Hiday: "Aerosols", Encyclopedia of Physical Sciences
and Technology", Vol. I, Pag. 261, USA., 1987.

George T. Austin: "Manual de Procesos Químicos en la
Industria", McGraw-Hill, México, 1988.

J. Barnat: "Enciclopedia de la Ciencia y la Técnica",
Ediciones Nauta, S.A., Barcelona, 1962.

Kennet W. Cooper, Richard A. Erth: "Air Pollution", Encyclopedia of Chemical Technology (Kirk-Othmer), 3th. Ed., Vol. 1, Pag. 624, USA., 1978.

Philip R. Sticksel, Richard B. Engdahl: "Air Pollution Control Methods", Encyclopedia of Chemical Technology (Kirk-Othmer), 3th. Ed., Vol. 1, Pag. 649, USA., 1978.

Robert H. Perry, Don Green: "Perry's Chemical Engineer's Handbook", McGraw-Hill, 6th. Ed., USA., 1989.

Libros:

Albert Parker: "Contaminación del Aire por la Industria", Ed. Reverté, S.A., España, 1983.

Arthur C. Stern: "Air Pollution", Vol. I, II y III. Ed. Academic Press, Inc. 1986.

Bravo H.: "La contaminación del Aire en México", Ed. Fundación Universo Veintiuno, A.C., 1987.

Cordoba Ojeda Aaron: "Aplicación de Modelos Matemáticos como Herramienta de Evaluación para el Control de la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México", Tesis, UNAM, 1992.

Cuadernos de Postgrado: "Diseño de Equipo", Vol. I y II., Facultad de Química, UNAM.

D.J. Spedding: "Contaminación Atmosférica", Ed. Reverté, S.A., 1981.

Dean E. Painter: "Air Pollution Technology" , Ed. Reston Publishing Company, Inc., 1974.

Joseph M. Marchello: "Gas Cleaning for Air Quality Control", Ed. Marcell Dekker, Inc., 1984.

Kennet E. Noll, Vassilios Gounaris: "Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control", Ed. Lewis Publisher, Inc. 1992.

R.D. Ross: "La Industria y la Contaminación del Aire", Ed. Diana, México, 1974.

SEDUE: "Políticas y Estrategias de Abatimiento y Control de la Contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México", Primer Seminario Internacional sobre Administración de la Calidad del Aire. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 1987.

Seinfeld, J.: "Contaminación Atmosférica, Fundamentos Físicos y Químicos", Ed. McGraw-Hill, 1978.

Thact Godish: "Indoor Air Pollution", Ed. Lewis Publisher, Inc. 1990.

William Licht: "Air Pollution Control Engineering. Basic Calculations for Particulate Collection", Ed. Marcel Dekker, Inc., 1985.